



Recuperación de Cojinetes Planos

1. Introducción
2. Materiales para cojinetes
3. Aleaciones de Metal Blanco
4. Casos de falla
5. Proceso de remetalado
6. Controles de calidad

1. Introducción

¿Qué es un cojinete?

- Dos piezas que tengan movimiento relativo (lineal, rotativo o ambos) entre ellas, constituyen un cojinete, sin importar su forma o configuración
- Lubricación → reducción de la fricción y eliminación del calor.
- Cojinete simple o plano → par de superficies cilíndricas en contacto conforme. En general un material estructural (resistencia requerida para transmitir potencia) y un material "para cojinete" más blando y con buenas propiedades frente al deslizamiento (bronce, babbitt, polímeros).
- Cojinete de elementos rodantes o rodamiento
- ¿Cojinete plano o rodamiento? → DEPENDE APLICACIÓN

1. Introducción

Cojinetes planos

- El cojinete plano es uno de los más antiguos y, al mismo tiempo, uno de los más avanzados elementos de máquina
- *"Un cojinete plano forma sólo una parte de un tribosistema. La confiabilidad operativa requerida del mismo sólo puede alcanzarse cuando los otros dos elementos del tribosistema, el eje y el lubricante, cumplen plenamente los requerimientos que les corresponden."*
- Los cojinetes radiales cilíndricos han sido diseñados y utilizados satisfactoriamente mucho tiempo antes de que su funcionamiento haya sido completamente comprendido y calculado
- Actualmente existen numerosos diseños especiales, que permiten disponer del cojinete plano óptimo para un amplio rango de cargas y velocidades de rotación
 - Cojinetes no cilíndricos (ovalados, con lóbulos)
 - Cojinetes asimétricos (Offset)
 - Cojinetes de almohadillas basculantes ("tilting pads")

1. Introducción

Tipos de cojinete plano

- Cojinete plano radial:
 - Dividido axialmente para ensamblarse sobre el eje → "Cojinete"
 - Circunferencia completa → "Buje"
- Cojinete plano radial-axial → soporta cargas radiales y de empuje axial
- Cojinete radial de almohadillas basculantes
- Cojinete radial-axial de almohadillas basculantes
- Aro de empuje axial
- Cojinete de empuje axial de almohadillas basculantes

1. Introducción

► Cojinete Radial



1. Introducción

► Buje



1. Introducción

- Cojinete Radial-Axial



1. Introducción

- Cojinete Radial de Almohadillas Basculantes



1. Introducción

- Cojinete Radial Simple – Axial de Almohadillas Basculantes



1. Introducción

- Cojinete Radial-Axial de Almohadillas Basculantes



- Segmentos de cojinete de empuje axial de almohadillas basculantes

1. Introducción

"Para el diseñador de máquinas, todos los cojinetes son un mal necesario, que no contribuyen en nada al producto o a la función de la máquina... Su mérito consiste en amortiguar tan poca potencia como sea posible, así como desgastarse lentamente, ocupar poco espacio y costar tan poco como sea factible."[1]

A.G.M. Michell, pionero en la teoría y diseño de cojinetes, inventor del cojinete de almohadillas basculantes ("tilting pads")

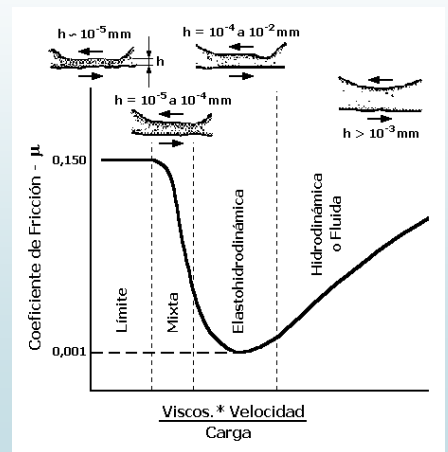
[1] A.G.M. Michell, Progress of Fluid-Film Lubrication, Trans. ASME 51 (1929), pp. 153-163.

1. Introducción

Tipos de lubricación en cojinetes planos

- ✓ Fluida o de Película completa (hidrostática o hidrodinámica)
 - ➔ El fluido soporta y distribuye uniformemente la carga. No hay contacto metálico.
- ✓ Límite o marginal ➔ contacto entre asperezas
- ✓ Mixta ➔ parte de la superficie se encuentra bajo lubricación límite y el resto en lubricación fluida. En esta condición se inicia el deterioro, que pasa a la lubricación límite.

Curva de Stribeck



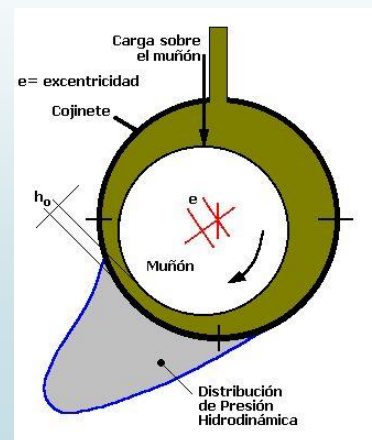
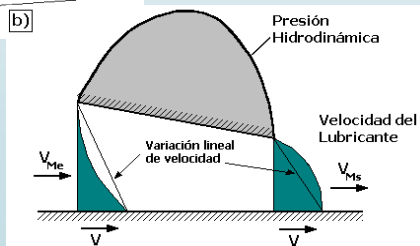
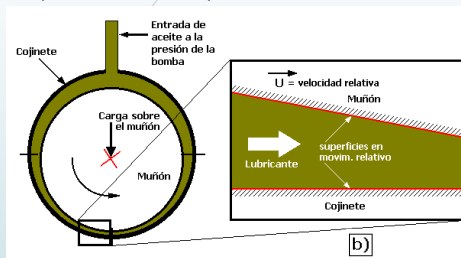
1. Introducción

Lubricación de película completa

- Retención del lubricante por tensión superficial (superficies planas, bujes de baja velocidad, donde se lubrica ocasionalmente a lo largo de la vida del componente)
- Hidrostática → suministro de lubricante a la interfaz deslizante a una presión hidrostática elevada, a través de una bomba. Muy baja fricción para bajas velocidades de deslizamiento (arranque).

