

T
673.32
GUE

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"ELABORACION DE BRONCES AL ESTAÑO
CON ALTO CONTENIDO DE PLOMO
PARA COJINETES DE CARGAS ELEVADAS"

Tesis de Grado
previa a la obtención del título de

INGENIERO MECANICO

presentada por

CRISTOBAL EDUARDO GUEVARA JARA

Guayaquil-Ecuador

1983

D E D I C A T O R I A



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

A mi Madre

A mi Padre (+)

A mi Esposa

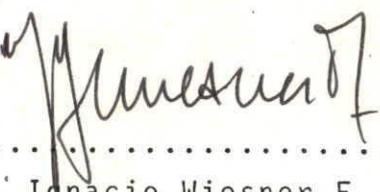
A mis Hijos

A mis Hermanos

A G R A D E C I M I E N T O

A la Escuela Superior
Politécnica del Litoral

Al Sr. Ing. IGNACIO WIESNER F.,
distinguido académico de
ESPOL.


.....
Ing. Ignacio Wiesner F.,

DIRECTOR DE TESIS

RESUMEN

Utilizando el horno basculante de la ESPOL y una máquina para moldear por centrifugación, se elaboró material para cojinetes de la aleación 80 Cu-10 Sn-10 Pb.

Los ensayos de dureza, metalografía, tracción y compresión que luego se hicieron con probetas normalizadas de acuerdo a normas ASTM, revelaron las excelentes propiedades mecánicas de los mismos y demostraron la correcta aplicación de la tecnología de la fundición, y los beneficios que se pueden obtener al eliminar la importación de importantes cantidades que de este material usan los Ingenios Azucareros, Acerías y Fábricas de Cemento.

INDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS Y ANEXOS	IX
INDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCION.	13
I INFORMACION GENERAL.	16
1.1 Importancia Tecnológica del bronce para co- jinete s.	16
1.2 Clasificación de las aleaciones de cobre . . .	17
1.3 Aleaciones usadas para cojinetes.	20
1.3.1 Recomendaciones generales	28
1.3.2 Aplicaciones de las Aleaciones Cu-Sn-Pb. .	35
1.4 Aleaciones usadas para cojinetes de molinos de caña.	38
II LA FUNDICION DE BRONCE AL ESTAÑO CON ALTO CONTENI- DO DE PLOMO.	53
2.1 Metalurgia de la Fundición	53
2.2 Equipos de fusión y colado	63
2.3 Materiales adicionales a la fundición.	68

III TRABAJO EXPERIMENTAL	72
3.1 Tecnología de la Fundición 80-10-10	73
3.1.1 Experiencia de Laboratorio.	73
3.1.2 Técnica del Trabajo	75
3.1.3 Equipo de Colado.	80
3.2 Control de Calidad de los Bronces	87
Ensayos de Laboratorio.	89
3.2.1.- Metalografía	89
3.2.2.- Dureza Brinell.	90
3.2.3.- Ensayos de Tracción y Compresión. .	96
3.3 Discusión de Resultados	100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	104
ANEXOS.	106
BIBLIOGRAFIA.	114

INDICE DE FIGURAS Y ANEXOS

Nº		Pág.
1	Vista lateral de un molino de caña FLC.	40
2	Diagrama simplificado de fuerzas en un molino de caña en operación.	42
3	Dibujo esquemático de un cojinete de bronce de un molino de caña FLC	45
4	Gráfico para determinar la presión máxima en la película de lubricante.	47
5	Esquema de distribución de la carga en el cojinete.	50
6	Diagrama de equilibrio cobre-estaño	54
7	Diagrama de equilibrio cobre-plomo.	57
8	Fundición centrifugada de eje horizontal.	67
9	Fundición centrifugada de eje vertical.	69
10	Gráfico de temperatura de la aleación eutéctica Sn-Pb.	74
11	Horno basculante de Crisol de la ESPOL.	77
12	Equipos de seguridad e instrumentos para el pesaje control de temperatura y operación.	77
13	Equipo de Fundición centrifugado de la ESPOL vista lateral	82

ANEXOS

Pág.

A Criterio de Compatibilidad de durezas entre ejes y cojinetes. .	106
B Diagrama de equilibrio estaño-plomo. .	109
C Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción y compresión para metales no ferrosos según ASTM. .	110
D Curvas de Ensayo de Compresión, Bronce 1 y 4.	111
E Curvas de Ensayo de Compresión, Bronces 4 y 3.	112
F Curvas de Ensayo de Compresión, Bronces 4 y 3 (Cont.)	113

INDICE DE TABLAS

INTRODUCCION

El cobre fue uno de los primeros metales conocidos por el hombre. Esto se debió a que se encuentra en la naturaleza en estado más o menos puro para ser utilizado en la confección de artefactos. Además, el punto de fusión y el de sus aleaciones con oro, estaño y zinc, son relativamente bajos, y se pueden alcanzar quemando leña o carbón de madera.

Ciertas aleaciones de cobre y el cobre mismo, fueron conocidos por las culturas pre-colombinas, llegando a establecerse que usaron técnicas de deformación plástica y fundición para fabricar utensilios y adornos de una belleza digna de admiración.

El papel importante que desempeñan los bronces sobre todo en la confección de cojinetes para todo tipo de maquinaria y en especial para industrias de gran envergadura como fábricas de acero, de papel, de cemento, ingenios azucareros, etc., creemos que justifica el objetivo del presente trabajo.

El problema de idearse un soporte para un eje en rotación se le presentó al primer ser humano que se sirvió de la rueda como medio de locomoción o de transporte. Desde entonces a través de los siglos el hombre ha tratado de perfeccionar estos mecanismos optimizando las condiciones de antifricción de los cojinetes y el balanceamiento de los ejes, llegando en la actualidad a realizar verdaderos milagros de ingeniería, como cuando se habla de rotores de turbinas que giran a altas velocidades con una pérdida despreciable de energía por fricción en los cojinetes.

Con la invención de los cojinetes de bolas, de rodillos y otros tipos combinados, el uso del bronce, otras aleaciones y materiales sintéticos para cojinetes se ha repartido a los casos en los que no se puede usar dichos rodamientos, sea por diseño o economía. En el presente trabajo se utiliza el vocablo cojinete en referencia únicamente a los cojinetes tipo camisa o manguitos, conocidos como "bocines".

Esta tesis trata de dar una idea concreta y precisa acerca de la práctica de la fundición centrífugada de bronces para cojinetes de cargas elevadas, la cual no se puede llevar a cabo sin el conocimiento previo de su tecnología.

Con la ayuda del equipo material y humano de la ESPOL se ha producido un bronce 80-10-10 excelente para aplicaciones en cojinetes de baja velocidad y cargas elevadas. Estos conocimientos y experiencias se desean difundir entre los técnicos de nuestro país, de una manera especial entre quienes están dedicados a las labores de fundición.

CAPITULO I

INFORMACION GENERAL

1.1 IMPORTANCIA TECNOLOGICA DEL BRONCE PARA COJINETES

Innumerables aleaciones de bronce han sido seleccionadas como materia prima para la elaboración de dichos elementos mecánicos, por sus cualidades de dureza y antifricción, y la tecnología se ha encargado de optimizarlas para aplicaciones bien definidas. Los barcos, por ejemplo, tienen en su eje impulsor una camisa de bronce naval G (88 Cu- 6 Sn- 4 Zn- 2 Pb) centrifugado colocado a temperatura, que desempeña un papel principal como cojinete en la transmisión de poder a la hélice. El bronce 3 C (85 Cu - 5 Sn - 9 Pb - 1 Zn) es usado en los cojinetes de máquinas herramientas; el tipo 4A se emplea en maquinaria eléctrica, y en las locomotoras, los principales cojinetes son de bronce 85 Ci - 10 Sn - 5 Pb, o también 80 Cu - 8 Sn - 12 Pb.

Se puede decir que en todo tipo de maquinaria podemos encontrar cojinetes de bronce, desde los pequeños bu-

jes de los artefactos electrodomésticos, hasta cojinetes de gran tamaño como los de las compuertas de diques.

Entre los consumidores importantes de bronce para cojinetes se hallan las centrales azucareras que, aquí en el País, tienen un consumo de alrededor de 12 toneladas anuales. Este es un rubro importante que debe ser tomado en cuenta por los fundidores nacionales.

Para la demanda total del País existe una fundición de bronce centrifugado en la Costa, que puede considerarse importante; las demás empresas de fundición son productores ocasionales de aleaciones de bronce no siendo calificadas para producir materiales confiables, pues un bronce aleado con plomo, para cojinete, debe ser centrifugado para que adquiera excelentes cualidades de antifricción.

1.2 CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES DE COBRE

Originalmente los bronces tenían como componentes principales el cobre y el estaño. En la actualidad hay una gran variedad de bronces, debido a lo cual se hace necesario clasificarlos de acuerdo a su composición química básica.

La ASTM ha hecho una clasificación normalizada de las aleaciones fundidas de base cobre, y la ha designado B 119. La finalidad de esta clasificación es la de simplificar la terminología, aclarando que cada una de las clases que se señalan más adelante cubran muchas aleaciones.

Se aplica la palabra cobre a toda aleación que contenga 98% o más de cobre; el término latón a toda aleación de base cobre que contenga una apreciable cantidad de zinc; el término bronce a todas las aleaciones de base cobre que contengan otros elementos distintos del zinc, y en suficiente cantidad como prevalecer sobre el zinc en la aleación.

A continuación la Clasificación B 199 en la parte referente a los bronces:

Clase	Elementos de Adición	Aplicaciones
Cobre	No más del 2% total de arsénico, zinc, cadmio, silicio u otros elementos.	Fundiciones de cobre de conductividad, cobre puro.

CLASE	ELEMENTOS DE ADICION	APLICACIONES
Bronce al estaño con plomo	Hasta 20% de estaño. Zinc menos que estaño. Plomo sobre 0.5% y bajo 6%.	Aplicaciones muy usadas en fundición. Pueden ser modificadas por adición de algo de níquel o fósforo: B61, B62, B143.
Bronce al Estaño	Estaño del 2 al 20%. Zinc menos que estaño. Plomo menos del 0.5%.	Aleaciones muy usadas en fundición. Pueden ser modificadas por adición de níquel o fósforo: B 22, B 143.
Bronce al estaño con alto porcentaje de plomo	Hasta 20% de estaño. Zinc menos que estaño. Plomo sobre el 6%.	Aleaciones muy usadas en fundición. Pueden ser modificadas por algo de níquel o fósforo: B 22, B 66, B 67, B 144.
Bronce al plomo	Plomo sobre el 30%. Zinc menos que el estaño. Estaño bajo 10%	Para aplicaciones especiales en cojinetes.
Bronce al Níquel	Sobre 10% níquel. Zinc menos que níquel. Estaño bajo 10%. Plomo bajo 0.5% Níquel sobre 10%.	Se llama algunas veces plata alemana o plata niquelada.
Bronce al níquel con plomo	Zinc menos que níquel Estaño menos de 10%. Plomo sobre 0.5%	Se llama algunas veces plata alemana o plata niquelada: B149.
Bronce al Aluminio	Aluminio del 5 al 15% Hierro hasta 10% Silicio menos del 0.5%	Aleaciones que deben ser tratadas térmicamente: B 148.

CLASE	ELEMENTOS DE ADICION	APLICACIONES
Bronce al Silicio	Silicio sobre el 0.5% Zinc no más del 5% Cobre menos de 98%	Aleaciones sometidas a tratamiento térmico: B: 198
Bronce al Berilio	Berilio sobre 2%	Aleaciones factibles de tratamiento térmico.

TABLA N° 1.- Clasificación B 119 de bronces según la ASTM

1.3 ALEACIONES USADAS PARA COJINETES

Los materiales para cojinetes son de una variedad muy amplia en propiedades físicas y en aleaciones de acuerdo a la aplicación que se les quiera dar. Hay pequeños cojinetes de hierro sinterizado para pequeños motores, y los hay también de bronce para soportar el eje motriz de un buque; y en lo que a velocidad se refiere existen cojinetes de babbitt al plomo para turbinas de vapor a 20000 RPM, hasta los bronces con alto contenido de plomo de un molino de caña a 8 RPM.

En nuestro medio se presenta pocos casos en que el in-

geniero tenga que diseñar un cojinete, pero es muy frecuente el hecho de tener que reemplazar un cojinete por otro de fabricación nacional de material desconocido. En estos casos es probable que dicho material falle causando daños más costosos y paradas innecesarias en el proceso, aunque a primera vista nos haya parecido un cojinete "igual" al original.

Si aplicamos al bronce ésto que hemos dicho anteriormente tenemos que concluir que es importante reconocer los diferentes tipos de bronce y sus aplicaciones, así como también estudiar su microestructura y sus fases, todo lo cual explica su comportamiento.

A continuación se señala de una forma concreta la aplicación de las principales aleaciones para cojinetes de acuerdo a capacidades de carga, velocidad y diámetro. Ver Tabla Nº 2. Luego, en la parte 1.3.2 se comienza la descripción de un tipo de bronce en particular para culminar más adelante con el análisis de una calidad de bronce importante en la industria: el bronce al estaño con alto contenido de plomo.

CARGA DEL COJINETE PSI AREA PROYECTADA	MATERIAL DEL PRECIO MAS BAJO RECOMENDADO	OTROS MATERIALES RECOMENDADOS
Cargas alternadas tales como las de máquinas de combustión (pequeños motores fuera de borda, pequeñas máquinas a Diesel)		
1200 max	Babbit al plomo sobre acero. (Recubrimiento de 0.015 a 0.03 pulg.)	Zinc o aleación de aluminio die-cast. Babbit al estaño sobre acero (0.015 a 0.030 in).
1200 a 2200	Microbabbit al plomo sobre acero. (0.002 a 0.005 in).	Babbit impregnado sinterizado en cobre Níquel sobre acero.
		Babbit impregnado sinterizado en bronce sobre acero.
		Microbabbit al estaño sobre acero.
		Aleación de aluminio sobre acero.
2200 a 2800	Babbit impregnado sinterizado en cobre-níquel sobre acero.	Cobre-Plomo (Pb al 35 %) en acero.
		Aleación sólida de aluminio sobre acero.
2800 min.	Cobre-plomo (Pb al 35% sobre acero.	La indicada de bajo costo pero con una capa base de Plomo de hasta (0.001 in)

CARGA DEL COJINETE PSI AREA PROYECTADA	MATERIAL DEL PRECIO MAS BAJO RECOMENDADO	OTROS MATERIALES RECOMENDADOS
Cargas alternadas como las de las grandes máquinas de Combustión Interna y Compresores (Máquinas a diesel o a gas, grandes compresores).		
1200 max.	Babbit al plomo sobre acero o sobre bronce (0.015 a 0.030 in)	Babbit al estaño sobre acero o sobre aleación sólida de aluminio.
1200 a 1500	Babbit al plomo sobre acero o sobre bronce (0.020 in max).	Microbabbit al plomo sobre acero o bronce Aleación sólida de aluminio.
1500 a 2000	Microbabbit al plomo sobre acero o bronce (0.002 a 0.005 in)	Cobre-plomo (30 a 40% Pb) sobre acero aleación sólida de aluminio sobre acero. (Para una mayor eficiencia, una intercampa de: 0,001 in de aleación de plomo).
2000 min.	Aluminio sólido	Cobre-plomo (25% Pb) sobre acero (ambos con una intercampa de 0,0005 a 0,002 in de Pb).
Cargas estáticas y de uso contínuo en equipo pequeño (Ventiladores, pequeños motores hasta 1 HP, bombas pequeñas hasta 30 gpm).		
10 max	Hierro sinterizado	Aceite impregnado de hierro sinterizado.

CARGA DEL COJINETE PSI AREA PROYECTADA	MATERIAL DEL PRECIO MAS BAJO RECOMENDADO	OTROS MATERIALES RECOMENDADOS
10 a 150	Cobre-estaño sinterizado impregnado de aceite	Bronce al plomo so- bre acero, hierro fundido.
		Aleación sólida de aluminio (más econó- mica cuando forma parte del alojamien- to).
150 a 250	Babbit al plomo o al estaño sobre acero.	Bronce al plomo (25% Pb), identado, lleno de grafito.
		Bronce, plomo sobre acero. Platinas de bronce forjado 88-4-4-4. Aluminio Sólido.
250 a 1200	Bronce con plomo (25% Pb) con res- paldo de acero	Bronce con plomo, con respaldo sólido o de acero, identado, lle- no de grafito.
		Aleación sólida de aluminio. Cobre- Plomo (35% Pb).
Cargas estáticas y de uso continuo en equipo mediano y grande (Mo- tores, generadores, bombas, sopladores, turbinas y sobrecargadores)		
650 max	Babbit plomo o estaño sobre acero o hierro fundido (Babbit plomo recomendado para mo- tores, estaño para turbinas).	Los mismos materiales indicados a la iz- quierda, los cuales pueden ir con res- paldo de bronce.

CARGA DEL COJINETE PSI AREA PROYECTADA	MATERIAL DEL PRECIO MAS BAJO RECOMENDADO	OTROS MATERIALES RECOMENDADOS
650 min.	Aleación de aluminio so- bre acero	Cobre plomo o bron- ce plomo (25 a 40% Pb). (Para mejores resultados se añade una capa de 0.001 in de aleación de plomo).
Aplicaciones generales para cojinetes de cargas variables (Tracto- res, equipos agrícolas, arranques, generadores, distribuidores).		
1200 max	Bronce sinterizado, impregnado de acei- te.	Hierro sinterizado impregnado de acei- te.
		Babbit plomo sobre acero (0.015 a 0.030 in).
		Babbit estaño sobre acero (0.015 a 0.030 in) Bronce al plomo sobre acero.
		Bronce al plomo sobre acero, iden- tado, lleno de grafito.
1200 a 2000	Bronce al plomo sobre acero (10 al 25% Pb).	Bronce al plomo so- bre acero identado, lleno de grafito.
		Bronce fundido (80-10-10) ú (83-7-7-3).