1. Introducción

Hidrodinámica → el lubricante, gracias a su fricción interna y a su adhesión a las superficies, es forzado a entrar en la zona de contacto. La presión generada contrarresta la carga y mantiene separadas las superficies mediante una película de lubricante muy fina



2. Materiales para cojinetes

- En la gran mayoría de los casos → ejes y árboles son de acero
- Propiedades requeridas de un material para cojinete:
 - baja dureza (3 veces menor al eje)
 - resistencia razonable
 - maquinabilidad (tolerancias dimensionales)
 - lubricidad
 - adecuada resistencia a la temperatura y a la corrosión

Bujes poliméricos

- Nylons, acetales y PTFE relleno o cargado → bajo coef. rozamiento contra acero
- Son los cojinetes de menor costo (casos de funcionamiento en seco)
- Desventajas → **Fluyen a baja temp.** (baja resistencia, baja temperatura de fusión, mala conduct. térmica) → existen alternativas para sobrellevarlo

2. Materiales para cojinetes

Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitts")

- Familia de aleaciones base estaño (aleado principalmente con Cu y Sb) o base plomo (aleado principalmente con Sn y Sb)
- Baja dureza → buena incrustabilidad de terceros cuerpos
- Buena resistencia a la adhesión (incompatibilidad con acero)
- Baja resistencia a la fatiga
- Necesidad de lubricación de película completa (baja Temp. Fusión → falla en cond. de lubricación marginal)
- Se utilizan aplicados en capas de 0,1-10 mm sobre respaldos que confieren la resistencia estructural al cojinete:
 - Acero
 - Fundición de Hierro
 - Bronce

2. Materiales para cojinetes

Bronces

- Familia de aleaciones de Cu, principalmente los bronce (ocasionalmente latones)
- Bronces al plomo (mayor inrustabilidad), al estaño o al aluminio (mayor dureza y resist. a altas temp.)
- Mayor dureza y resistencia a la corrosión que los Babbitt, pero más blando (aunque cercano) que metales ferrosos
- Soportan altas cargas, lubricación marginal y altas temperaturas
- Bronce sinterizado → poroso, retiene lubricante y lo libera al aumentar la temp.
- Bronces al plomo → 5-25 %Pb, 10 %Sn (SAE 40, 64, 66, 791-795, 797, 799)
- Bronces al estaño → más de 20 %Sn, hasta 10 %Pb (maquinabilidad), Zn y Ni (resistencia)
- Bronces al aluminio → aleados con Fe, Ni, Si y Mn. Excelente tenacidad y resistencia a alta temp. (CDA C86200, C86300, C95200, C95300, C95400 y C95500)

2. Materiales para cojinetes

Aleaciones de Aluminio

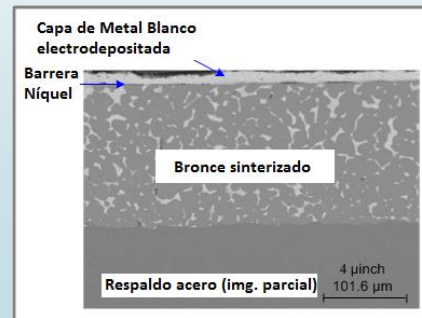
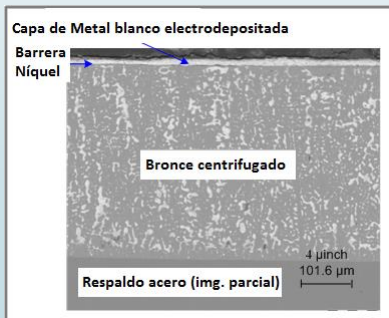
- Aleado con Sn y Pb → insolubles en Al
- Sn y Pb libres en matriz de Al → bajan la fricción en condiciones de lubricación marginal
- Mayor resistencia a la corrosión que bronce
- 7 %Sn, 1 %Cu, 1-2 %Si o Mg, algo de Pb y Cd
- Cu → en solución con el aluminio (aumenta resistencia)
- Aleaciones más usuales 850.0-T5, A850.0-T5 y B850.0-T5.



2. Materiales para cojinetes

Cojinetes trimetálicos

- Tendencia a disminuir las dimensiones del motor → cojinetes más compactos → mayor capacidad de carga
- Bronces → excelente resistencia a la fatiga
- Pobres propiedades anti-fricción de bronce → coj. trimetálicos acero-bronce-metal blanco
- Barrera Ni → impedir migración de Sn hacia el bronce (proceso difusivo)



3. Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitt")

- ✓ Aleaciones Babbitt → introducidas por primera vez como material anti-fricción por Isaac Babbitt en 1839, estas aleaciones han perdurado en el tiempo como un probado y verdadero material de cojinetes
- ✓ En la actualidad, el término "Babbitt" involucra una variedad de aleaciones de metal blanco → base estaño o plomo, acompañadas de cobre y antimonio
- ✓ Pequeñas variaciones en la composición química → amplio rango de condiciones de trabajo
- ✓ Estructuras heterogéneas → provee ventajas tanto de superficies blandas como duras

3. Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitt")