CARGA DEL COJINETE PSI AREA PROYECTADA	MATERIAL DEL PRECIO MAS BAJO RECOMENDADO	OTRO MATERIALES RECOMENDADOS
Aplicaciones generales para cojinetes de cargas variables (Cargas sobre todo estáticas más bien que alternativas para grandes camiones, tractores y equipos pesados).		
1200 max	Babbit al plomo sobre acero	Babbit al estaño sobre acero bronce fundido. (80-10-10)
1200 a 2000	Bronce al plomo (10 al 15% Pb) sólido o sobre acero	Bronce con 25% Pb sobre acero inmediato, lleno de grafito. Bronce fundido (80-10-10).
2000 a 3000	Bronce al plomo (10% Pb) sólido o sobre acero	Aleación de aluminio sobre acero. Bronce al plomo (25% Pb) sobre acero.
Aplicaciones generales con carga variable en artefactos pequeños (Cargas predominantemente estáticas como en lavadoras, mezcladoras, artefactos domésticos, herramientas eléctricas, etc.)		
100 max	Hierro sinterizado, impregnado de aceite	Bronce sinterizado impregnado de aceite. Aleación de zinc fundida a presión (más económica cuando forma parte de la carcaza).
100 a 500	Bronce con plomo (10 a 25% Pb)	Aleación sólida de Al Babbit al Pb sobre acero bronce al Plomo sólido sinterizado.

CARGA DEL COJINETE PSI AREA PROYECTADA	MATERIAL DEL PRECIO MAS BAJO RECOMENDADO	OTROS MATERIALES RECOMENDADOS
100 a 500	Bronce con Plomo (10 a 25% Pb)	Bronce al plomo fundido y sólido. (83-7-7-3)
		Bronce con plomo sobre acero, indentado, lleno con grasa o grafito.
Maquinaria Aeronáutica y Accesorios		
2500 max	Cobre-plomo (25% Pb) sobre acero	Cobre plomo sobre acero con una sobrecapa de 0.001.
		Plata sobre acero con una sobrecapa de 0.001" de aleación de plomo.
2500 a 4000	Cobre-plomo (25% Pb)	Plata sobre acero con una sobrecapa de 0.001" de aleación de plomo
Superficies de movimiento lento de equipo extrapesado		
500 max	Bronce o Bronce al Plomo (sinterizado o fundido)	Hierro Sinterizado Hierro fundido.
500 a 5000	Bronce fundido Sólido 80-10-10	79 Fe-20- Cu-10 sinterizado

(Tomado de Metals Handbook, Vol. I, Pág. 863)

Tabla N° 2.- Materiales para Cojinetes en Varias Aplicaciones de Ingeniería.

1.3.1 Recomendaciones Generales

En esta parte se trata sobre la selección del material para determinar un cojinete que realiza un trabajo específico. Estas observaciones son útiles en la práctica del mantenimiento.

El éxito de un cojinete de este tipo no depende sólo de la fundición, del maquinado y del material usado, sino también de un diseño apropiado que garantice una lubricación correcta.

Así mismo, es decisiva la selección de tolerancias y ajustes. Idealmente se deberá lograr que el lubricante no permita el contacto del cojinetе con el eje. Siendo ésto inevitable la investigación se dirige a mejorar las cualidades de los materiales y a seleccionar en cada caso el tipo de bronce que tenga la mejor adherencia a la película del lubricante.

La causa más común para la falla de un cojinetе es la interrupción de la película de lubricación, lo cual produce la fricción directa entre metales; ésto hace que finalmente haya un rozamiento con

desprendimiento de partículas o quizás una fusiόn del metal del cojinete, por causa de la alta temperatura que se desarrolla al producirse los fenómenos anotados.

Al seleccionar un material para un cojinete se debe tomar en cuenta:

- a) Tipo de carga: uniforme, con cambio de dirección, cíclica, etc.
- b) Cantidad de carga: cargas estáticas elevadas, cíclicas, ligeras, etc.
- c) Velocidad: para altas velocidades son mejores las aleaciones Babbit.
- d) Temperatura: Muchos materiales excelentes para cojinetes fracasan debido a que son sometidos a altas temperaturas; este factor afecta a la resistencia y a la corrosión del cojinete.
- e) Condiciones Corrosivas: En cada caso se deberá buscar lubricantes que no provoquen la for-

mación de ácidos corrosivos durante la operación, o en todo caso buscar las aleaciones resistentes a la corrosión.

f) Cantidad de aceite: depende del sistema de lubricación diseñado.

g) Limpieza: Se Prevé el ambiente donde va a trabajar el cojinete.

h) Dureza del eje: Cojinetes duros reclaman ejes más duros. Los cojinetes de babbitt se pueden usar con ejes de acero blando, pero cojinetes de una aleación cobre-estaño-plomo deben usarse con ejes de por lo menos 250 brinell.

Por su parte en el cojinete se debe considerar estas propiedades:

a) Resistencia a la fatiga: El cojinete está continuamente sometido a desgaste y a fatiga , los cuales son acumulativos. Conforme avanza el desgaste, el área efectiva de trabajo se va reduciendo hasta que no puede soportar más

la carga, y se produce la falla.

- b) Anti-adherencia: es la característica más importante para evitar que el cojinete se "pegue" al eje. Siempre que está cubierto con una película de lubricante, la operación es normal, pero cualquier pequeño accidente (carga muy elevada, interrupción momentánea del lubricante, etc.) puede dar lugar al roce de metal con metal, y en esta circunstancia las características de anti-adherencia son importantes para evitar que se raye o malogra completamente el cojinete y el eje.
- c) Resistencia a la compresión: es la propiedad del cojinete de soportar cargas elevadas sin peligro de sufrir extrusión.
- d) Deformabilidad: en determinados casos se puede producir desalineamiento del eje, ligeras flexiones del mismo, que someten a esfuerzos anormales los bordes del cojinete. Si éste asimila esta desalineación, evitara la falla total.

e) Resistencia a la corrosión: se pueden dar dos casos; cuando el lubricante o el medio ambiente es corrosivo, o cuando el metal del cojiente es corroíble bajo ciertas condiciones de operación.

En el primer caso puede haber ocurrido una oxidación del lubricante la cual da lugar a una producción de ácido, los cuales disuelven al estaño y al plomo y se produce la falla. Hay que recordar que la elevación de temperatura favorece estas reacciones químicas.

f) Estructura metalográfica: anteriormente se creía que la aleación de un metal de cristales duros en una matriz suave era el material ideal para cojinetes. La práctica ha demostrado que ésto nos verdad ya que en la actualidad se emplean metales puros como el estaño, plomo, aluminio, plata, y aún cobre como superficies de cojinetes. Cuando se trata de cargas elevadas y condiciones más severas, se hacen aleaciones con el metal base, el cobre por ejemplo, al cual se le añade plomo, estaño, zinc, níquel, etc. Buscando las cualida-

des descritas anteriormente para una aplicación particular.

Hay materiales que tienen propiedades de anti-fricción en un grado casi ideal, pero carecen de alguna propiedad igualmente necesaria a tal punto que no sirven para las aplicaciones prácticas. Un ejemplo de ello es el acero nitrurado, que tiene alta resistencia mecánica, resistencia al uso, al calor, a la corrosión, pero por su excesiva dureza no asimila los más pequeños desalineamientos. Por este motivo los cojinetes de materiales duros son usados únicamente en aplicaciones muy especiales.

Para seleccionar una aleación para determinada aplicación el ingeniero deberá analizar tablas de propiedades publicadas por entidades especializadas en la investigación de estas aleaciones, tal como lo propone el Cuadro del Anexo A.

El acabado de la superficie del cojinete y del eje están tomados en cuenta en las obser-

vaciones de dicho cuadro como una condición indispensable para su interpretación, y de la misma manera también para las tolerancias se dan valores límites para compensar la diferente dilatación entre el eje y el cojinetе a causa de la temperatura.

En la Tabla Nº 3 se dan a conocer las condiciones de operación y tolerancia para los materiales más comunes de cojinetes.

MATERIAL DE COJINETE	PRESION psi	VELOCIDAD fpm	TEMP. Máx. °F	TOLERANCIA DIA-METRAL (Pulg.)
Babbit al estaño	1800	4000	250	0,0023 a 0,0027
Babbit al plomo	1500	4000	270	0,0028 a 0,0035
Cobre-Plomo	3500	4000	300	0,0022 a 0,0031
Plata	4000	4000	300	0,0022 a 0,0026
Grafito	600	2500	700	0,0025 interfer.
Aluminio	4000	1500	250	0,0025 a 0,0027
Bronce	3500	1000	350	0,0020 a 0,0021

(Tomado de la Colección Metals Handbook, Vol. I, Pág. 860)

TABLA Nº 3.- CONDICIONES DE OPERACION Y TOLERANCIAS PARA LOS MATERIALES MAS COMUNES DE COJINETES.

Todas las propiedades hasta aquí enumeradas pueden ser agrupadas en dos categorías. La primera incluye las características de superficie que están representadas por la resistencia al uso, conformabilidad, compatibilidad con el eje, etc. La segunda incluye resistencias mecánicas, tales como resistencia a la fatiga y capacidad para soportar cargas. Ya que estas dos categorías son divergentes, para obtener características óptimas de superficie, se debe sacrificar la resistencia; y para tener una resistencia óptima debe sacrificarse alguna calidad de superficie.

1.3.2 Aplicación de las Aleaciones Cobre-Estaño-Plomo

Aleaciones de cobre al estaño con alto contenido de plomo son las que tienen hasta 20% de estaño, y sobre 6 % de plomo. El zinc está en cantidades inferiores al estaño, y en algunas aleaciones de este tipo está considerado como impureza. Dentro de esta clasificación se encuentra el bronce con 80% Cu - 10% Sn - 10% Pb, o sae 64, como también es conocido, el cual es objeto de la experimentación de esta tesis.

La ASTM ha clasificado a estas condiciones con la designación 3A, 3B, 3C, 3D, y 3E, y las recomienda para la fabricación de camisas de desgastes y cojinetes, señalando a las aleaciones 3A y 3D como particularmente resistentes a los ácidos suaves.

DESIGNACION ASTM	Cu	Sn	Pb	Zn
3A	80	10	10	
3B	83	7	7	3
3C	85	5	9	1
3D	78	7	15	
3E	70	5	25	

Tabla N° 4.- Composición química de las Aleaciones de Bronce al Estaño con alto contenido de Plomo.

Estos bronces tienen en general buenas propiedades de anti-fricción, durante la operación absorben partículas duras que pueden encontrarse en la corriente del lubricante evitando de esta

manera que el eje se deteriore. Además, su conductividad térmica en la superficie de trabajo es alta, con lo cual se disipa rápidamente el calor generado por cualquier motivo.

Estas aleaciones generalmente están dotadas de una microporosidad, la cual atrapa las partículas del lubricante y evita el rápido deterioro del cojinete y del eje en caso de una corta falla de lubricación.

El plomo que se halla presente en estas aleaciones, hace también de lubricante por si mismo, en especial cuando la velocidad de solidificación de la fundición de cojinete ha sido rápida. Además este metal procura cualidades anticorrosivas a estas aleaciones por lo cual las hace útiles en otras aplicaciones. Así mismo, estos bronces tienen buena maquinabilidad, permiten un rápido desbastamiento del material, un buen acabado y tolerancias finas.

Por su parte, la presencia del estaño hace al bronce más resistente a la compresión, o sea a soportar cargas elevadas. Esta propiedad varía

directamente con el contenido de estaño, y puede ser modificada por otros elementos presentes en la aleación tales como zinc, níquel y fósforo.

Es importante anotar al analizar los componentes de estos broncees que el plomo es insoluble y está finamente disperso en forma mecánica en la aleación base, desempeñando la fundición de lubricante.

1.4 ALEACION USADA PARA COJINETES DE MOLINOS DE CAÑA DE AZUCAR

Los cojinetes usados en aplicaciones tales como grandes molinos de caña, molinos de rodillos de caucho, molinos de rodillos de oleaginosas y similares están sujetos a cargas unitarias elevadas y velocidades bajas.

Para recomendar técnicamente determinada aleación para dichos cojinetes, es necesario analizar la carga máxima a la que está sometido uno de ellos.

A continuación se analizan las cargas aplicadas a un cojinete de un molino de caña auto-ajustable, marca

Fives-Lille Cail. Se ha tomado este ejemplo por haber trabajado personalmente por espacio de 10 años con este equipo del Ingenio Aztra.

Los molinos de caña de la mencionada empresa tienen una capacidad de 7000 toneladas de molienda de caña por día.

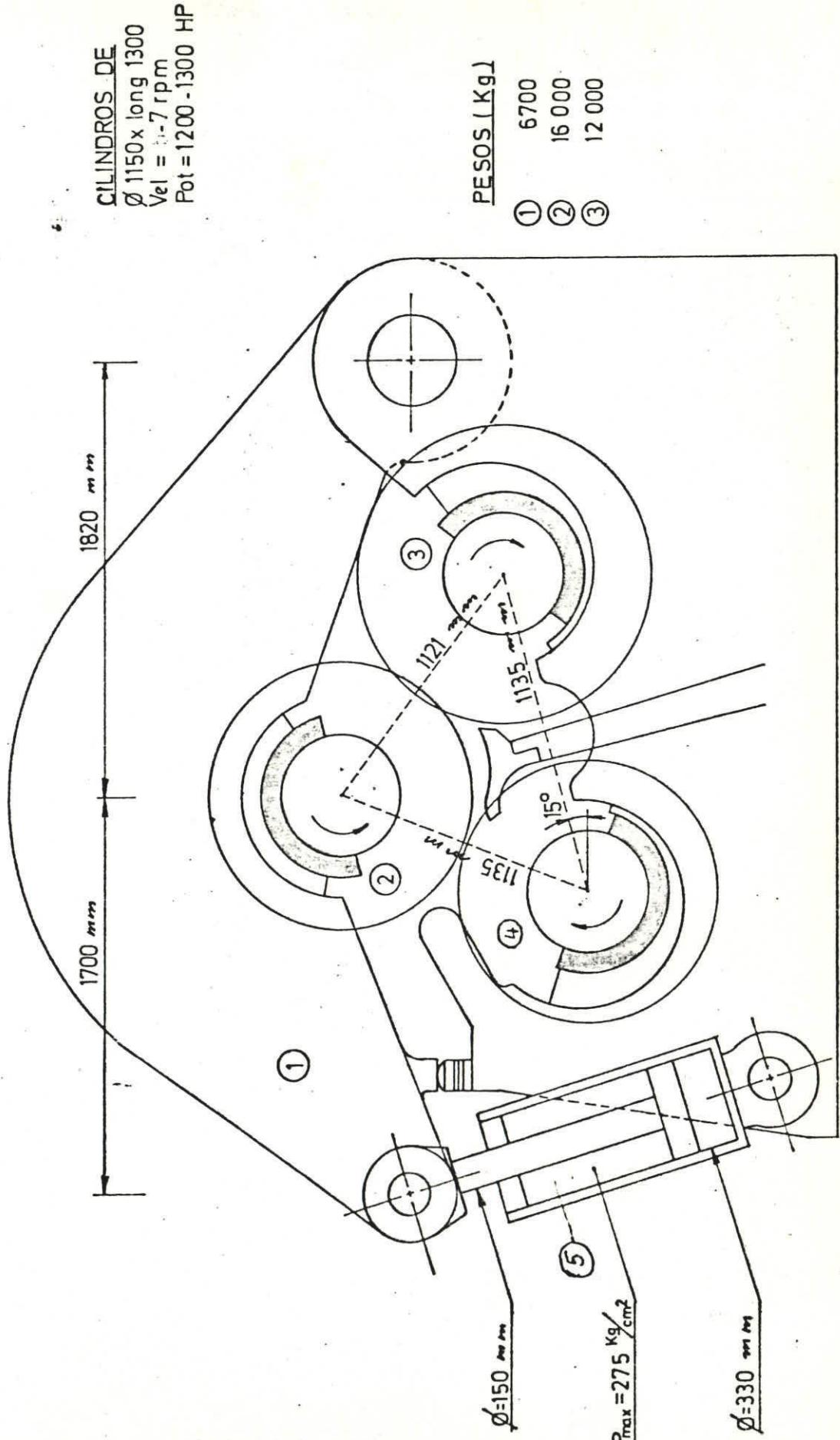
El tandem está compuesto por 5 molinos diferentes únicamente en el diámetro de los cilindros que trituran la caña y en las aberturas entre las mismas. Puede apreciarse en la Fig. N° 1, un esquema de dicho molino.

La caña picada es introducida entre los cilindros 2 y 4, los cuales giran a una velocidad promedio de 7 a 8 RPM. En el centro del molino existe un puente que permite el paso de la caña que va a ser triturada por segunda vez entre los cilindros 2 y 3. Estos cilindros están solamente a una distancia de 10 a 15 mm. entre sus circunferencias exteriores. Para tener una mayor eficiencia en la extracción de jugo de la caña se aplica una presión de 250 Kg./cm² al gato hidráulico que sujeta el soporte del cilindro superior 2.

Es de anotar que al pasar la caña entre los cilindros,

VISTA LATERAL ESOQUEMÁTICA DEL MOLINO DE CAÑA F.L.C.
 TIPO AUTO AJUSTABLE (POSICIÓN DE REPOSO)

1



el cilindro superior 2 se ve obligado a abrirse hacia arriba alrededor de 20 mm. normalmente por lo que la presión aumenta hasta los 300 Kg/cm² en el gato hidráulico.