Un poco de historia

- ✓ 1824. Isaac Babbitt comienza a investigar aleaciones → primer productor en USA de utensillos de mesa hechos en aleación Britannia (92 Sn-6 Sb-2 Cu, de apariencia plateada y superficie lisa)
- ✓ 1830. Crea Taunton Britannia Manufacturing Company
- ✓ La compañía no iba bien, por lo que debió dejar el control del negocio en manos de C.E. Barton y H.G. Reed → Reed and Barton (marca mundialmente famosa en la actualidad de utensillos finos de mesa)
- ✓ Babbitt comienza a trabajar en Alger's Foundry and Ordinance Works, siendo allí donde dejó su impronta en el mundo industrial

3. Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitt")

- ✓ 1834. Babbitt cuela el primer cañón de latón en la historia de USA.
- ✓ 1839. Aleación para reducir fricción en motores de vapor → primer "Babbitt":
 - 4 partes cobre**
 - 8 partes antimonio**
 - 24 partes estaño**
- ✓ La invención de Babbitt recibió un premio de USD 20000 del Congreso de USA, con la finalidad de permitir la producción de la aleación con fines navales
- ✓ 1863. Babbitt finalmente patenta el proceso

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

Composición y propiedades mecánicas

- ✓ Actualmente las aleaciones Babbitt cubren un amplio rango de composiciones, desde 90% base Sn hasta 90% base Pb
- ✓ Existe una gran variedad de normas que especifican las composiciones (y sus rangos) de las diferentes variantes de Babbitts, por ejemplo:
 - ✓ ASTM B23 (American Society for Testing of Materials)
 - ✓ QQ-T-390A (US Government Specifications)
 - ✓ SAE J460 (Society of Automotive Engineers)
 - ✓ SABS (South African Bureau of Standards)

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

ASTM B23

Grade	1	2	3	11	7	8	13	15
Tin	90.0-92.0	88.0-90.0	83.0-85.0	86.0-89.0	9.3-10.7	4.5-5.5	5.5-6.5	0.8-1.2
Antimony	4.0-5.0	7.0-8.0	7.5-8.5	6.0-7.5	14.0-16.0	14.0-16.0	9.5-10.5	14.5-17.5
Lead	< 0.35	< 0.35	< 0.35	< 0.50	remainder	remainder	remainder	remainder
Copper	4.0-5.0	3.0-4.0	7.5-8.5	5.0-6.5	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.60
Iron (% Max)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10
Arsenic	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.30-0.60	0.30-0.60	0.25	0.8-1.4
Bismuth (% Max)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10
Zinc (% Max)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Aluminum (% Max)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Cadmium (% Max)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Total Named Elements	> 99.80	> 99.80	> 99.80	> 99.80	n/a	n/a	n/a	n/a

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

QQ-T-390A

Alloy #	1	2	3	4	5	6	7	10	11	13
Tin (%)	90.0-92.0	88.0-90.0	83.0-85.0	80.5-82.5	61.0-63.0	4.5-5.5	9.3-10.7	0.75-1.25	9.0-11.0	4.0-6.0
Antimony (%)	4.0-5.0	7.0-8.0	7.5-8.5	12.0-14.0	9.5-10.5	14.0-16.0	14.0-16.0	14.5-17.5	11.5-13.5	8.0-10.0
Lead (%)	0.35	0.35	0.35	0.25	24.0-26.0	79.0-81.0	74.0-76.0	78.0-83.0	74.0-79.0	83.0-88.0
Copper (%)	4.0-5.0	3.0-4.0	7.5-8.5	5.0-6.0	2.5-3.5	.50	.50	.60	0.40-0.60	.50
Iron (% Max)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Arsenic (% Max)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.20	0.60	0.8-1.4	0.20	0.20
Zinc (% Max)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Aluminum (% Max)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Bismuth (% Max)	0.08	0.08	0.08	-	-	-	-	-	-	-
Others (% Max)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.75

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

SAE J460

Number	11	12	13	14	15	16
Tin	< 86.0	< 88.0	5.0-7.0	9.2-10.7	0.9-1.3	3.5-4.7
Antimony	6.0-7.5	7.0-8.0	9.0-11.0	14.0-16.0	14.0-15.5	3.0-4.0
Lead	< 0.50	< 0.50	remainder	remainder	remainder	remainder
Copper	5.0-6.5	3.0-4.0	< 0.50	< 0.50	< 0.50	< 0.10
Iron (% Max)	0.08	0.08				
Arsenic	< 0.10	< 0.10	< 0.25	< 0.6	0.8-1.2	< 0.05
Bismuth (% Max)	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10
Zinc (% Max)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Aluminum (% Max)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Cadmium (% Max)			0.05	0.05	0.02	0.005
Others (% Max)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

SABS

STANDARD SPECIFICATION FOR WHITE METALS SABS 695/703 - 1971									
Grade WM		695 90	696 84	697 80	698 72	700 40	701 30	702 15	703 6
Tin (Sn)	Min	88.50	82.00	78.00	70.00	39.00	29.00	14.00	5.00
Tin (Sn)	Max	91.50	86.00	82.00	74.00	41.00	31.00	16.00	7.00
Ant (Sb)	Min	6.00	9.00	8.00	9.00	14.00	15.00	13.00	13.00
Ant (Sb)	Max	8.00	11.00	10.00	11.00	16.00	17.00	15.00	15.00
Copper (Cu)	Min	2.50	5.00	5.00	5.00	2.00	0.50	0.25	0.00
Copper (Cu)	Max	3.50	7.00	7.00	7.00	3.00	1.50	0.75	0.30
Lead (Pb)	Min	0.00	0.00	5.00	10.00	40.00	50.50	68.25	77.70
Lead (Pb)	Max	0.30	0.30	8.00	14.00	45.00	55.50	72.75	82.00