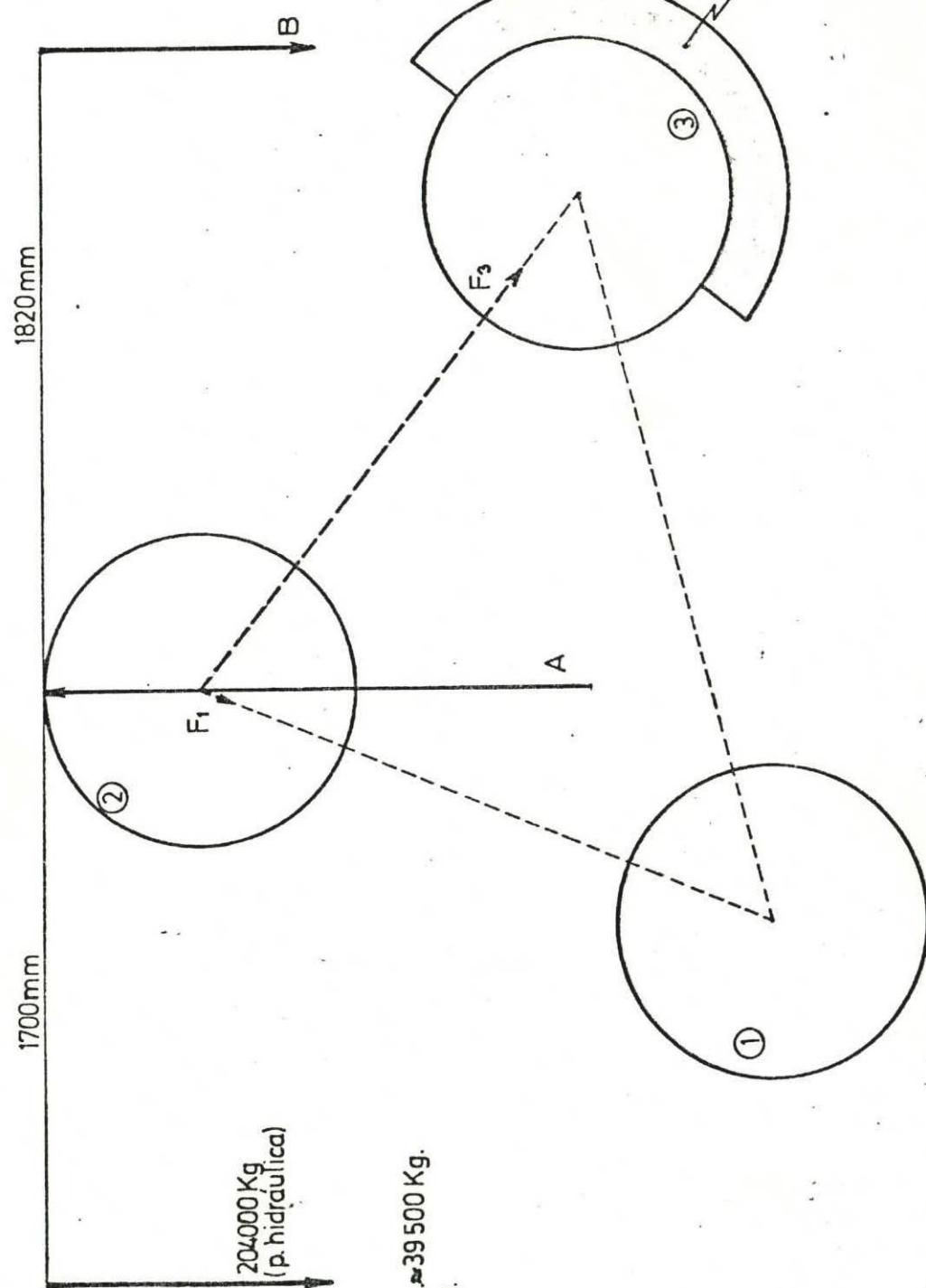
Estas consideraciones vienen al caso con la finalidad de descubrir a qué esfuerzos están sometidos los ejes de los cilindros que trituran la caña y por lo tanto los cojinetes que lo soportan.

El procedimiento a seguir será:

- a) Calcular las fuerzas ejercidas por el pistón hidráulico.
- b) Calcular la reacción (B) en el pivote del soporte del cilindro superior 1 y la fuerza (a) ejercida sobre el cilindro superior. Ver Fig. Nº 2.
- c) Calcular fuerza total F1.

Los datos presentados a continuación son tomados de la operación normal del quinto molino, en el cual se registran las condiciones más severas de trabajo.

1700 mm 1820 mm



A = 394549 Kg, 39500 Kg.
B = 190549 Kg.

$F_1 = \frac{A}{20}$
 $F_3 = 0.95 A$

a) Fuerza ejercida por el pistón hidráulico

$$\text{Diám. del pistón} = 330 \text{ mm.}$$

$$\text{Diám. del vástago} = 150 \text{ mm.}$$

Área efectiva del

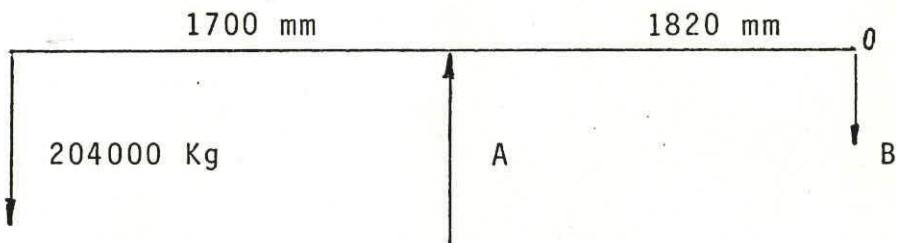
$$\text{pistón} = \pi(r_p^2 - r_v^2)$$

$$A = \pi(165^2 - 75^2) = 67858 \text{ mm}^2$$

La presión hidráulica aplicada es de 300 Kg/cm²

$$F = pA = 3 \text{ Kg/mm}^2 \times 67858 \text{ mm}^2 = 203574 \text{ Kg} \approx 204000 \text{ Kg.}$$

b) Diagrama de fuerzas



$$M_0 = 204000 (1700 + 1820) - 1820 A = 0$$

$$A = 394549 \text{ Kg}$$

$$B = 190549 \text{ Kg}$$

c) Fuerza total aplicada al cojinete:

peso del cilindro superior (x 1/2) . .	16000Kg
peso del soporte 1 del cilindro supe-	
rior .	6700 Kg
fuerza A	<u>395000 Kg</u>
TOTAL.	417700 Kg

Según Emile Hugot, considerado un estudioso de los molinos de caña de azúcar, esta carga a la que está sometida el cilindro superior, es prácticamente la misma a la que está sometido el cilindro de salida 3 del molino.

Una vez que se conoce la fuerza total ejercida sobre el cojinete, se calcula a qué presión está sometido, para lo cual se considera el área de trabajo del cojinete y la carga máxima.

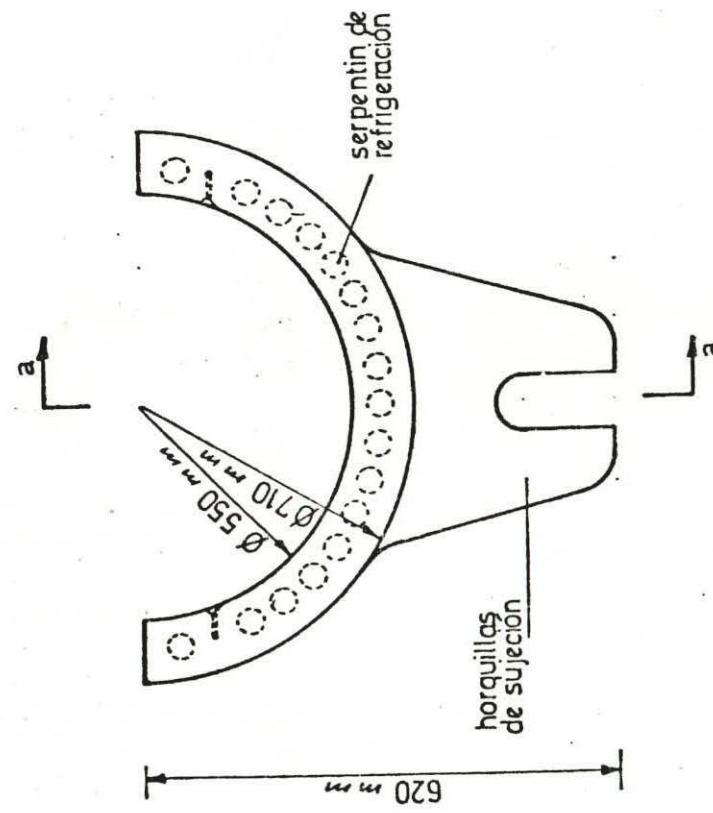
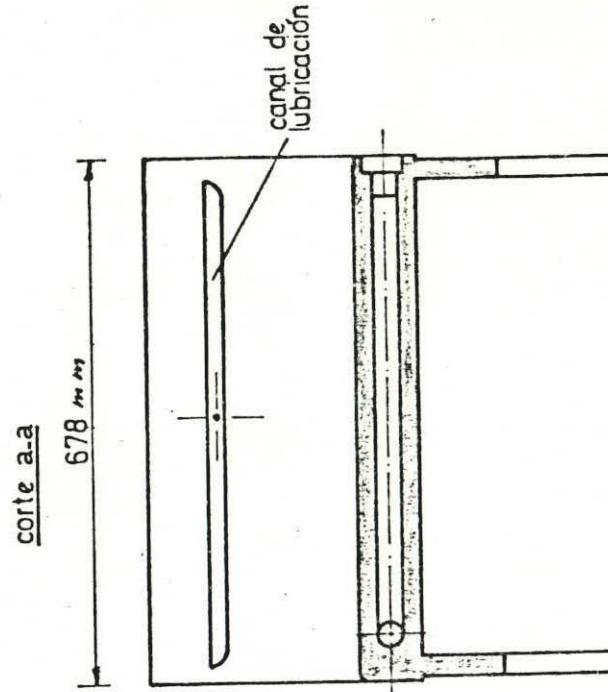
Área de trabajo del cojinete: (Ver Fig. N° 3).

$$A = \frac{\pi D L}{2}$$

$$\begin{aligned} D &= 550 \text{ mm.} \\ L &= 678 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$A = \frac{\pi (550) 678}{2} = 585749 \text{ mm}^2$$

Por diseño del cojinete, el 40% de la superficie del mismo no trabaja; por lo tanto, el área real



MATERIAL: BRONCE SAE 64
Peso: 510 kg.

del trabajo es:

$$585749 (0.6) = 351450 \text{ mm}^2$$

El fin último de todo este análisis es conocer la carga o presión máxima a que está sometido el cojinete en mención para poder establecer más adelante si las cualidades mecánicas de las aleaciones elaboradas en esta tesis permiten recomendar estos materiales para dichos cojinetes.

J. E. Shigley (4) determina un gráfico para conocer la carga máxima. (Ver Fig. N° 4).

En primer lugar debe establecerse el número caractérístico del cojinete denominado S , adimensional.

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\mu N}{P}\right) \quad (1)$$

r = radio del muñón, en m.

c = hueco radial, en m.

μ = viscosidad absoluta del lubricante, en Kg.-seg/m²

N = Velocidad relativa entre muñón y cojinete, en rps

P = Carga para unidad de área proyectada en Kg/m²

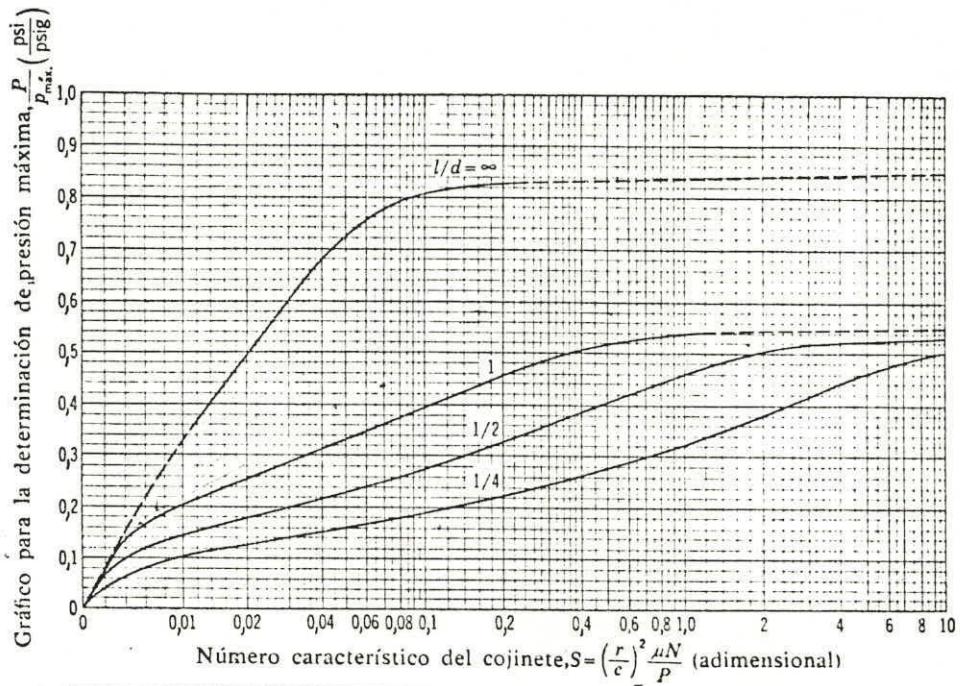


Fig. N° 4.- Gráfico para la determinación de la presión máxima en la película de lubricante.

(Tomado de J.E. Shigley, El Proyecto en Ingeniería Mecánica, Pág. 369).

Para el presente caso:

$$r = 0.275 \text{ m.}$$

$$c = 0.0001 \text{ m.}$$

$$N = 8 \text{ rpm} = 0.133 \text{ rps}$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{417700}{0,35145} = 1188504 \text{ Kg/m}^2$$

Para hallar μ en Kg-seg/m^2

El lubricante recomendado para este caso es de 400 SUS

Sabemos que:

$$\mu = \frac{Z}{6.9 \times 10^6} \quad (2)$$

μ está en Reyms

Z en Centipoises

$$\text{A su vez } Z = p(0.22 t - \frac{180}{t})$$

p = densidad relativa del lubricante = 0.94

t = segundos Say Bolt Universals

$$Z = 0.94 (0.22 \times 400 - \frac{180}{400}) = 83,2 \text{ centipoises}$$

$$\text{luego } \mu = \frac{83.2}{6.9 \times 10^6} = 12 \times 10^{-6} \text{ reyms}$$

$$= 12 \times 10^{-6} \times \frac{1}{0.001422} = 0.00843 \frac{\text{Kg-seg}}{\text{m}}$$

Sustituyendo este valor en (1):

$$S = \left(\frac{0.275}{0.0001}\right)^2 \frac{0.00843 (0.133)}{1188504} = 0.00693$$

Para ubicar la curva en el gráfico de Shigley:

$$\frac{L}{d} = \frac{678}{550} = 1.23$$

Del Gráfico:

$$\frac{P}{P_{\max}} = 0.20$$

$$P_{\max} = \frac{P}{0.20} = \frac{1188504}{0.20} = 5942520 \text{ Kg/m}^2$$

o sea, aproximadamente 6 Kg/mm² (8500 Psi).

Ver Fig. Nº 5.

Este valor de la presión máxima aplicada a la línea central del cojinete como se puede ver en la Fig. Nº 5 servirá para calificar a los bronces una vez que se los someta a pruebas de tracción y compresión.

Bastaría analizar el cuadro de propiedades de los bronces más usados como cojinetes, para concluir que los

16000Kg

6700Kg

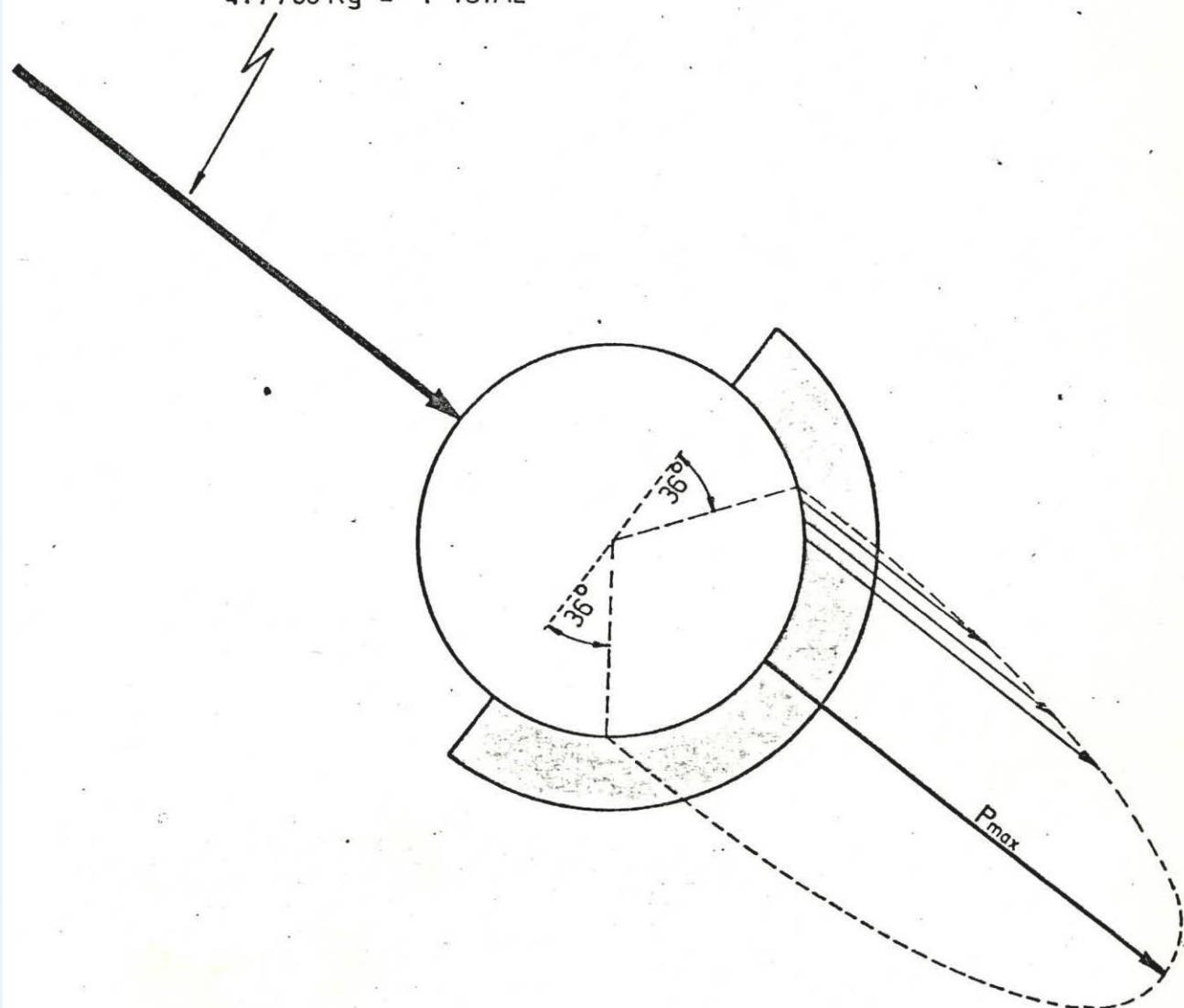
395 000 Kg

417700 Kg = F TOTAL

POR EL PESO DEL CILINDRO SUPERIOR

POR EL PESO DEL SOPORTE DEL CILINDRO SUPERIOR

POR F_3



$$r = 275 \text{ mm}$$

$$\text{l.cojinetes} = 678 \text{ mm}$$

$$P_{\max} = 5.95 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{AREA DE TRABAJO} = \frac{\pi D l}{2} \times 0.6 = 3514.50 \text{ mm}^2$$

FIGURA N°

recomendados técnicamente para este caso son el bronce SAE 64, y el bronce SAE 660.

La Sociedad de Fundidores Americanos publica en el Libro Copper Base Alloys Foundry Practice, la siguiente Tabla de composición química, dureza Brinell y resistencia compresiva a la fluencia, de los principales bronces usados para la elaboración de cojinetes:

Bronces con plomo en orden decreciente del plomo	Especificación	Composic. Química				Dureza Brinell	Resistencia compresiva a la fluencia Lb/Pulg ²
		Cu	Sn	Pb	Zn		
Bronces al estaño con plomo	AMS 4840	70	5	25		48	14000
	SAE 67	78	7	15		55	16000
	SAE 64	80	10	10		63	20000
	SAE 660	83	7	7	3	60	21000
	SAE 40	85	5	5	5	60	16000
Bronces al estaño	SAE 63	88	10	2		70	32000
	SAE 62	88	10	0	2	65	26000
Bronces al Aluminio	SAE 620	88	8	0	4	68	25000
	ASTM 9C	88	(Fe) 4	(Al) 11		195	31000

(Tomado de Copper-Base Alloys Foundry Practice, III Ed., pág. 186)

Tabla N° 5.- Propiedades Físicas y Composición Química de Bronces para Cojinetes.

En particular, en el rango inferior de velocidades, y con cargas de alrededor de 2000 psi, los cojinetes de la aleación 80/10/10 trabajarán eficientemente, sin necesidad de que sean herméticos y lubricados hidrodinámicamente, a pesar de que lo ideal es que siempre se cumplan con estas dos condiciones para prever esporádicas fallas por impurezas en la lubricación o elevación de temperatura.

La generación del calor entre el eje y el cojinete, la disipación del mismo, la temperatura ambiente, y el lubricante influyen en la temperatura de operación del cojinete. La disipación del calor generado debe ser tomada en cuenta en el diseño del equipo que trabaja con los cojinetes señalados.

La aleación SAE 64 ú 80/10/10 puede ser usada como material para cojinetes que alcanzan temperaturas próximas 315°C. Tiene además, excelente resistencia a la fatiga.

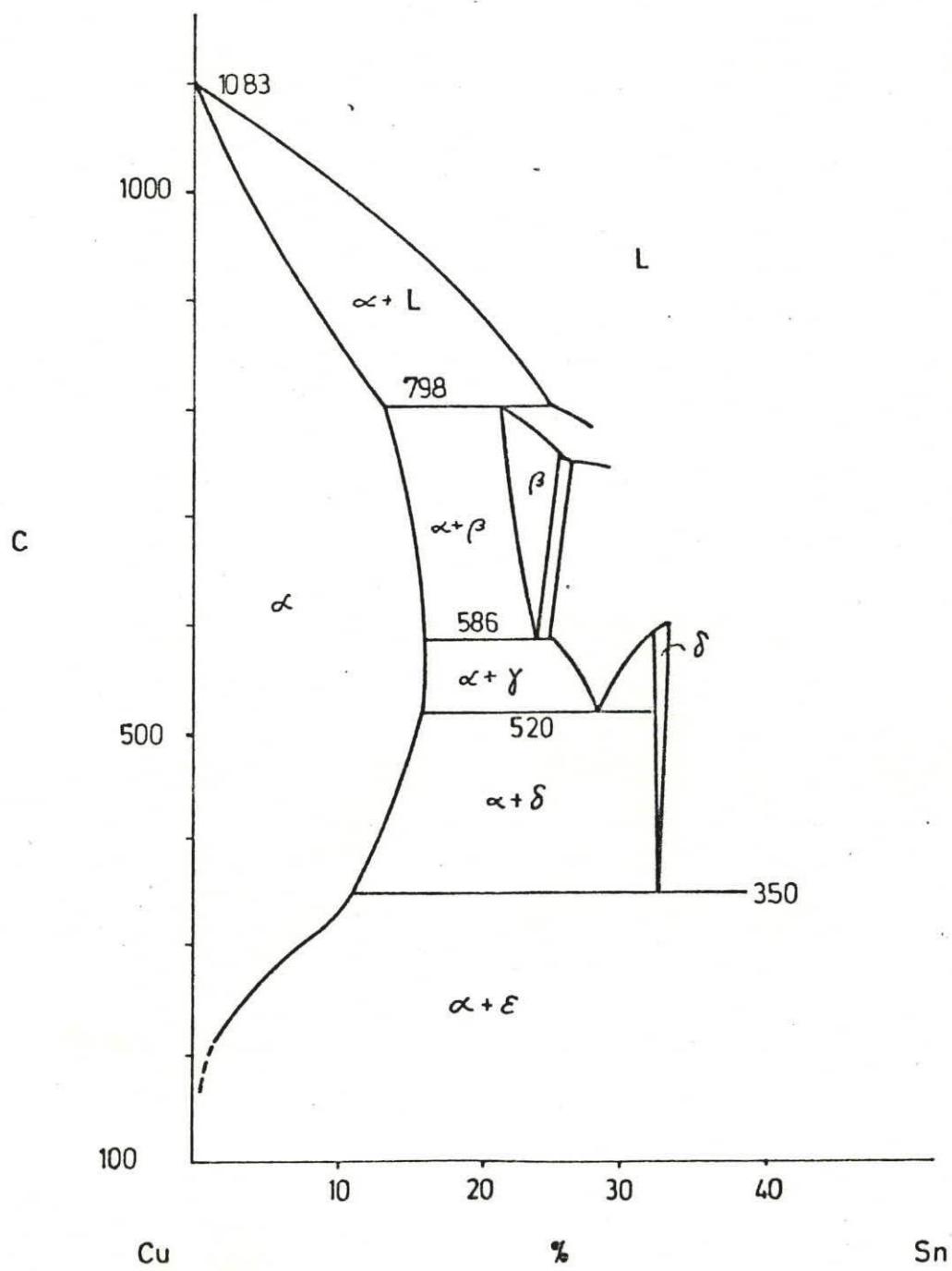
CAPITULO II

LA FUNDICION DE BRONCE AL ESTAÑO CON ALTO CONTENIDO DE PLOMO

2.1 METALURGIA DE LA FUNDICION

Una de las maneras para determinar las características de las aleaciones en cuanto a sus reacciones en estado sólido y fases presentes es a través de los diagramas de fase o diagramas de equilibrio. Para este propósito, éstos pueden ser considerados simplemente como gráficos que muestran como la estructura del cobre se transforma a medida que se añaden cantidades diferentes del elemento de aleación, dando al metal base una combinación de propiedades. La estructura cambia también con la temperatura. Ver Fig. N° 6, la cual identifica el diagrama de equilibrio cobre-estaño.

Del gráfico se deduce que hay solubilidad de la fase alfa por encima del 13.% durante la solidificación. A temperatura más baja aparece el eutectoide alfa + delta.



FIGURANº

6

La fase alfa es una solución sólida de estaño en cobre, y su característica mecánica es la de ser suave, pero la fase delta es excesivamente dura y frágil. Las aleaciones que contienen del 5 al 15% Sn, tienen un rango sumamente amplio de temperatura de solidificación por encima de los 200°C.

Debido a este largo tiempo de solidificación, se produce mucha segregación, y por ésto hay aleaciones de contenido tan bajo como 7 % de Sn, que contienen fase delta y muestran el eutectoide alfa + delta aunque el diagrama de equilibrio no indica este hecho.

Las fundiciones en arena de más de 10% de Sn, necesitan tratamiento térmico para eliminar el eutectoide alfa + delta. Todas las aleaciones comerciales tienen esta fase, dependiendo ésto de la cantidad de estaño, y en menor grado de la rapidez de enfriamiento.

Las aleaciones del Cobre, están limitadas a un contenido máximo de estaño, más bajo que el de zinc, ya que la fragilidad toma cuerpo con cantidades más crecientes de la fase delta, ésto hace que el estaño, sea más efectivo que el zinc, para reforzar al cobre. En efecto, los broncees al estaño tienen cualidades de re-

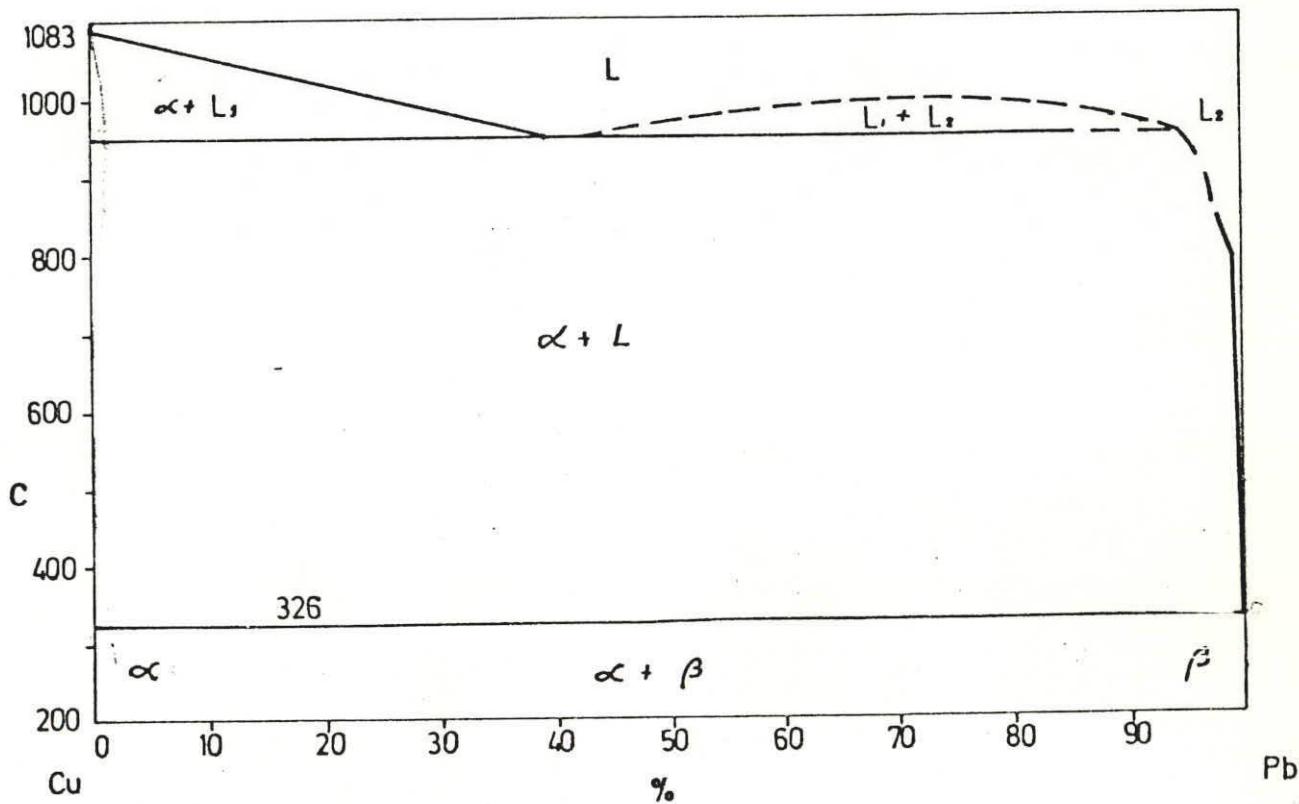
sistencia, dureza, fricción, lo cual los hace útiles en la industria para la fabricación de tornillos sin-fin, ruedas dentadas, camisas, etc.

El plomo es añadido a los broncees al estaño para hacerlos más maquinables o mejorar sus cualidades de anti-fricción. Así los broncees al estaño, con alto contenido de plomo son muy usados en general donde se necesitan buenas cualidades de cojinetes que deben trabajar contra aceros duros, (300 Bhn).

Diagrama de Fase Cobre-Plomo

La solubilidad sólida del plomo en el cobre, está entre el 0.002 al 0.005 % a temperatura ambiente. Por tanto, al plomo se lo encuentra en el cobre formando islas de este metal dentro de la microestructura. Debido a que el plomo precipita tardíamente durante el enfriamiento del metal se segregan en áreas que solidifican al final. Ver Fig. Nº 7.

Al terminar la solidificación, el plomo llena áreas que de otra manera resultarían porosas por enfriamiento. De esta manera el plomo garantiza la impermeabilidad de fundiciones para cuerpos de válvulas por ejemplo.



FIGURAN°

7

Según el diagrama, el líquido rico en cobre, comienza a formarse tan pronto la temperatura cae por debajo de la temperatura de líquido. Siendo L_1 de una alta densidad, puede separarse como manchas en la colada y en la fundición. Luego, tan pronto como la temperatura cae por debajo de 935°C , la fase L_2 se hace presente; ésta contiene más del 90% de Pb y por este motivo se va al fondo, si es que no se ha previsto este fenómeno.

Por este comportamiento del plomo en el cobre, las aleaciones deben ser siempre calentadas adecuadamente para garantizar la solución en la colada y no permitir la segregación del plomo durante el enfriamiento inevitable en las cucharas de vaciado. En algunos casos se aconseja la práctica de la agitación del metal.

La distribución de las manchas de plomo, depende de:

- El contenido de plomo
- La rapidez de solidificación de la fundición
- La presencia de otros elementos

El plomo que logra segregarse en una fundición, de

cualquier forma que sea, confiere a la aleación propiedades mecánicas deficientes.

Proceso de Fusión

La fusión de estas aleaciones comienza a los 327°C, que es la temperatura de fusión del Pb. Durante el proceso el Pb debe entrar en solución en el Cu. Para conseguir ésto, el metal debe ser llevado a una alta temperatura de 1200 a 1300°C, aunque no siempre el metal debe ser vaciado a estas temperaturas. En general se puede establecer que conforme aumenta el contenido de Sn en una aleación hay que elevar la temperatura antes del vaciado. Al mismo tiempo conviene saber que es perjudicial elevar la temperatura más de lo señalado, ya que ésto facilita la absorción del O, del H, del SO₂ y otros gases que se forman en los combustibles empleados.

La temperatura del vaciado no se la puede precisar, - pues esto depende de la naturaleza del molde y el tamaño de la fundición. En la práctica se puede señalar como temperatura mínima de vaciado 1010°C, aunque el promedio está entre 1120 y 1150°C.

Lo ideal sería escoger una temperatura que garantice la homogeneidad de la aleación, y conseguir que la solidificación sea rápida.

Como se habrá notado se insiste mucho en la rapidez de las operaciones durante la fundición del bronce, ya que además de la economía del combustible, se preserva al metal de un posible deterioro.

Durante el proceso de convertir los metales sólidos en líquidos en el proceso de fusión, pueden ocurrir muchos fenómenos indeseables que afectan a la pieza fundida. Aquí se indica la técnica a seguir para obtener un buen resultado.

- a) Se calienta el crisol hasta el rojo cerezo y se coloca en la base del mismo aún vacío de 0.2 a 0.3% del fundente, ya sea en bloque o en polvo.
- b) Se cargan los lingotes y chatarra de cobre previamente pesados. Se ajusta las válvulas del combustible y el aire del quemador, de tal manera que salga una pequeña llama ligeramente verde en el horno; ésto indica que sobre la colada hay condiciones oxidantes. Se cargan los lingotes de estaño y de

plomo previamente precalentados a 200°C.

- c) Se funde lo más rápidamente hasta la temperatura de vaciado. Durante este proceso el fundente genera gases oxidantes, los cuales se combinan con el hidrógeno y lo eliminan del metal. Cuando la carga está fundida se debe chequear la temperatura del metal con un pirómetro. Se recaliente lo necesario la colada para compensar la caída de temperatura durante el escoriado y otras operaciones antes del vaciado.
- d) Inmediatamente antes de vaciar hay que sumergir tubos desoxidantes, o fósfuro de cobre. Esto tiene por objeto dejar una cantidad residual mínima de 0.02 de fósforo, lo cual asegura una fluidez máxima y una adecuada desoxidación. En la práctica se hunde un tubo desoxidante DS 3 por cada 100 lbs. de metal se lo mantiene durante 5 segundos y se agita.
- e) Se añade una pequeña cantidad de arena silícea a la capa de fundente para aglutinar la escoria. Se saca la escoria con una herramienta desnatante, raspando cualquier escoria que esté pegada a los lados del crisol. Se vacía sin pérdida de tiempo una vez que

se llegó a la temperatura correcta.