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

- ✓ Los distintos grados proveen un amplio rango de características, como alta capacidad de carga del cojinete, alta velocidad del eje o capacidad de soportar altas temperaturas
- ✓ En la industria actual, las aleaciones Babbitt base estaño son muy superiores, en lo que a propiedades se refiere, a las base plomo
- ✓ Babbitt base Sn → capacidad de carga hasta 14 MPa, velocidad permisible 2,5 veces superior que las base Pb
- ✓ Babbitt base Pb → capacidad de carga hasta 3,5 Mpa
- ✓ Babbitt base Sn → mayor resistencia y elongación que las base Pb
- ✓ Sin embargo, las Babbitt base Pb tienen la ventaja económica → utilizadas en aplicaciones en las que la resistencia, capacidad de carga o velocidad máxima permisible no son críticos
- ✓ Considerar que el plomo se encuentra en desuso por el impacto ambiental que genera

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

Tin Babbitt Alloy 2 (89 Sn – 7.5 Sb – 3.5 Cu)
ASTM B23, Grade 2
SAE, No. 12
Government QQ-M-161, Grade 2
Navy 46M2, Grade 2

Temperature		Tensile Strength		Elongation	Reduction
°C	°F	MPa	Ksi	% (a)	In Area, %
20	68 (b)	77	11.2	18	25
49	120	63	9.2	24	27
100	212 (c)	45	6.5	23	28
149	300	28	4.0	32	38
175	345	20	2.9	38	44

(a) Gage length equals 4 √area. (b) Compressive yield strength, 0.125% set, 42 MPa (6.1 ksi); compressive strength, 25% set, 103 MPa (14.9 ksi). (c) Compressive yield strength, 0.125% set, 21 MPa (3.0 ksi); compressive yield strength, 25% set, 60 MPa (8.7 ksi).

Propiedades mecánicas de Babbitt base Sn, aleación nro. 2, colada en coquilla.

Lead Babbitt Alloy 7 (75 Pb – 15 Sb – 10 Sn)
ASTM B23, Grade 7
SAE J460, No. 14

Temperature		Tensile Strength		Elongation	Hardness,
°C	°F	MPa	ksi	%	HB
25	77	72	10.5	4	22
100	212	38	5.5	25	10.5
150	302	21	3.0	52	8

Propiedades mecánicas de Babbitt base Pb, aleación nro. 7, colada en coquilla.

3. Aleaciones de Metal Blanco (“Babbitt”)

Composición y propiedades físicas-mecánicas de aleaciones de metal blanco **(ASTM B23)**

Alloy Number ^B	Specified Nominal Composition of Alloys, %					Specific Gravity ^C	Composition of Alloys Tested, %				Yield Point, psi ^D (MPa)	
	Tin	Antimony	Lead	Copper	Arsenic		Tin	Antimony	Lead	Copper	68°F (20°C)	212°F (100°C)
1	91.0	4.5		4.5		7.34	90.9	4.52	none	4.56	4400 (30.3)	2650 (18.3)
2	89.0	7.5		3.5		7.39	89.2	7.4	0.03	3.1	6100 (42.0)	3000 (20.6)
3	84.0	8.0		8.0		7.46	83.4	8.2	0.03	8.3	6600 (45.5)	3150 (21.7)
7	10.0	15.0	remainder		.45	9.73	10.0	14.5	75.0	0.11	3550 (24.5)	1600 (11.0)
8	5.0	15.0	remainder		.45	10.04	5.2	14.9	79.4	0.14	3400 (23.4)	1750 (12.1)
15	1.0	16.0	remainder		1.0	10.05						

Alloy Number ^B	Johnson's Apparent Elastic Limit, psi (MPa) ^E		Ultimate Strength in Compression ^F		Brinell Hardness ^G		Melting Point, ° F (°C)	Temperature of Complete Liquefaction, °F (°C)	Proper Pouring Temperature, ° F (°C)
	68°F (20°C)	212°F (100°C)	68°F (20°C)	212°F (100°C)	68°F (20°C)	212°F (100°C)			
1	2450 (16.9)	1050 (7.2)	12 850 (88.6)	6950 (47.9)	17.0	8.0	433 (223)	700 (371)	825 (441)
2	3350 (23.1)	1100 (7.6)	14 900 (102.7)	8700 (60.0)	24.5	12.0	466 (241)	669 (354)	795 (424)
3	5350 (36.9)	1300 (9.0)	17 600 (121.3)	9900 (68.3)	27.0	14.5	464 (240)	792 (422)	915 (491)
7	2500 (17.2)	1350 (9.3)	15 650 (107.9)	6150 (42.4)	22.5	10.5	464 (240)	514 (268)	640 (338)
8	2650 (18.3)	1200 (8.3)	15 600 (107.6)	6150 (42.4)	20.0	9.5	459 (237)	522 (272)	645 (341)
15					21.0	13.0	479 (248)	538 (281)	662 (350)

3. Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitt")

Composición y propiedades físicas-mecánicas de aleaciones de metal blanco (**SABS**)

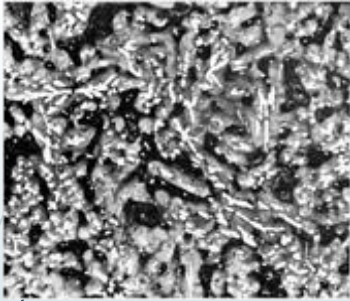
PHYSICAL PROPERTIES						
ALLOYS	DENSITY kg/m ³	TENSILE Strength MPa	ELONGATION %	BRINELL Hardness No.	LIQUIDUS Deg. C	SOLIDUS Deg. C
WM 90	7350	74	6.8	26.5	315	240
WM 84	7200	91	7.0	31.0	370	240
WM 80	7300	90	7.0	30.5	390	190
WM 72	8140	80	6.0	27.0	410	190
WM 40	8860	69	5.0	24.2	320	186
WM 30	8880	67	1.5	24.0	275	186
WM 15	9910	67	1.5	24.0	257	240
WM 6	9960	63	2.5	24.0	255	240

3. Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitt")

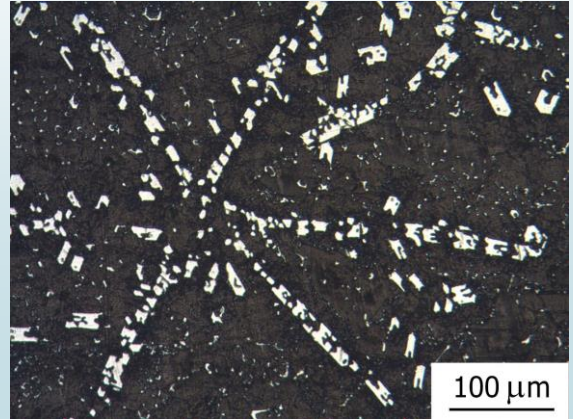
Microestructura

- ✓ Microestructura de aleaciones Babbitt en general → precipitados duros inmersos en una matriz blanda
- ✓ **Sn-Sb** → solubilidad decrece con la temp.
 - ✓ Enfriamiento rápido aleac. hasta 8 %Sb → solución sólida segregada Sb en Sn
 - ✓ Enfriamiento lento → precipitación entre dendritas de Sn del intermetálico SbSn
- ✓ **Sn-Sb-Cu**
 - ✓ Hasta 2 %Cu y 8 %Sb → Cu_6Sn_5 primario (agujas) + eutéctico solución sólida Sb en Sn y Cu_6Sn_5 interdendrítico
 - ✓ Incremento %Cu → mayor cantidad de Cu_6Sn_5 primario. 4-5 %Cu → patrón tipo "estrella" (Babbitt ASTM B23 N° 2)
 - ✓ Más de 9 %Sb y 2 %Cu → cuboides de SbSn atravesados por las agujas primarias de Cu_6Sn_5 (Babbitt ASTM B23 N° 3)

3. Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitt")



Sn-4.5 Sb-4.5 Cu (**Babbitt 1**). Dendritas finas segregadas de soluc. sólida rica en Sn + agujas y partículas dispersas de Cu₆Sn₅ (blanco)



Sn-7 Sb-3.5Cu (**Babbitt 2**). Dendritas gruesas segregadas de soluc. sólida rica en Sn + agujas (disposición en "estrella") y partículas dispersas de Cu₆Sn₅ (blanco)

3. Aleaciones de Metal Blanco ("Babbitt")



Sn-8 Sb-8 Cu (**Babbitt 3**). Agujas de Cu₆Sn₅ y cuboides de SbSn (ambos blancos) en una matriz de soluc. sólida rica en Sn.

¿Por qué “Recuperación de Cojinetes”?



4. Casos de falla

4. Casos de falla

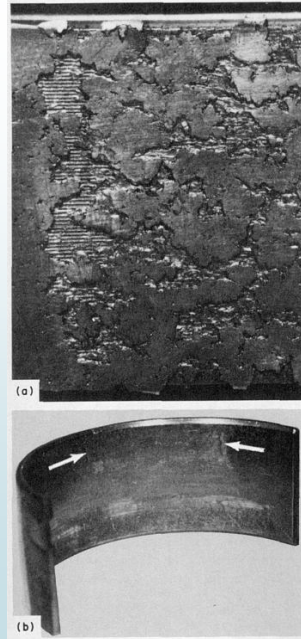
- Principales modos de falla en coj. planos: fractura dúctil o frágil, fatiga de altos ciclos (ordinaria) o de bajos ciclos (def. plástica), fusión, disolución química.

Fatiga

- Cojinetes → sometidos a numerosos ciclos de cargas variables:
 - Cargas desbalanceadas
 - Problemas de alineación
- Cojinetes bimetálicos (MB con respaldo de acero, p. ej.) → falla por fatiga ocurre en etapas:
 1. Se marca una pista de deslizamiento sobre superficie del MB
 2. El MB (blando) se separa del respaldo(duro) → patrones característicos sobre la sup.
- Este modo de falla se produce aun cuando el régimen de lubricación es adecuado, pero películas de lubricante muy delgadas → calentamiento y consiguiente debilitamiento del MB

4. Casos de falla

Superficies de cojinetes fallados por fatiga. **a)** Aspecto tipo "agujero de gusano" en coj. de Babbitt base Pb.
b) Descamado del recubrimiento blando en un coj. trimetálico



4. Casos de falla



4. Casos de falla

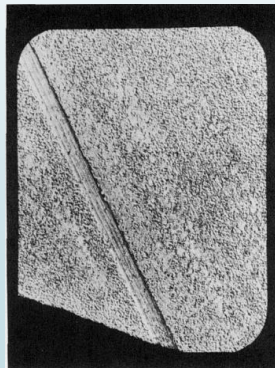
Guía práctica para la selección de materiales para cojinete, para obtener una vida a fatiga normal, en base a la tensión máxima en servicio

Bearing metal	Peak stress	
	(max) MPa	psi
Solid-metal bearings		
Aluminum alloy SAE 770-T101 4.1 mm (0.162 in.) thick	34.5	5000
Bimetal bearings		
Tin babbitt 0.6 mm (0.022 in.) thick on steel	8.3	1200
Lead babbitt 0.6 mm (0.022 in.) thick on steel	9.7	1400
Tin babbitt 0.1 mm (0.004 in.) thick on steel	15.2	2200
Lead babbitt 0.1 mm (0.004 in.) thick on steel	16.5	2400
Copper-lead 0.6 mm (0.022 in.) thick on steel	34.5	5000
Aluminum alloy SAE 780 0.8 mm (0.03 in.) thick on steel	41.4	6000
Trimetal bearings		
Lead-tin 0.025 mm (0.001 in.) thick on copper-lead 0.6 mm (0.022 in.) thick on steel	51.7	7500
Lead-tin 0.025 mm (0.001 in.) thick on silver 0.3 mm (0.013 in.) thick on steel	51.7	7500
Lead-tin 0.025 mm (0.001 in.) thick on aluminum alloy SAE 780 0.8 mm (0.03 in.) thick on steel	55.2	8000
Lead-tin-copper 0.4 mm (0.015 in.) thick on aluminum alloy SAE 781 0.4 mm (0.015 in.) thick on steel	69	10,000