Recomendaciones Prácticas:

- Mantenga siempre una atmósfera oxidante
- No se debe mantener el bronce fundido por largo tiempo; los moldes deben estar completamente listos al momento del vaciado.
- Todas las herramientas hay que revestirlas con FIRIT 20 para evitar la contaminación de la colada con el hierro
- Se recomienda el uso de pintura refractaria para recubrir la superficie de los moldes y obtener un buen acabado en la pieza fundida.
- Los moldes pueden ser hechos de arena en verde, usando una arena de grano medio con un contenido de arcilla del 12%. El molde puede ser endurecido con dióxido de carbono o a la estufa a 200°C.

Reacción Molde-Metal

Al entrar el metal líquido en el molde se forma una atmósfera de vapor, la cual oxida el metal superficialmente. Esta película es impermeable y muchas veces evita que la reacción continúe. Al formarse el

óxido superficialmente, queda libre el hidrógeno el cual es muy activo y puede entrar en solución, a menos que la capa de óxido no permita al hidrógeno introducirse.

Para evitar cualquier reacción molde-metal la aleación debe estar libre de gases antes del vaciado y las paredes del molde deben recubrirse con pintura refractaria.

2.2 EQUIPOS DE FUSION Y COLADO

La función de un horno de fundición es el suministro del metal derretido, con cualidades satisfactorias, a la temperatura que se requiera y al menor costo posible. En la fundición de bronce, la amplia variedad de aleaciones producidas hace prácticamente imposible señalar un solo tipo de horno que satisfaga al mismo tiempo los requerimientos técnicos y económicos. La selección de un horno depende sobre todo del costo del combustible o de la energía eléctrica, y del volumen del metal a ser fundido.

Para la fundición de metales no ferrosos en general, se usan en la actualidad:

- a) Hornos eléctricos de inducción: generalmente usados para fundiciones de alta producción. Pueden ser de uno o dos canales.
- b) Hornos eléctricos de arco indirecto: requieren de mucha supervisión.
- c) Hornos de combustible: estacionario, basculante y de llama abierta.

Los hornos más conocidos son los de crisol basculantes y estacionarios. Los primeros son usados para fundir aleaciones similares o iguales cada vez. Los hornos estacionarios son más prácticos cuando se necesita continuamente el cambio de crisoles por tener que fundir aleaciones de composición diferente. El tamaño del crisol debe estar acorde con el volumen del material fundido. Por regla general, el horno basculante se usa para crisoles del Nº 125 en adelante; los estacionarios con crisoles más pequeños. El consumo de combustible por libra de metal fundido es ligeramente mayor en hornos grandes que en los pequeños.

EQUIPO DE COLADO

Las cualidades de un bronce con alto contenido de plomo

mo para cojinete mejoran cuando se consigue una dispersión fina y uniforme del plomo en la aleación base. Este objetivo y otros se consiguen centrifugando la colada mientras es vaciada en el molde.

El procedimiento de centrifugación de la colada fue patentado en 1809 por un fundidor inglés, pero recién en 1910 se resolvieron en Alemania los problemas para poder llevar a la práctica real el invento. El investigador francés De Lavaud fue el autor de la máquina para colada por centrifugación, tal como se la conoce hoy, y por ésto, dicho método lleva su nombre.

Este consiste en vaciar la colada en moldes en rotación. Este puede girar vertical u horizontalmente. Mientras el metal derretido es vaciado se va formando una pared uniforme adherida al molde y mantenida en su sitio por la fuerza centrífuga, quedando al centro un hueco cilíndrico concéntrico con la circunferencia interior del molde.

Hay ventajas inherentes al hecho mismo de centrifugar la colada:

- a) La fundición centrífuga por si misma se enfriá y se

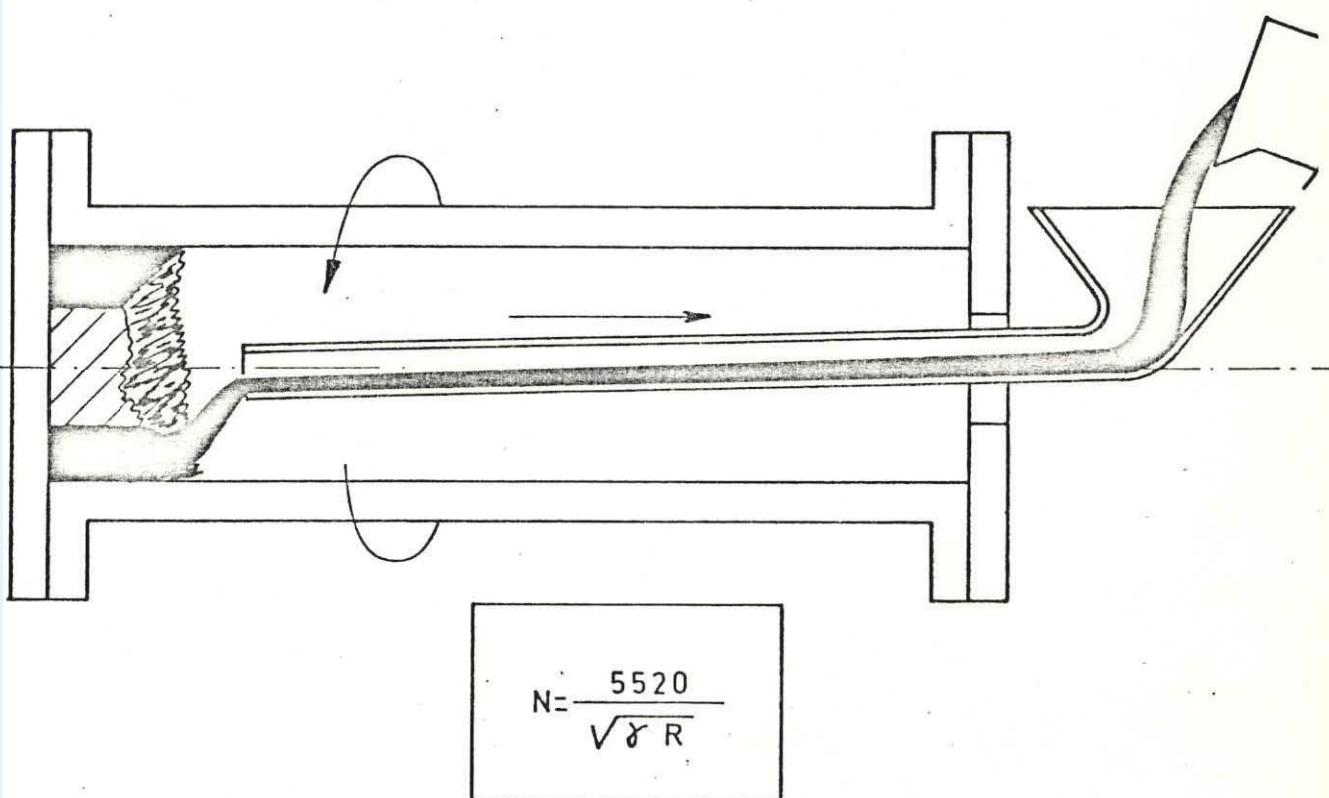
solidifica progresivamente.

- b) La escoria se recoge al centro de la pieza fundida.
- c) El proceso desarrolla presiones internas altas, que compactan el material y lo liberan de porosidades.
- d) Adaptando al proceso un sistema de enfriamiento con agua, la calidad, uniformidad y finura de grano de bronce son óptimos.
- e) Este proceso permite bajas temperaturas de vaciado porque se puede llenar el molde rápidamente, lo cual minimiza la absorción de gases de la atmósfera del horno.

De acuerdo a la posición del eje de rotación, la fundición centrífuga puede ser de eje horizontal o de eje vertical, dependiendo ésto de la geometría de la pieza a fundir.

Para hacer tubos de bronce, cojinetes más bien largos o piezas parecidas, es conveniente fundir en moldes centrífugos de eje horizontal. Ver Fig. N° 8.

1º TIPO : EJE DE ROTACION HORIZONTAL



N = RPM

γ = Peso específico de la aleación en g/cm³

R = Radio interior de la pieza en cm.

FIGURA N°

8

Para pieza de poca altura, como coronas dentadas, cojinete de gran diámetro y poca longitud, y piezas más bien pequeñas se usa la centrifugación de eje vertical.

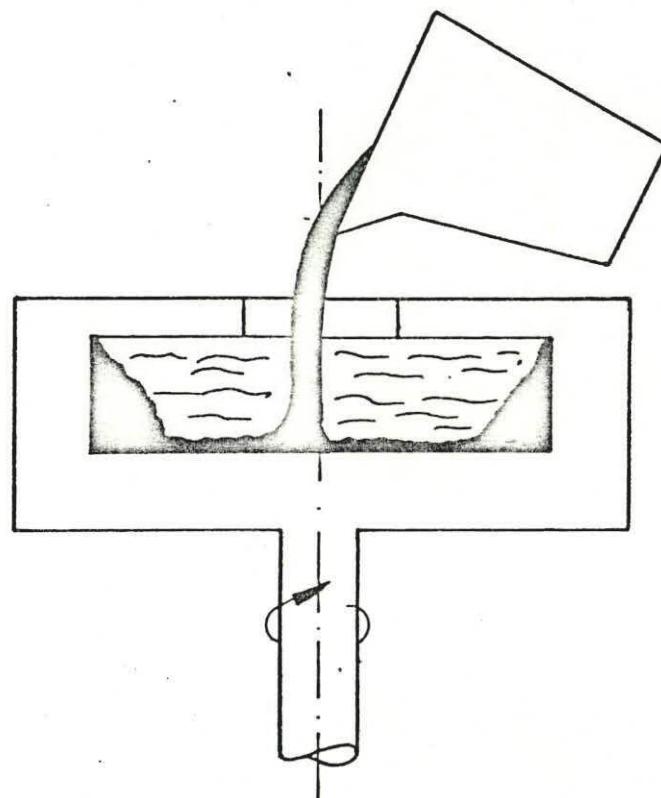
Ver. Fig. N° 9.

2.3 MATERIALES ADICIONALES DE LA FUNDICION

Es muy frecuente la porosidad de los broncees por la reacción del hidrógeno con el óxido cuproso, Cu₂O, la cual produce vapores. Para evitar ésto hay que provocar una atmósfera oxidante sobre la colada, lo cual se logra mediante el uso de fósforo-cobre al 15%. A éste se le coloca ya sea en polvo o en bloques, en un porcentaje del 0.05% en la base del crisol precalentado, seguido por la carga. Cuando empieza a fundir el metal, se forman gases oxidantes que burbujean a través del mismo. Cerca del último paso de fusión, el bloque o polvo se funde y sube a la superficie formando de esta manera una capa protectora. Antes de vaciar, el fundente se debe escoriar y cualquier exceso de oxígeno se eliminará mediante tubos desoxidantes. Esta técnica se llama oxidación-reducción y es la más sencilla y aconsejable para las aleaciones de bronce.

Al efecto el uso de Cuprex de Foseco es de fácil apli-

2º TIPO EJE DE ROTACION VERTICAL



$$N = \frac{5520}{\sqrt{\gamma R}}$$

N = RPM

γ = Peso específico de la aleación en g/cm³

R = Radio interior de la pieza en cm.

cación, y aparte de eliminar gases y formar una capa protectora, limpia el metal de impurezas y mejora la calidad de la fundición la cual sale muy sólida.

Para la desoxidación se utilizan los tubos DS de Foseco, como ya se explicó en el proceso de fusión para separar los óxidos reductibles de las coladas.

Hay otros productos que ocasionalmente se usan en la fundición de las aleaciones de bronce:

- SLAX 20 para facilitar el espesamiento de la escoria.
- LOGAS 50 para desgasificar coladas para piezas de alta calidad.
- REGENEX cuando la chatarra está sucia o con aceite.
- FIRIT 20 para revestir las herramientas y evitar la contaminación de la colada.
- MOLDCOTE para revestir superficialmente los moldes.

Así mismo, la ESPOL dispone de herramientas de precisión para este tipo de experiencia: Termocuplas de

rango bastante reducido y preciso con su respectivo registrador, balanza de precisión, pirómetros ópticos, herramientas manuales e implementos de seguridad. Ver Fig. N° 9.

Para la experimentación se contó con la ayuda física muy valiosa de varios estudiantes de cursos superiores de la ESPOL, interesados en la investigación científica.

CAPITULO III

EXPERIMENTACION

Introducción

El objetivo de esta tesis es hacer transferencia de tecnología en la fusión de bronce utilizados en los cojinetes de bajas velocidades y cargas elevadas. Esta parte experimental es la más importante porque en ella se describen las experiencias de fusión y ensayos de laboratorio para control, a fin de evaluar los materiales producidos, y establecer si cumplen los requerimientos que exige la aplicación presente.

Gracias a la colaboración del personal del área metal-mecánica de la Escuela Politécnica, se pueden considerar exitosos los resultados de estas experiencias, si se piensa que la técnica de la fundición centrífugada de bronce para cojinetes es un tanto desconocida al mismo tiempo que necesaria para el País. Se debe señalar que en el presente trabajo hubo una limitación insalvable, cual es la de disponer de un solo cilindro centrífugo, por lo

cual obligadamente había que hacer solo un cojinete por cada colada.

3.1 TECNOLOGIA DE LA FUNDICION 80 Cu - 10 Sn - 10 Pb

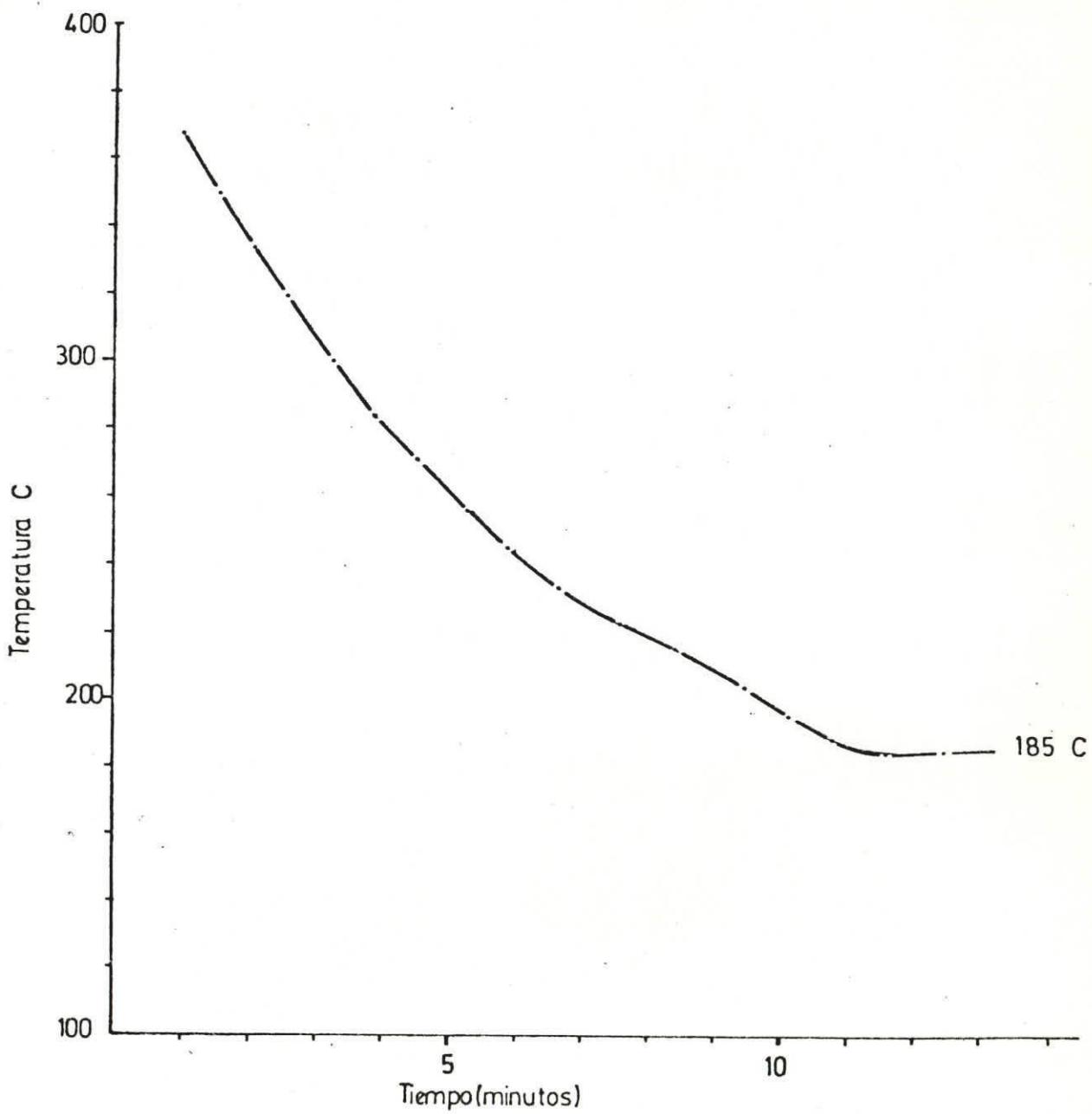
3.1.1 Experiencia Previa en Horno de Laboratorio

Antes de fundir directamente en el horno de crisol de 150 Kg del taller de Fundición de la ES-POL, se procedió a utilizar un crisol Nº 3 del Laboratorio para hacer 3,5 Kg aproximadamente de la mencionada aleación.

Se pesaron 3 Kg de chatarra de cobre en alambre de conductor eléctrico.

De los componentes estaño y plomo se disponía una aleación de porcentajes desconocidos de cada componente. Se procedió a fundir una pequeña cantidad de la misma, para luego mediante la observación de la temperatura de solidificación de dicho metal, reconocer por el diagrama de fase estaño-plomo los porcentajes de cada uno de ellos. Esto dió por resultado una solidificación tipo eutéctica. Ver Fig. Nº 10.

GRADO COMERCIAL DE LA ALEACION
60% Pb 40% Sn



Las temperaturas fueron tomadas cada medio minuto con una termocupla tipo K, conectada a un medidor electrónico de temperatura. De la curva resultante se dedujo que la aleación era eutéctica (40% Sn/60% Pb). Ver Anexo B.

Se pesó 0.75 Kg de esta aleación, 35 g de Cuprex y juntamente con el cobre pesado anteriormente se fundió en el pequeño crisol dentro del horno del Laboratorio. Al momento de vaciar la colada en el molde se sumergió un tubo desoxidante DS.

Esta práctica se hizo con la finalidad de probar los instrumentos y materiales a utilizarse en las fundiciones en el horno basculante de crisol del taller de fundición de la ESPOL.

3.1.2 Técnica del Trabajo

Para la elaboración del bronce objeto de este trabajo, se utilizó el equipo adquirido por la ESPOL, que no había trabajado aún; se trata de un horno de crisol con capacidad de 150 Kg con quemador a kerosene. Ver Fig. N° 11.

Se procedió a la instalación del ventilador, quemador, tanques de combustible y accesorios. Una vez ensayado sin carga se pudo comprobar que, con el motor de 7 HP 3600 RPM, puede alcanzar temperaturas de alrededor de 1400°C con dicho combustible en un tiempo aproximado de 25 minutos, a partir de la temperatura ambiente.

Materias Primas

En el mercado local se adquirió cobre en chatarra de alambre grueso de conductores eléctricos en un 80% mezclado con platinas de bobinas y pedazos de planchas de cobre electrolítico. Además se logró conseguir estaño y plomo en forma de metales puros, desechando el material eutéctico estaño-plomo, ya que presentaba incomodidades para el uso.

Como paso preliminar se procedió a hacer lingotes de la chatarra de cobre, proceso en el que se perdió un 8.7 del material, pero que luego proporciona ventajas tecnológicas en la fusión de la aleación. Los lingotes resultantes fueron distribuidos en tres grupos para la elabora-

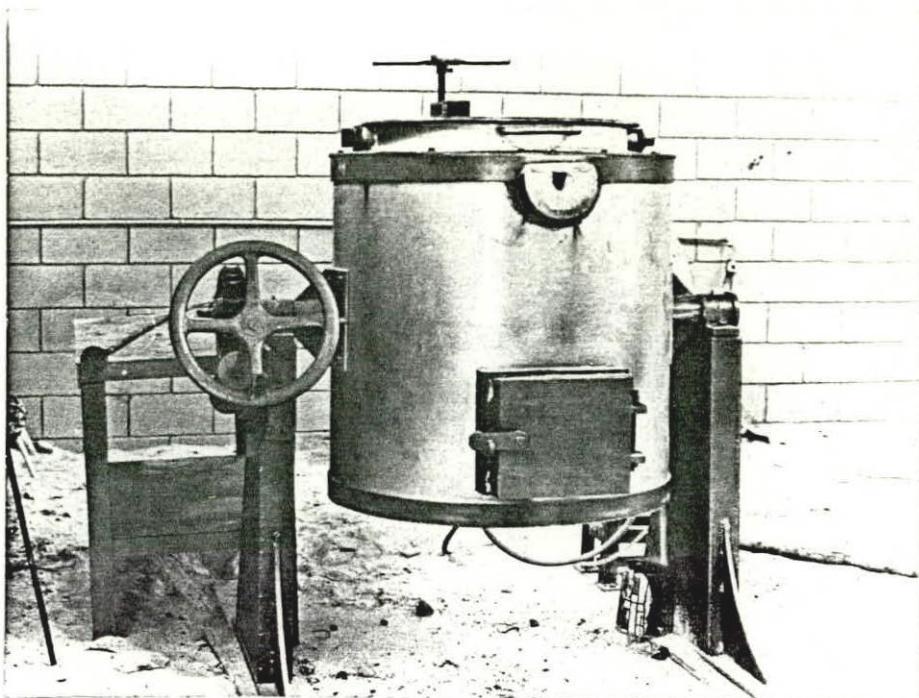


Fig. N° 11.- Horno Basculante de crisol a kerosene para elaboración de bronce de la ESPOL, utilizado para el presente trabajo.



Fig. N° 12.- Equipo de seguridad e instrumentos para el pesaje, control de temperatura y operación.

ción de tres cojinetes de bronce centrifugado, como se indica a continuación:

<u>Materiales</u>	<u>1a. exp.</u>	<u>2a. exp.</u>	<u>3a. exp.</u>
Cu (Kg)	20.5	23.2	21.4
Sn (Kg)	2.56	2.9	2.7
Pb (Kg)	2.56	2.9	2.7
TOTAL (Kg)	25.62	29.0	26.8

Preparación del Equipo

Para la fundición de los cuatro cojinetes elaborados en esta tesis se escogieron cuatro días diferentes con un lapso de por lo menos tres días entre sí, para tener tiempo de preparar los materiales, el horno, la centrífuga, los instrumentos y dar aviso al personal.

Las dimensiones de los moldes preparados, así como también de los cojinetes fundidos se dan en las Figs. 12 y 13. Como allí se indica, en la parte posterior del cilindro se compactó arena, y en cada colada sucesiva se fundió un cojiente más largo que el anterior, a excepción de la

segunda en la que se quiso hacer la prueba de fundir directamente en el cilindro recubierto únicamente por pintura refractaria.

Se trató de seguir fielmente en todo momento la tecnología descrita en el Capítulo II. Para determinar si la atmósfera sobre la colada es ligeramente oxigenada se utilizó el método del zinc. Se sostiene un pequeño pedazo de zinc virgen sobre la llama, justamente encima de la superficie de la colada, durante 5 segundos. Si el zinc se vuelve negro los gases de combustión son altamente reductores; si en cambio, toma un color pajizo o ligeramente gris, son poco reductores; si no cambia de color, son oxidantes.

Antes de poner en marcha el horno se alistó el material y la centrífuga, y en estas condiciones se pudo promediar el tiempo empleado en la fundición de 25 Kg de material, así:

- a) Prender el horno con calentamiento del crisol hasta el rojo cerezo, 30 minutos.

- b) Introducción del fundente y el material a la

temperatura ambiente hasta la fusión de todo el metal, 25 minutos.

c) El metal alcanza entre 1280 y 1300°C, en 15 minutos.

Al crisol se evitó cambios bruscos de temperatura, cosa necesaria para prolongar la vida del mismo.

Se utilizó el Fundente Cuprex de Foseco en una dosis de 0.8 a 1% con relación al peso de la carga metálica, y en las cucharas de vaciado se introdujo tubos desoxidantes DS 2 de la misma firma, cuya recomendación es usar uno por cada 50 libras de metal.

Durante la operación se tuvo muy presente la seguridad del personal y del equipo.

3.1.3 Equipo de Colado

La ESPOL dispone de un equipo de centrifugación de eje horizontal construido bajo la dirección del Ing. Alberto Torres, en los talleres de la

Escuela. Ver Figs. Nº 13 y 14.

La fórmula que se aplica para hallar la velocidad del cilindro la da el científico soviético L. Konstantinov.

$$N = \frac{5520}{\sqrt{\gamma r}}$$

N, revoluciones por minuto

γ , peso específico de la aleación en g/cm³, 9 en este caso.

r, radio interior de la pieza en cm, aquí 3 cm

$$N = \frac{5520}{\sqrt{9(3)}} = 1062 \text{ RPM}$$

El motor de la centrífuga es de 2700 RPM con una polea de 80 mm. de diámetro primitivo. Por tanto:

$$\text{Diámetro polea cilindro} = \frac{2700 \times 80}{1062} = 203 \text{ mm.}$$

Se colocó una polea de 200 mm. de diámetro primitivo.

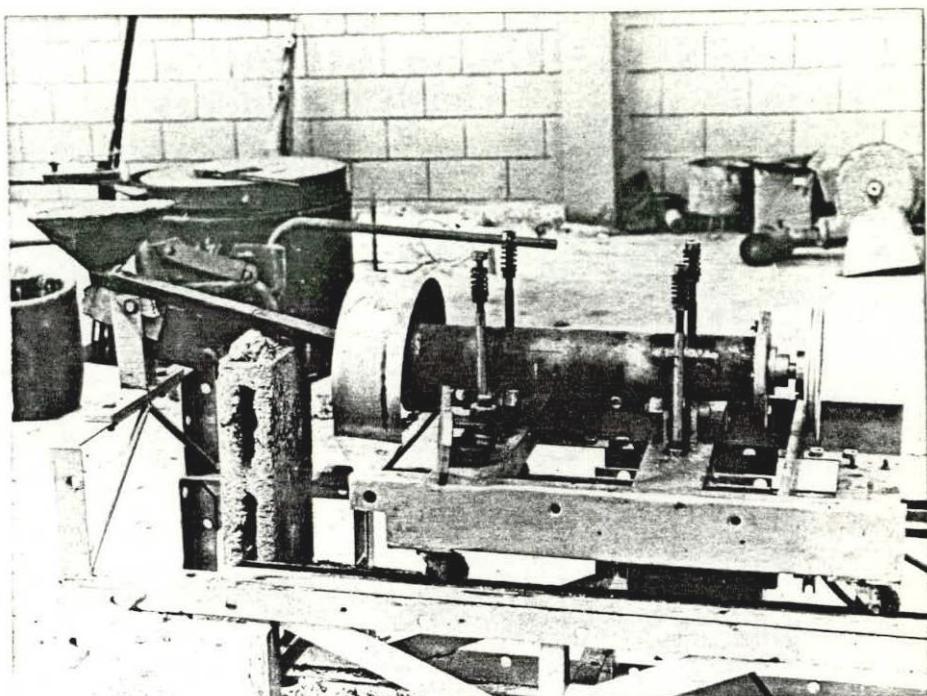


Fig. N° 13.- Molde Centrífugo de eje horizontal de la ESPOL, utilizado para las pruebas de la presente Tesis. (Vista lateral).

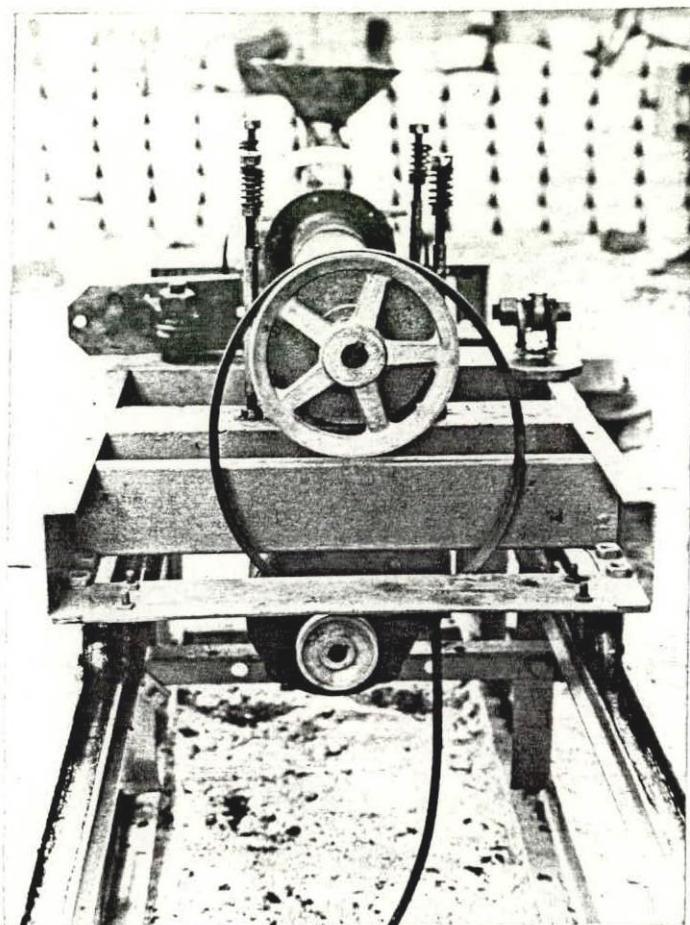


Fig. N° 14.- Vista Frontal del Molde
Centrífugo.

Luego que se tuvo el equipo listo se programaron las sesiones de fundición.

PRIMERA COLADA

Los componentes de la aleación fueron colocados por separado en el crisol. La colada se llevó a una temperatura máxima de 1250°C. Se procedió a vaciar en el molde centrífugo precalentado a 1150°C.

El molde fue hecho como indica la Fig. Nº 15, y el cojinete obtenido de esta experiencia era de 68 mm. de diámetro exterior, 33 mm. de diámetro interior y 200 mm. de longitud.

Al cojinete resultante de esta primera colada se lo identifica con el Nº 4 para los ensayos de control en los Laboratorios de Materiales y Metalografía.

SEGUNDA COLADA

Esta vez se la llevó a una temperatura de 1200°C y se procedió a vaciar a 1100°C, directamente en

MATERIAL : BRONCE 80% Cu.; 10% Sn.; 10% Pb. ; 4 COLADAS

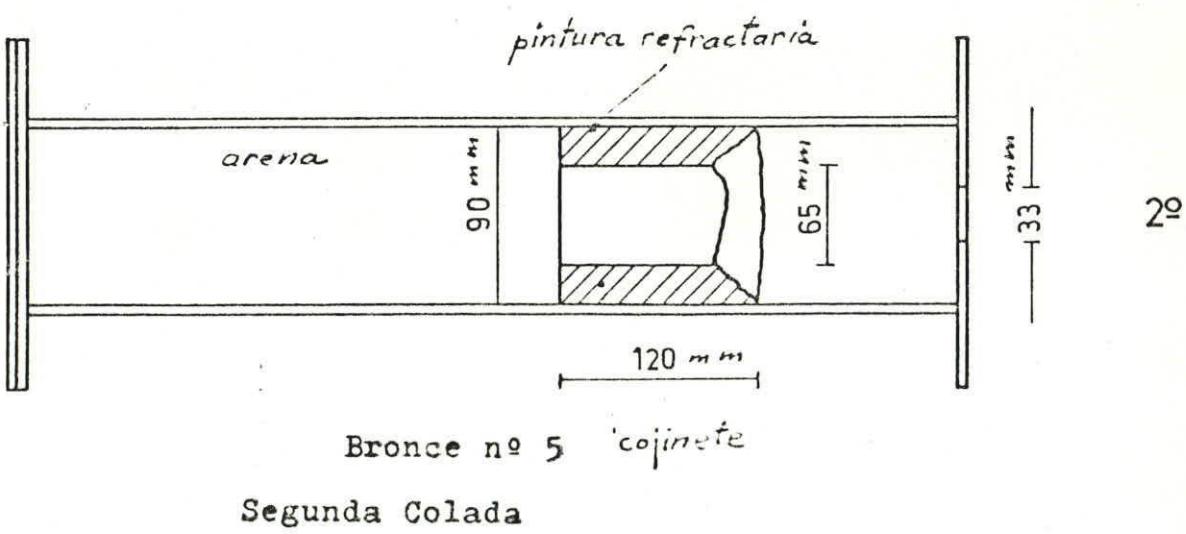
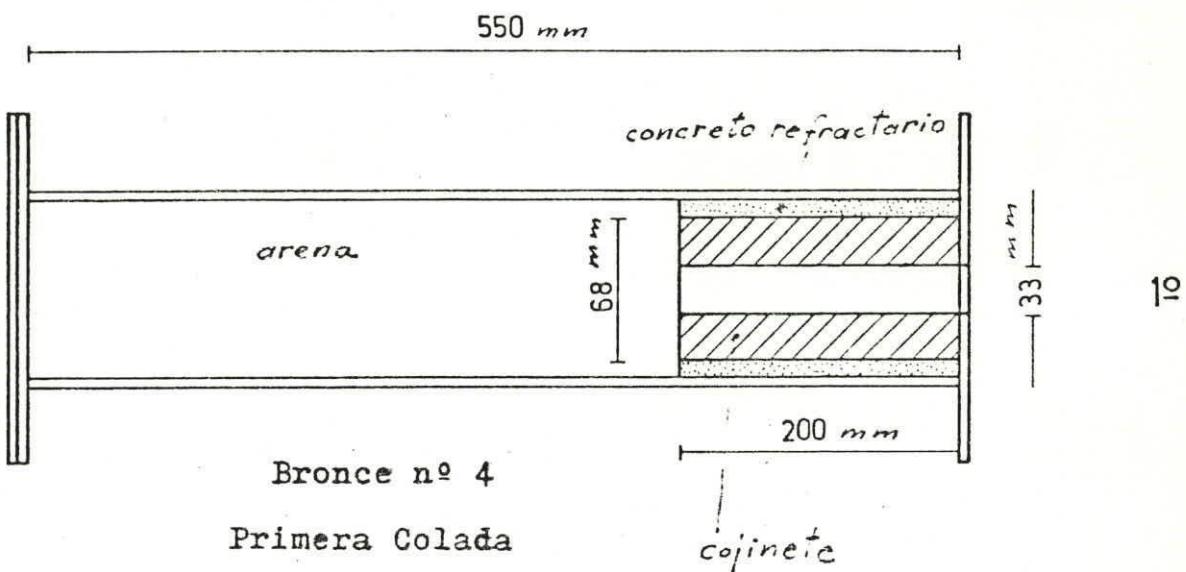


FIGURA N°

15

el cilindro sin molde refractario únicamente cubierto con pintura refractaria FIRIT 20. Se obtuvo un cojinete con un espesor de pared de 12 mm. El enfriamiento fue el más rápido de las cuatro experiencias. Ver Fig. N° 15.