4. Casos de falla

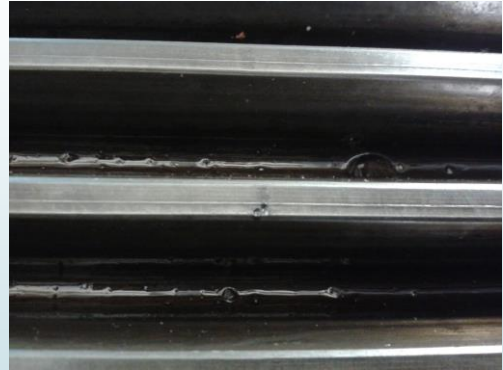
Erosión eléctrica (o picado eléctrico)

- Diferencia de potencial entre gorrón y cojinete
- Cuando el espesor de película lub. es pequeño y la dif. de potencial grande → salto de chispa
- Superficie del cojinete con aspecto opaco (no reflectivo) → el picado se produce a escala microscópica



Aspecto de la superficie de un cojinete de empuje axial en una turbina de vapor, desgastado por micro-pitting eléctrico.

4. Casos de falla



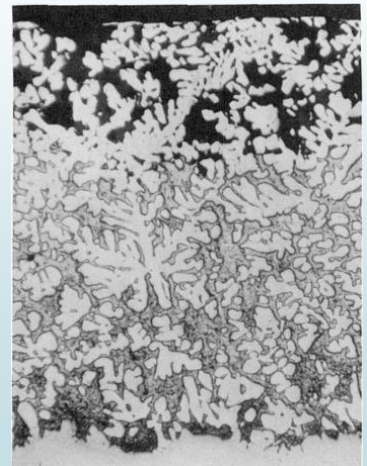
Superficie de un cojinete de caja reductora de turbina de gas, presumiblemente sometido a picado eléctrico (izq). Aspecto del engranaje del eje correspondiente (der).

4. Casos de falla

Corrosión

- Causas:
 - Numerosos productos de degradación del lubricante (alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos)
 - Contaminantes (p. ej. agua)
 - Aditivos antidesgaste
- Ataque selectivo de la aleación → remoción de sólo un elemento o fase en particular.
- Usualmente, plomo y cinc se corroen y disuelven más fácilmente que cobre y aluminio

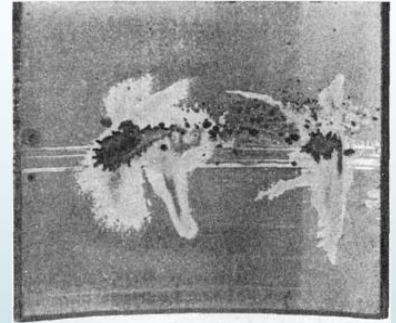
Pérdida de plomo (zona oscura) en coj. de aleación cobre-plomo. La matriz de cobre (dendritas blancas), ya sin plomo, no queda soportada, por lo que se fatiga y fractura fácilmente.



4. Casos de falla

Cavitación

- Zonas de baja presión de lubricante en el cojinete (salida cuña hidrodinámica) → generación de cavidades gaseosas
- Implosión de cavidades en zonas de alta presión → el lubricante circundante genera elevadas tensiones sobre la superficie blanda del cojinete
- Repetición de estas tensiones en la misma zona → falla por fatiga
- Generalmente ocurre en regiones del cojinete que no soportan carga (zonas de baja presión)
- Reducción de cavitación:
 - Materiales más resistentes a la fatiga
 - Incremento presión del sistema
 - Incremento viscosidad lubricante



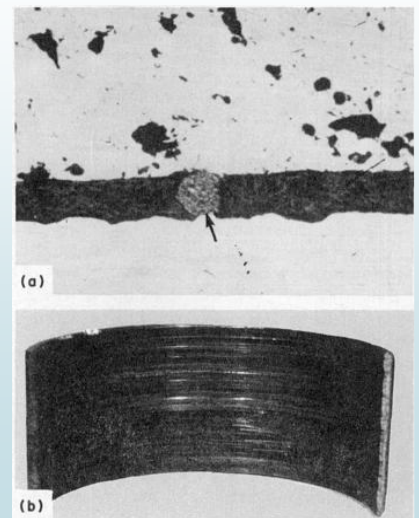
Aspecto típico de una falla por cavitación en un cojinete plano de deslizamiento

4. Casos de falla

Terceros cuerpos

- Abrasión por suciedad, abrasivos, virutas, etc. en el lubricante → rayado de las superficies
- Rayado metal blando, es lo más habitual. Los debris generados son blandos → baja abasividad.
- Rayado eje (duro) → generación de nuevos terceros cuerpos → aceleración del daño
- Debris → pueden quedar "embebidos" en el MB.

Cojinete plano dañado por abrasión de terceros cuerpos. a) partícula extraña embebida en el MB. b) superficie rayada por virutas metálicas.



4. Casos de falla



Buje de bocina de proa de buque, con gran daño por rayado.



Cojinete nro. 2 de turbina AEG, de 16 MW. Se aprecia el daño por 3ros cuerpos.