Al cojinete resultante de esta segunda colada se lo identifica con el N° 5 para los ensayos de control en los Laboratorios de Materiales y Metalografía.

TERCERA COLADA

En la primera experiencia el molde tuvo una ligera penetración de arena en la superficie de bronce, para esta tercera colada se pintó el molde cilíndrico con FIRIT 20. Se obtuvo un cojinete de 250 mm. de longitud, 68 mm. de diámetro exterior y 48 mm. de diámetro interior. Ver Fig. N° 16.

Al cojinete resultante de esta tercera colada se lo identifica con el N° 6 para los ensayos de control en los Laboratorios de Materiales y Metalografía.

CUARTA COLADA

El sobrante de las tres fundiciones anteriores era depositado cada vez en moldes estacionarios de arena. Estos lingotes sirvieron para la experiencia final. Se llevó la fundición a una temperatura máxima de 1300°C; y la colada se vació a una temperatura de 1180°C. El resultado fue un cojinete de 300 mm. de longitud de 90 mm. de diámetro exterior y 46 mm. de diámetro interior. Ver Fig. Nº 16.

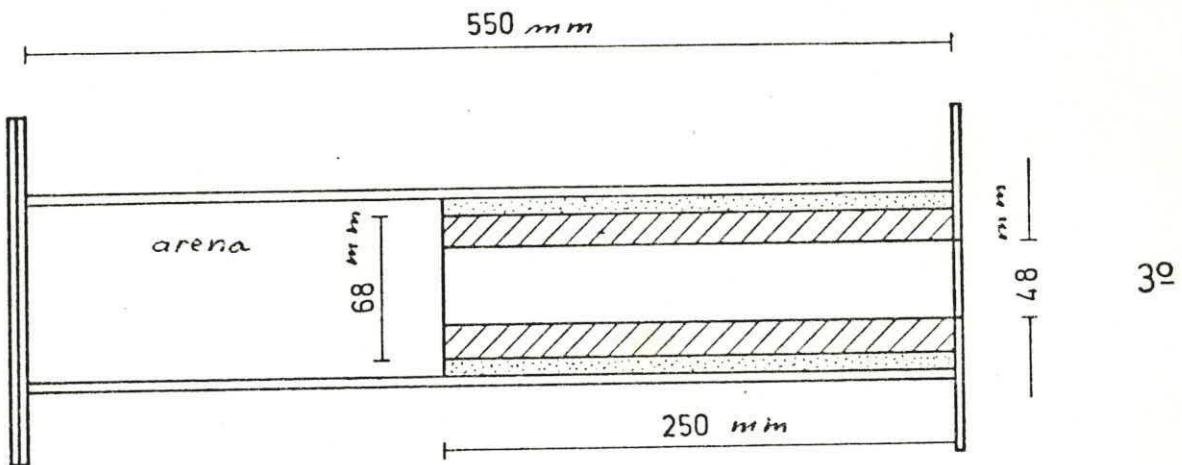
Al cojinete resultante de la cuarta colada, se lo identificó con el Nº 7 para los ensayos de control en los Laboratorios de Materiales y Metalografía.

3.2 CONTROL DE CALIDAD DE LOS BRONCES

A continuación se describen las pruebas físicas de dureza Brinell, tracción, compresión, y también se analiza la microestructura de cada uno de los bronces elaborados en esta tesis y tres muestras tomadas de cojinetes de molinos de caña, de bronces de procedencia extranjera.

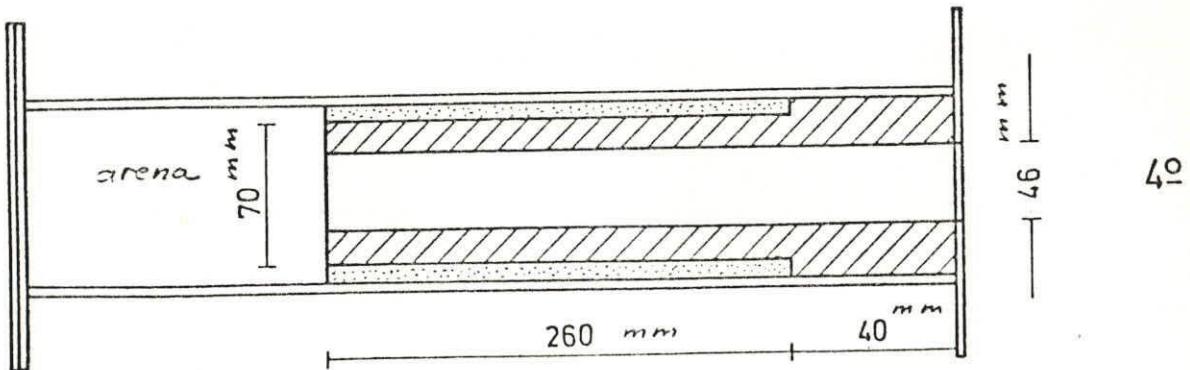
MATERIAL BRONCE

80 % Cu. ; 10 % Sn. ; 10 % Pb. ; 4 COLADAS



Bronce nº 6

Tercera Colada



Bronce nº 7

Cuarta Colada

FIGURANº

16

Se asigna el N° 1 a una aleación de procedencia francesa; 2 y 3 muestras de aleaciones colombianas.

3.2.1.- Metalografía

La microestructura de una aleación es un factor significativo para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. La estructura está determinada por la composición química y por los efectos térmicos y mecánicos de las condiciones de solidificación, enfriamiento, tratamiento térmico, maquinado en frío o caliente, soldadura.

En la metalografía sin ataque se estudia la distribución del plomo de acuerdo a las velocidades de enfriamiento proporcionadas al metal en el momento de su solidificación. Esto tiene por objeto analizar el efecto del tamaño y la ubicación de las partículas de plomo en la aleación, en las propiedades mecánicas de la misma.

En la metalografía con ataque químico, se somete la superficie metálica de una probeta a la acción de un reactivo químico, en este caso cinco partes de NH_4OH más 5 partes de H_2O , más 4 partes de

H_2O_2 , durante un minuto, para revelar el resto de la microestructura y comprobar las fases presentes en la aleación. En ambos casos se ha usado el microscopio Olympus PME del Laboratorio de Metalografía de la ESPOL prefiriendo usar bajas resoluciones (100 X). Ver fotomicrografías del N° 17 al N° 24.

3.2.2.- Dureza Brinell

Esta prueba mide la resistencia de un material a la penetración de una pequeña esfera o una punta de diamante de forma piramidal. El penetrador es generalmente hecho de un material mucho más duro que el que se ensaya, como por ejemplo acero endurecido o diamante. La carga se aplica oprimiendo lentamente el penetrador perpendicularmente a la superficie ensayada, por un período. Conociendo la carga aplicada y el área penetrada, o la profundidad de la impresión se puede calcular un valor de dureza.

La medición de dureza Brinell es la más aconsejada en este caso porque da una posibilidad menor de que la indentación se aplique en su mayor



Fig. 17.- Bronce SAE 64 de procedencia francesa, sin ataque químico, 100 x.

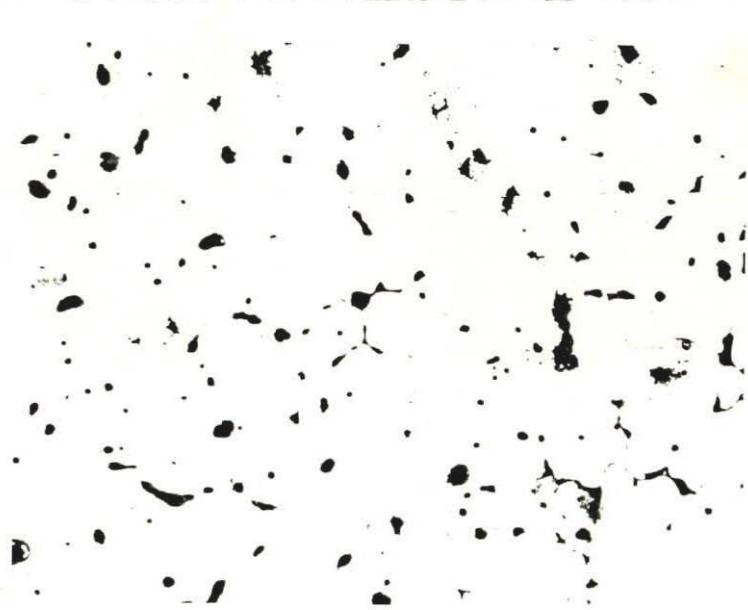


Fig. N° 18.- Bronce de Composición desconocida, usado para cojinetes de molinos de caña. Procedencia colombiana, sin ataque químico, 100 x.



Fig. Nº 19.- Bronce de composición desconocida, usado para cojinetes de molinos de caña. Procedencia colombiana, sin ataque químico, 100x.

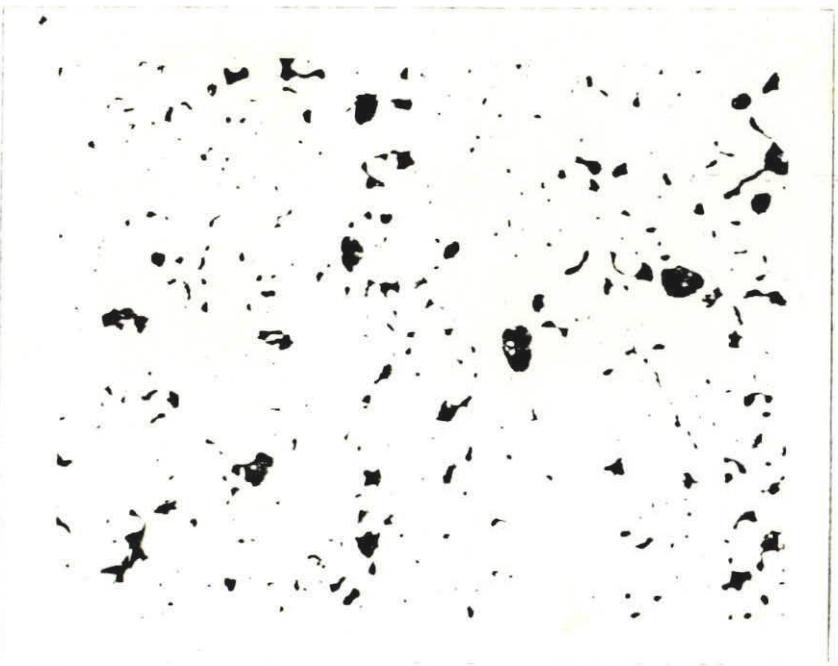


Fig. Nº 20.- Bronce centrifugado 80-10-10. Elaborado en la primera colada de esta tesis, sin ataque químico, 100x.



Fig. N° 21.- Bronce centrifugado 80-10-10, elaborado en la segunda colada, sin ataque químico, 100x.

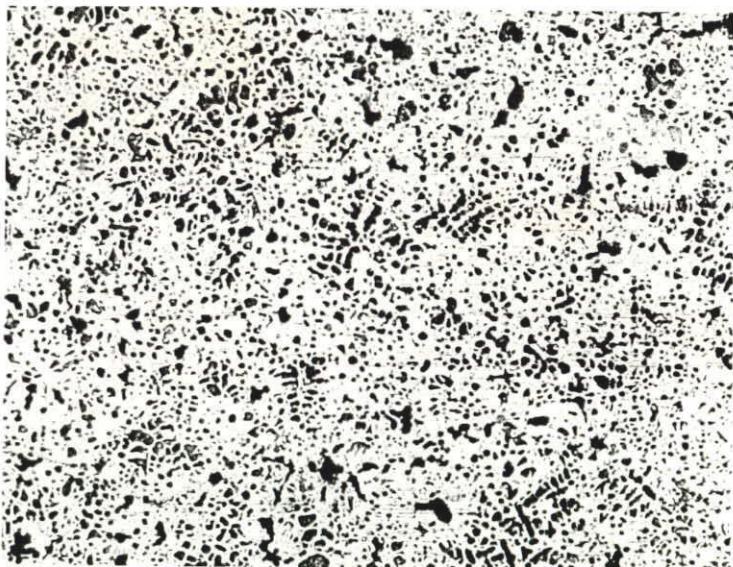


Fig. N° 22.- Muestra del mismo bronce que el anterior, con ataque químico de NH_4OH con H_2O y con H_2O_2 , 100 x

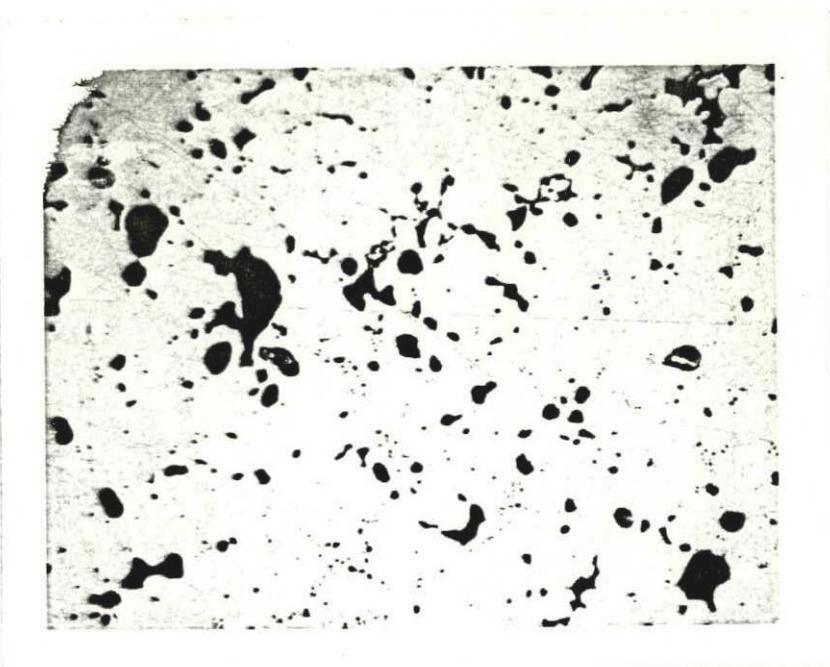


Fig. N° 23.- Bronce centrifugado 80-10-10, elaborado en la tercera colada, sin ataque químico, 100 x.



Fig. N° 24.- Bronce centrifugado 80-10-10 elaborado en la cuarta colada, sin ataque químico, 100 x.

Material: Bronces al Sn con alto contenido de Pb
Temperatura de Ensayo: Ambiente
Condiciones: 500 Kg con esfera de 10 mm. durante 5 seg.
Equipo: Ametek L-108
Realizado por: Cristóbal Guevara J.
FECHA: Mayo 31 de 1978

	1*	2*	3*	4	5	6	7
Primera Lectura (Ind.)	3.0	3.7	3.55	2.9	3.1	3.2	3.3
Segunda Lectura "	2.9	3.6	3.6	2.9	3.05	3.2	3.25
Tercera Lectura "	3.0	3.65	3.55	3.1	3.0	3.3	3.3
PROMEDIO	2.96	3.65	3.56	2.96	3.05	3.23	3.28
DUREZA CORRESPONDIENTE	71	46.1	49	71	66.8	61.3	57.5

* Bronces de procedencia extranjera

Tabla № 6.- Ensayo de Dureza Brinell

parte en una mancha de plomo, como puede acontecer con la punta de diamante usada para medir la dureza Rockwell.

La ventaja de la prueba de dureza está en la rapidez de los resultados que pueden influir en la aceptación o rechazo de determinada clase de aleación.

3.2.3.- ENSAYOS DE TRACCION Y COMPRESSION

Para los ensayos de tracción se han observado las normas ASTM B-208 , tanto para la preparación de probetas como en la ejecución de los ensayos.

Ver Anexo N° 3.

De ellos se derivan las siguientes propiedades mecánicas:

$$\text{Resistencia a la tracción} = \frac{\text{carga máxima}}{\text{área original}}$$

Resistencia a la fluencia = Esfuerzo que determina una deformación permanente del 0.2%.

$$\text{Elongación} = \frac{\text{long.final} - \text{long. orig.}}{\text{longitud original}}$$

Solicitado por: Tesis de Grado de Cristóbal Guevara
 Material: Bronce al Sn con alto contenido de Pb
 Temp. de Ensayo: Ambiente (26°C).
 Equipo usado: INSTRON 1128
 Fecha: Junio 6, 1978

Nº	Sección de la Probeta mm ²	Longitud Inicial mm	Longitud Final mm	Límite de Fluencia Kgf/mm ²	Resistencia a la Tracción Kgf/mm ²	Alargamiento %	V _p mm/min	V _e mm/min	OBSERVACIONES
1	30.68	25	26.9	17.6	20.21	7.6	100	100	
2a ²	30.68	25	28.5	8.47	11.57	14.0	100	100	
2b	30.68	25	27.3	8.47	10.43	9.2	100	100	
3a	30.68	25	25.9	8.8	8.96	3.6	100	100	
3b	30.68	25	25.3	(¹)	11.1	1.2	100	100	
4a	30.68	25	26.5	17.6	20.53	6	20	20	
4b	30.68	25	26.4	16.62	19.06	5.6	50	50	
4c	30.68	25	26.5	18.25	19.72	6	100	100	

(¹) Se fracturó antes del límite de fluencia
 (²) El sub-índice a, b, c indica que se tomaron varias muestras de un mismo bronce.