4. Casos de falla



Cojinete caja reductora turbina de gas. Se aprecia el daño por 3ros cuerpos.

4. Casos de falla

Fusión del metal blando



Buje de bocina de proa de buque, con evidencia de fusión y arrastre del metal blanco.

4. Casos de falla

Fusión del metal blando



Cojinetes caja de auxiliares de turbina AEG, de 16 MW. Se aprecia fusión y arrastre del MB.

5. Proceso de remetalado

¿Cómo se hace? ↔ ¿Cómo hacerlo?

1. Limpieza
2. Remoción metal blanco
3. Preparación de la superficie del respaldo
4. Estañado
5. Aporte del metal blanco
6. Limpieza del cojinete
7. Mecanizado final

5. Proceso de remetalado

1. Limpieza

- Remoción de restos de aceite, grasa, suciedad en general, e incluso grasa proveniente de la piel al manipularlo.
- Existen diversos métodos de limpieza:
 - desengrasado por solventes
 - desengrasado por vapor
 - limpieza alcalina
 - limpieza por emulsión
 - limpieza por ultrasonido

Cojinete N°2 Turbina de Vapor Ansaldo (33 MW)
limpiado por solventes.



5. Proceso de remetalado

- Solventes orgánicos (tricloroetileno o percloroetileno) → se sumerge la pieza en el líq. caliente o bien el vapor generado (por ebullición) se condensa sobre la pieza fría.
- Detergentes alcalinos → penetran en la capa contaminante removiéndola por emulsificación, saponificación o floculación. Resultan más efectivos si se emplean en simultáneo con electrólisis.
- Condiciones normales de partida → Solución 5% NaOH a 80-90 °C, 6-12 V, 5 A/dm². Sin embargo, siempre se utilizan métodos propietarios.
- Limpieza ultrasónica → vibraciones mecánicas de alta frecuencia (20-40 kHz), generadas por un transductor en la solución de limpieza. Altas tasas de limpieza, incluso en lugares inaccesibles por otras técnicas.

5. Proceso de remetalado

2. Remoción del metal blanco

- Remoción por calor
 - Se dispone el cojinete en una mufla a una temperatura adecuada → el metal blanco funde y escurre sobre una bandeja.
 - Una vez escurrido, se debe terminar la remoción por medios mecánicos, como espátula o cepillo de alambre.
 - También se puede remover calentando con soplete, aunque es más laborioso y la calidad del proceso es inferior.
- Remoción mecánica
 - Montaje del cojinete en un torno o fresa → remoción del metal blanco por arranque de viruta
 - Es una técnica más costosa y dificultosa que la remoción por calor
 - Presenta desventajas técnicas, como la necesidad de volver a estañar todo el respaldo



Coj. N°2 TV Ansaldo (33 MW).
Remoción por calor del MB.



Cojinete caja reductora turbina de gas.
Remoción mecánica del MB axial.

5. Proceso de remetalado

3. Preparación de la superficie del respaldo

- Generar una mayor superficie de contacto con el estaño/metal blanco → mecanizado "rugoso" y ataque químico ("**pickling**")
- Promover la reacción del respaldo con el estaño líquido ("**fluxing**") → unión metalúrgica ("mojado")

Pickling

- ✓ Usualmente en soluciones acuosas de HCl (temp. ambiente) o H_2SO_4 (80-85 °C).
- ✓ Remoción de herrumbre u óxidos superficiales antes del estañado.
- ✓ Tiempo → 10-60 min. Algunos minutos más luego de observar la pieza limpia, libre de óxidos → ataque químico suave que promueve el mojado del acero con Sn.
- ✓ Fundición de hierro → NO se somete a este proceso, ya que la reacción de estos ácidos con el grafito forma una densa película de carbono sobre toda la superficie → previene el estañado.
- ✓ Fundición de hierro y aceros colados → granallado de limpieza previo al estañado



5. Proceso de remetalado

Fluxing

- ✓ Promueve y acelera la reacción del estaño líquido con el hierro → formación de capa delgada y continua de fases intermetálicas SnFe, sobre la cual el Sn líq. puede formar un film continuo
- ✓ Hay tres formas de realizar este proceso:
 - ✓ Inmersión en soluciones acuosas (cloruros de Zn, amonio y Na + HCl) previo al baño de Sn líq.
 - ✓ Capa superficial de sales fundidas (cloruros de Zn, amonio y Na) sobre el baño de Sn líq.
 - ✓ Solución, pasta o aditivo mezclados con el polvo de Sn, aplicado a la superficie previo al estañado por pincel.
- ✓ Luego de pickling, enjuague con agua y secado → inmersión de la pieza en el baño de "flux".
- ✓ Tiempo → sólo hasta que toda la superficie de interés haya hecho contacto con el "flux". Al retirarla, se sumerge de inmediato en el baño de Sn.

5. Proceso de remetalado

4. Estañado

- Unión metalúrgica entre la capa de metal blanco posteriormente aportada y el respaldo
- Eleva la temperatura del respaldo hasta la apropiada de colada ($T_{\text{baño Sn}} \approx 280-325^\circ\text{C}$, estado fundido del estaño)
- Al retirar del baño de Sn → arrastre de restos de "flux", los que deben ser removidos mediante cepillo de alambre
- Cobertura parcial del baño con "flux" → retiro de la pieza por la zona "limpia"
- Alternativa → enfriamiento hasta T_{amb} al retirar del baño, armado del ensamble para colada y posterior calentamiento en mufla o por soplete previo a colada



5. Proceso de remetalado

Anclaje mecánico

- La capa de metal blanco se ancla mecánicamente al respaldo → agujeros o surcos (tipo "cola milano") en los que ingresa MB en el momento de la colada
- Se utiliza cuando hay riesgo de que la unión metalúrgica resulte deficiente, como es el caso de las fundiciones de hierro (dificultad de estañado)



5. Proceso de remetalado

5. Aporte del metal blanco

- Técnicas disponibles y más frecuentes de aporte del MB (depende del tipo y dimensiones del cojinete):
 - Colada centrífuga
 - Colada estática
 - Spray térmico

Colada centrífuga

- ✓ Se utiliza la fuerza centrífuga para confinar el Babbitt en estado líquido contra las paredes interiores del cojinete → técnica de mayor calidad en cojinetes radiales
- ✓ Solidificación → ocurre bajo una fuerza de ~20G, contribuyendo a la resistencia de la unión
- ✓ Velocidad de rotación
 - ✓ depende del diámetro interior del respaldo → la adecuada para que la fuerza centrífuga sea de 20G
 - ✓ debe ser lo suficientemente alta como para eliminar porosidad y proveer una unión resistente, pero lo más baja posible a fin de eliminar la segregación (mayor densidad de las fases ricas en Cu que las ricas en Sn, por ej.)

5. Proceso de remetalado

- ✓ Armado de disposición para colada
 - ✓ agujeros y cavidades → tapados correctamente con algún material resistente a la temp.
 - ✓ línea de partición en cojinetes partidos → separada por algún material de junta que permita el ingreso de una sierra luego de la colada.
- ✓ Cojinete a temperatura del baño de Sn (o bien calentado posteriormente en mufla o por soplete) → centrado razonable entre dos platos paralelos de máquina centrífugadora → provee fuerza de cierre para el sellado del cojinete y movimiento de rotación



5. Proceso de remetalado

- ✓ Centrado incorrecto → capa de MB asimétrica, descentrada respecto del respaldo
- ✓ Colada del MB → a través de un canal de colada previamente precalentado, introducido por uno de los dos platos (hueco central)
- ✓ Enfriamiento → ciclo de tiempo adecuado, agua a alta presión sobre el exterior del respaldo → solidificación desde el mismo hacia el interior (porosidad e impurezas en la sup. interior de la capa aportada)



5. Proceso de remetalado

Colada estática

- ✓ Técnica de calidad inferior (menor resistencia de la unión, menor control de la porosidad)
- ✓ Utilizada cuando las otras técnicas no son aplicables o bien no se justifican → aros o segmentos de empuje axial (planos), cojinetes con formas anormales (no cilíndricos), falta de disponib. de equip. (coj. de gran tamaño)
- ✓ Colada → directamente sobre el cojinete estacionario
- ✓ Armado de disposición para colada
 - ✓ agujeros y cavidades → tapados correctamente con algún material resistente a la temp.
 - ✓ generación de cavidad o molde para contener el MB líq. → eje o noyo

5. Proceso de remetalado

- ✓ Cojinete a temperatura del baño de Sn (o bien calentado posteriormente en mufla o por soplete). Eje o noyo a $\geq$ temp. → colada → enfriamiento desde el exterior del respaldo (solidificación inicia en el cojinete)
- ✓ Colada → una sola cuchara, en diferentes puntos del cojinete → prevenir separación de la capa de MB (por colada interrumpida) y sobrecalentamiento de una región del cojinete



5. Proceso de remetalado

Spray térmico

- ✓ Metalizado por arco eléctrico o por llama → fusión de un alambre metálico (MB en este caso)
- ✓ Proyección en forma de spray del metal fundido (mediante aire comprimido), sobre la pieza previamente tratada con un recubrimiento de anclaje.



5. Proceso de remetalado

- ✓ Resistencia de la unión → inferior que en colada centrífuga, e incluso estática.
- ✓ Mejor control de porosidad que en colada estática
- ✓ Espesores aportados hasta ~26 mm → superiores que en las otras técnicas (problema de la segregación)
- ✓ No es necesario ni recomendado utilizar anclajes mecánicos
- ✓ Desventaja → técnica potencialmente nociva para el operario (gran generación de humos, metal atomizado y óxido de Sn) → ventilación y utilización de máscaras

5. Proceso de remetalado

6. Limpieza del cojinete

- ✓ Desarmado del ensamblaje de colada
- ✓ Remoción de los restos de adhesivos, juntas y aislantes utilizados en el ensamblaje.
- ✓ Separación de las dos mitades (cojinetes partidos) → manual, mediante arco de sierra
- ✓ Desbaste para asentamiento de las dos mitades y cierre correcto del coj. → manual, mediante lima plana
- ✓ Limpieza de la superficie exterior del respaldo (herrumbre por agua + alta temp.) → químico + abrasivo



5. Proceso de remetalado



5. Proceso de remetalado

7. Mecanizado Final

- Cilindrado interior (torneado) de la capa de metal blanco a la medida especificada (huelgo requerido)
- Mecanizado (fresado-torneado) de bolsillos y canaletas de lubricación
- Cojinetes asimétricos, con lóbulos por ej. → requieren de centro de mecanizado CNC
- Taladrado de agujeros de ingreso / descarga de lubricante



6. Controles de calidad

- Resistencia e integridad de la unión metal blanco – respaldo → parámetro de calidad fundamental en cualquier cojinete bimetálico
- Resist. unión MB-acero, con adecuada unión metalúrgica $\geq 60\text{MPa}$
- Resist. unión MB-bronce, con adecuada unión metalúrgica $\geq 40\text{MPa}$ → superior a resist. Babbitt
- Resistencia de la unión → ensayos destrutivos
- Controles de calidad posteriores al remetalado → END (UT, tintas)

Ultrasonido

- ✓ Control de adherencia (integridad de la unión)
- ✓ No determina resistencia de la unión, aunque permite estimar cualitativamente su calidad
- ✓ Protocolo de ensayo, informe