Tabla Nº 7.- Ensayo de Tracción

Solicitado por: Tesis de Grado de Cristóbal Guevara
 Material: Bronce al Sn con alto contenido Pb
 Temp. de Ensayo: Ambiente (26°C).
 Velocidad:
 Equipo usado: INSTRON 1128
 Fecha: Junio 6, 1978

Nº	Sección de la Probeta mm ²	Longitud Inicial mm	Longitud Final mm	Límite de Fluencia Kgf/mm ²	Resistencia a la Tracción Kgf/mm ²	Alargamiento %	OBSERVACIONES
5	30.68	25	27.1	17.92	21.83	8.4	100 mm/min 2
6a	30.68	25	25.9	16.29	18.25	3.6	20 mm/min 5
6b	30.68	25	26.0	15.64	16.30	4.0	50 mm/min 5
6c	30.68	25	26.2	17.44	17.60	4.8	100 mm/min 2
7a	30.68	25	26.2	18.25	19.72	4.8	100 mm/min 2
7b	30.68	25	26.9	16.95	19.55	7.6	100 mm/min 2

Tabla N° 8.- Ensayo de Tracción

Solicitado Por: Tesis de Grado de Cristóbal Guevara

Material: Bronce al Sn con alto contenido Pb

Temp. de Ensayo: Ambiente (26° C)

Equipo usado: INSTRON 1128

Fecha: Junio 6 ,1978

Nº	Sección de la Probeta mm ²	Longitud Inicial mm	Límite de Fluencia Kgf/mm ²
1a	132.7	38	8.66
3	132.7	38	4.52
4a	132.7	38	8.44
4b	132.7	38	12.05

Tabla Nº 9.- Ensayo de Compresión

Para los ensayos de compresión se han seguido las normas ASTM-E-9-70. Se aplica a la probeta en la dirección de su eje longitudinal una carga estática que tienda a provocar un acortamiento de ella, cuyo valor se va incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo.

Al ser sometidas a la compresión, las probetas sufren mayores deformaciones en su sección media debido a que en las caras laterales no actúa ninguna fuerza exterior, mientras los extremos están impedidos por la fricción que se produce entre las caras de la probeta y los platos de la máquina de ensayo. Por este motivo, las probetas toman la forma de un barril, siendo ésto más notable para los metales más maleables.

3.3 DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Esta discusión tratará de establecer la calidad de materiales producidos por centrifugación en el Laboratorio de Fundición de la ESPOL, a través de los resultados encontrados en los ensayos de laboratorio en relación con las normas establecidas para esta propósito por la ASTM. También se ha creído conveniente esta -

blecer un estudio preliminar del material de cojinetes de molinos que se han usado en el Ingenio Aztra. Estos materiales fueron marcados como:

- Muestra Nº 1, bronce de cojinete marca Fives Lille-Cail, Francia
- Muestras Nº 2 y Nº 3, bronce de cojinete de procedencia colombiana.

Las muestras correspondientes a las cuatro coladas de esta Tesis son numeradas 4, 5, 6 y 7.

Como se estableció previamente en la parte 1.4 correspondiente al análisis de esfuerzos que soportan los cojinetes de los molinos de caña, el criterio mínimo de aceptación que debe cumplir un material para este tipo de cojinetes es de 6 Kg/mm^2 de resistencia a la compresión y una dureza Brinell comprendida entre 60 y 80. Para los ensayos de compresión se utilizó la máquina INSTRON 1128 del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la ESPOL.

Bronce Nº 1

El ensayo de compresión que ha sido establecido como

criterio mínimo de aceptación para esta aplicación, para este caso resultó 8.66 Kg/mm^2 , y la dureza Brinell alcanzó un valor de 71. Ver Tablas N° 6 Y N° 9. Las observaciones metalográficas al microscopio nos revelaron que se trataba de un bronce 80-10-10.

Hablando ya en el trabajo real de la operación de los cojinetes de este material en los mencionados molinos, se sabe que demostraron muy buenas cualidades de antifricción.

Esta calidad de bronce cumple con los requisitos arriba establecidos.

Bronces N° 2 y N° 3

El promedio de dureza de las probetas de estos bronces es de 47.5 Brinell. El gráfico del ensayo de compresión de estos bronces nos indica que la fluencia del material se inicia a 4.6 Kg/mm^2 . Ver Anexo F.

Algunas probetas resultaron con porosidades; las observaciones metalográficas al microscopio nos indicaron que esta aleación casi no tenía estaño.

En la operación real, los cojinetes de esta aleación causaron problemas de fricción y deterioraron los ejes.

Esta calidad de bronce no cumple con los requisitos establecidos.

Bronces N° 4, N° 5, N° 6 y N° 7

La dureza promedio de estos bronces resultó 65 Brinell: el Bronce N° 4 señaló 71, y el N° 7, 57.5. Los ensayos de compresión indicaron que la fluencia del material se iniciaba en un caso a 8.44 Kg/mm^2 , y en otro a 12 Kg/mm^2 . Ver Anexos D, E y F.

En las pruebas de tracción el límite de fluencia al 0.2% señaló 17.2 Kg/mm^2 como promedio; anteriormente los bronces 2 y 3 marcaron 8.6 Kg/mm^2 .

Finalmente los análisis metalográficos al microscopio mostraron una dispersión uniforme del plomo en la matriz.

Las propiedades mecánicas analizadas tienen valores que caen dentro del rango establecido, por tanto se recomienda esta aleación y el procedimiento seguido para su elaboración.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De las pruebas efectuadas siguiendo paso a paso la tecnología de fusión aquí descrita, de los resultados obtenidos y de la discusión hecha de los mismo, se concluye que la técnica utilizada para la obtención del bronce 80-10-10 cumple con los requerimientos tecnológicos que las industrias de equipo pesado esperan de estas aleaciones, y además cumplen con los requisitos en relación a propiedades mecánicas que para estos materiales han fijado las normas norteamericanas.

Por esta circunstancia se estima que para conseguir el objetivo deben seguirse las siguientes recomendaciones en la fundición de bronces al estaño con alto contenido de plomo:

1.- Controlar la pureza de los materiales de la aleación.

En lingotes o en chatarra los materiales deben ser de aleación conocida y libres de impurezas.

2.- Controlar las temperaturas a lo largo de toda la operación. Hay que respetar la temperatura máxima a que se puede llevar la colada de acuerdo a lo que indican

los manuales, y también la temperatura de vaciado. Para ésto es necesario disponer de un medidor de temperaturas con una sensibilidad de por lo menos $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

- 3.- Enfriar la fundición en el menor tiempo posible. Con ésto se consigue una dispersión fina y uniforme del plomo en la aleación, y da lugar a una microporosidad muy útil para la lubricación.
- 4.- Cuidar de que la fundición se la haga en el menor tiempo posible. Esto requiere la debida preparación de centrífuga, materiales, herramientas y personal necesario; aparte de favorecer la economía de la operación, ésto no permite la absorción de gases por la colada.
El uso de fundentes y desgasificantes de calidad es obvio para lograr una gran solidez en la fundición.

ANEXO A

DUREZA DEL EJE							
MATERIAL DEL COJINETE	ESCALA ROCKWELL C				DUREZA BRINELL		
	56-70 (a)	56-63 (b)	400-500 (c)	300-400 (d)	200-300 (e)	165-200 (f)	130-165 (g)
Cojinete con recubrimiento de plata	X	X	X				
Bronce con Plomo (3-7% Pb)	X	X	X	X			
Aleaciones de Aluminio	X	X	X	X	X		
Bronce con plomo indentando con grafito (10% Plomo)	X	X	X	X	X		
Cobre-Plomo (25% Plomo)	X	X	X	X	X	X	
Cobre-Plomo indentado con Grafito (25% Pb)	X	X	X	X	X	X	
Babbit Impregnado Cu-Sn	X	X	X	X	X	X	X
Babbit al Sn o Plomo	X	X	X	X	X	X	X

Tabla N° 3.- Compatibilidad de los Materiales para Cojinete con Eje de Acero de Durezas Diferentes.

(Tomado de la Colección Metals-Handbook, Vol. I, Pág. 857)

ANEXO A

(Continuación)

Utilización de la Tabla de Compatibilidad de Durezas entre Cojinetes y Ejes.-

La X que está más hacia la derecha indica el eje más suave que puede ser usado con un material específico de cojinete si el muñón tiene un acabado de 10 micropulgadas; si éste es de 5 micropulgadas, la dureza límite puede recorrer un espacio hacia la derecha de la Tabla; para un acabado de 20 micropulgadas el límite X debe recorrer un espacio hacia la izquierda.

En esta Tabla se asume que no hay recubrimientos en el cojinete. Si tuveria un recubrimiento de plomo o de estaño de 0.001" de espesor, se puede usar con eje de material más suave y el límite de dureza hay que desplazarlo un espacio hacia la derecha; si el espesor es de 0.004", el límite X debe moverse dos espacios hacia la derecha.

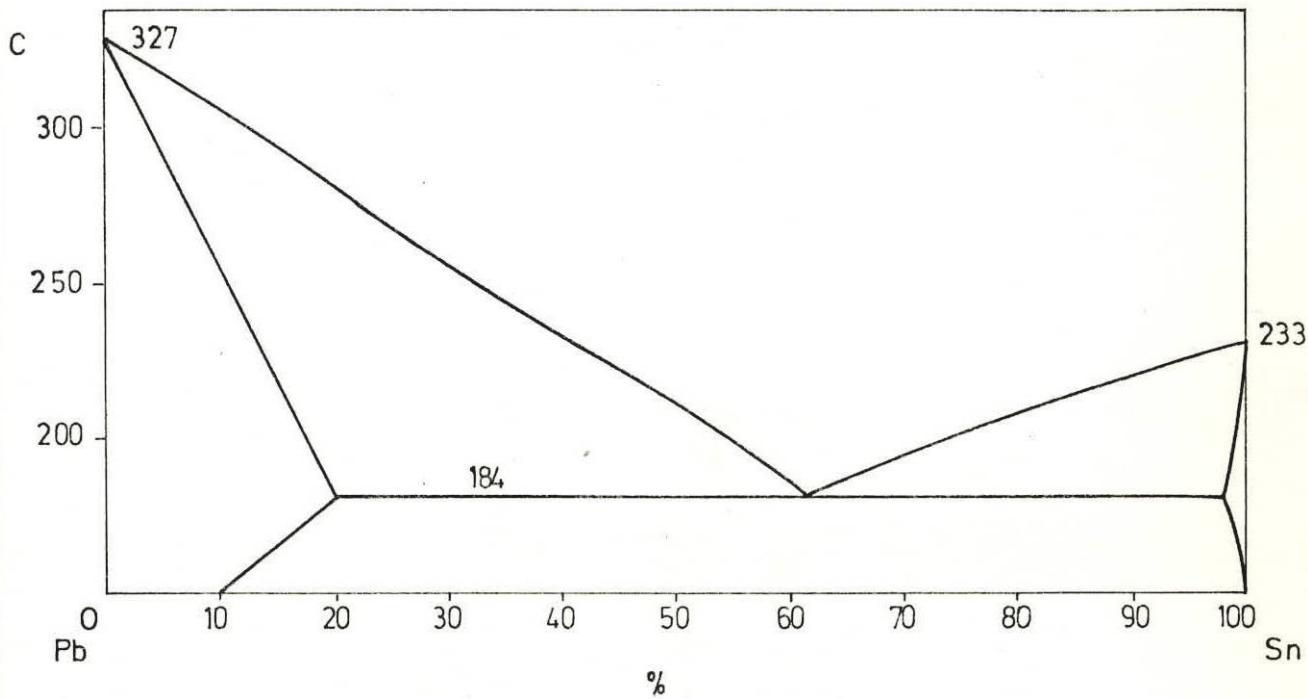
La posición de una X en una columna vertical indica el cojinete más duro que puede ser usado con determinado eje, de un acabado de 10 micropulgadas. Si el acabado es de 5 micropulgadas mueva la X un espacio arriba; si es de

20 micropulgadas, un espacio hacia abajo. Para un recubrimiento de plomo o estaño de 0.001", mueva la X un espacio hacia arriba; para 0.004" dos espacios.

Como prototipos de materiales para ejes con la dureza indicada se puede señalar:

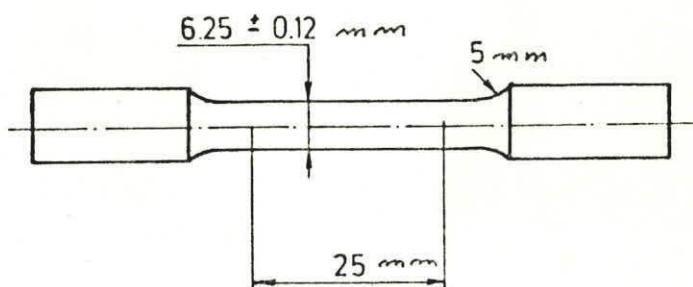
- a) Aceros nitrurados
- b) Aceros cementados
- c) Aceros templados y revenidos, 0.4 a 0.5% C.
- d) Aceros revenidos al rango de maquinabilidad
- e) Aceros revenidos a un mayor rango de maquinabilidad, 0,4 a 0,5% C, hierros perlíticos maleables y nodulares.
- f) Aceros no tratados, con 0.4% C.
- g) Aceros de bajo carbono no tratados, con 0.2% C.

ANEXO B

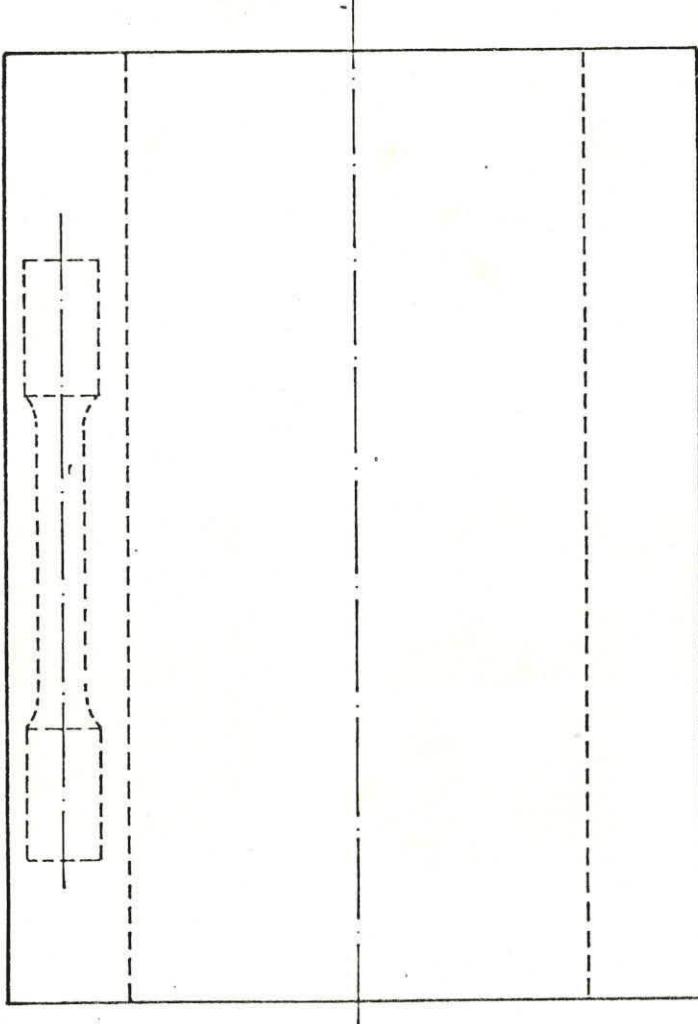


ANEXO C

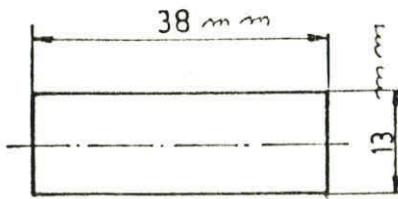
TRACCION
ASTM



METODO PARA SACAR PROBETAS SEGUN ASTM



COMPRESSION
ASTM E-9-70



**ENSAYOS DE
COMPRESIÓN**

4-a

$$\begin{aligned}r &= 2000 \text{ kg} \\V_p &= 100 \text{ mm/min} \\V_e &= 2 \text{ mm/min}\end{aligned}$$

Bronce n° 4

1120 kg
FLUENCIA

1460 kg

1-a

$$\begin{aligned}r &= 2000 \text{ kg} \\V_p &= 50 \text{ mm/min} \\V_e &= 2 \text{ mm/min}\end{aligned}$$

Bronce n° 1

1360

FLUEN
1150 kg.

ANEXO D

2000 kg

Nota.- Verificando la $V_p = 50 \text{ mm/min}$ en realidad es 40 mm/min

ANEXO E

ENSAJOS DE COMPRESSION

$$\begin{aligned}V_p &= 20.000 \text{ kg} \\V_p &= 50 \text{ mm/min} \\V_c &= 2 \text{ mm/min}\end{aligned}$$

Bronce nº 4

Bronce nº 3

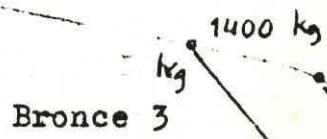
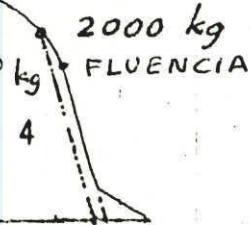
kg

ANEXO F

ENsayos de compresión

$$V_p = 50 \text{ mm/min}$$

$$V_c = 2 \text{ mm/min}$$



BIBLIOGRAFIA

- 1.- AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, Copper-Base Alloys
Foundry Practice, III Edition.
- 2.- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Materials Handbook, Vol.I
Properties and Selection.
- 3.- EMILE HUGOT, Manual para Ingenieros Azucareros, II
Edición, Pág. 141.
- 4.- J.E. SHIGLEY, El Proyecto en Ingeniería Mecánica,
Pág. 369.
- 5.- RICHARD A. FLINN, Copper, Brass and Bronze Castings,
- 6.- ENCICLOPEDIA DE METALURGIA, Pág. 326.
- 7.- A. MALISHEV, Tecnología de los Metales.
- 8.- KEHL, Principles of Metallographic Laboratory Practice,
Mac Gra Hill, Pág. 21.

- 9.- W. HAYDEN, W. MOFFAT, J. WULFF, Propiedades Mecánicas,
Wiley, Pág. 21.
- 10.- ARIAS PALAZON, Laboratorio de Ensayos Industriales,
Págs. 125-130.