

“Construcción y Puesta en Marcha de Centrifugadora Vertical de Metales”

Carlos Armando Aranda Angamarca¹, Ignacio Vicente Wiesner Falconí²

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral carlos_aranda3ac@hotmail.com.

² Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1971; Postgrado en México, UNAM – Politécnico de México; Investigador Visitante del CENIM – España y el IPT – Brasil; Profesor de la FIMCP – ESPOL desde 1975, Campus Politécnico Prosperina Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, intramet@hotmail.com

Resumen

El objetivo principal de esta tesis es mejorar el proceso de fabricación que tiene la empresa Intramet. En la actualidad la empresa realiza su producción de manera artesanal, la nueva propuesta es pasar a un proceso de fabricación en serie, para lo cual es necesario contar con los equipos adecuados, un objetivo específico de esta tesis es proveer a la empresa con una nueva máquina que mejore su proceso de fabricación y la calidad de sus productos, la máquina que se construyó es una centrifugadora vertical para fundición de metales.

Además haber realizado la construcción el montaje y prueba del sistema en vacío y con carga y sus respectivos correctivos fue necesario evaluar el producto obtenido para garantizar y certificar la calidad del mismo que para el caso se hizo en aleación de cobre especificación SAE 64.

Una vez obtenido el producto por ensayos de centrifugación a varias velocidades se realizó la evaluación de la calidad por medio del ensayo de tracción, ensayo de dureza y el análisis microscópico.

Finalmente se realizó la evaluación económica del proyecto y estableció las ventajas técnico-económicas por el uso de Ingeniería Nacional para el mejoramiento de los procesos de fabricación.

Palabras claves. Producción, aleación, centrifugación, fabricación, calidad,

Abstract

It was built, we tested mechanically a vertical centrifuge machine and later was used to make bronze SAE 64, a material that is used for machines of high loads and low speeds as the sugar mills and machines stone porters.

Were tested alloy solidification with different speeds of centrifugation with at different Gs acceleration of gravity to improve the grain size and hence the mechanical properties.

Introducción

Son pocas las empresas que se han dedicado en nuestro medio a la venta de bronce y latones de alta calidad para la construcción mecánica orientada al mantenimiento industrial, las oportunidades de las empresas nacionales de participar en este mercado es modificando sus procesos de producción, igualando o superando la calidad de los productos importados.

El presente trabajo consiste en el estudio de la empresa de fundición de metales

llamada INTRAMET, esta empresa se dedica a la elaboración de fundiciones de materiales ferrosos y no ferrosos para ello la empresa cuenta con la maquinaria el equipo y el personal técnico adecuado para el proceso de fundición.

Cabe indicar que este proceso se lo realiza de una manera artesanal, se utiliza moldes de arena y en algunos casos moldes metálicos, y el proceso de colado es por gravedad que consiste en verter metal fundido en los moldes previamente elaborados.

El objetivo de esta tesis es de implantar un modelo de producción masivo, para aumentar su producción y al mismo tiempo mejorar la calidad de sus fundiciones, para ello lo que se ha propuesto es que la empresa cuente con una nueva tecnología, y como respuesta se ha propuesto la construcción de una máquina centrífugadora vertical de metales.

La única forma que INTRAMET puede entrar en el mercado con los productos de la nueva línea de producción es por medio de una nueva oferta de bronce de calidad normalizados de alta resistencia mecánica libre de defectos superficiales e internos que no son los materiales que existen desde siempre.

Las empresas importadoras de materiales han acostumbrado a los usuarios del país al uso de metales de baja resistencia mecánica pero libre de defectos.

La experiencia de INTRAMET radica en la producción de piezas de bronce especiales que son aleaciones que no se ofrece en el mercado, teniendo de esta forma un nicho tecnológico que se quiere aprovechar y por ello ha emprendido este proyecto.

Específicamente este proyecto tiene como objetivo estudiar el comportamiento del bronce SAE 40 en la fabricación de bocines de gran tamaño, los mismos que tienen una gran aplicación en las industrias locales y nacionales.

Entre los principales objetivos específicos propuestos para el desarrollo de este trabajo de tesis, se tienen los siguientes:

- 1 La construcción y puesta en marcha de la máquina centrífugadora vertical de metales.
- 1 Estudiar el funcionamiento de la máquina centrífugadora vertical para encontrar los parámetros de funcionamiento en la producción masiva del bronce SAE 40.
- 2 Mejorar la calidad de los bocines fabricados de bronce SAE 40, en cuánto a propiedades de resistencia mecánica, lo cual se analizará mediante análisis de laboratorio.

Comparar las propiedades de los productos obtenidos en los procesos de fundición por gravedad y fundición centrífuga.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

INTRAMET es una empresa que se dedica a la fabricación de partes mecánicas utilizando el proceso de fundición, entre los principales metales que se funden se encuentran las aleaciones de: cobre, aluminio, hierro, aceros ordinarios y aceros especiales como el acero inoxidable, para ello la empresa cuenta con hornos de fusión de diferente diseño que depende de la temperatura alcanzable y de la manera de cómo genera el calor, la empresa cuenta con: horno de inducción, hornos de crisol y horno de cubilote.

Además la empresa cuenta con toda la herramienta y maquinas herramientas adecuada para la preparación de las arenas, moldes y para el acabado de las piezas.

El método de de producción con que la empresa trabaja actualmente es un método de producción artesanal, este método tiene sus desventajas, las cuales se ven reflejado en la baja calidad del producto, baja producción y baja productividad a más de porosidades, incrustaciones de arena, tamaño de grano grande, todos estos problemas al final se refleja en la baja resistencia mecánica del elemento fabricado y adicional mente se tiene una baja competitividad con productos importados.

Para resolver estos problemas se ha analizado las ventajas que podría dar la aplicación del método de fundición centrífuga en la fabricación de partes mecánicas, las ventajas que se encuentran al utilizar este nuevo método son: la producción es uniforme, existe un aumento significativo de la misma, reproductividad de piezas libre de defectos y se mejoras en otros parámetros de calidad como el tamaño de grano el cual es fino y que le confiere mayor resistencia mecánica al elemento que se fabrica. Finalmente la tasa de elementos fabricados es alta en comparación con el anterior método.

Analizando estas ventajas se ha determinado que se pondrá en práctica este método de producción, y específicamente la máquina que se construirá para alcanzar este propósito es una máquina de fundición centrífuga vertical.

Con esta máquina se puede realizar fundiciones con todos los metales anteriormente mencionados, pero en este proyecto se estudiará específicamente el comportamiento del bronce SAE 40 en la fabricación de bocines de gran tamaño, ya que este material tiene una gran gama de aplicaciones en las industrias

Descripción de la planta, para producción no ferrosa.

Aleaciones no ferrosas Los metales para fundición no ferrosos incluyen aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, estaño, zinc, níquel y titanio. Las aleaciones de aluminio son en general las más manejables. El punto de fusión del aluminio puro es 600 °C por consiguiente, las temperaturas de vaciado para las aleaciones de aluminio son bajas comparadas con las de las fundiciones de hierro y acero.

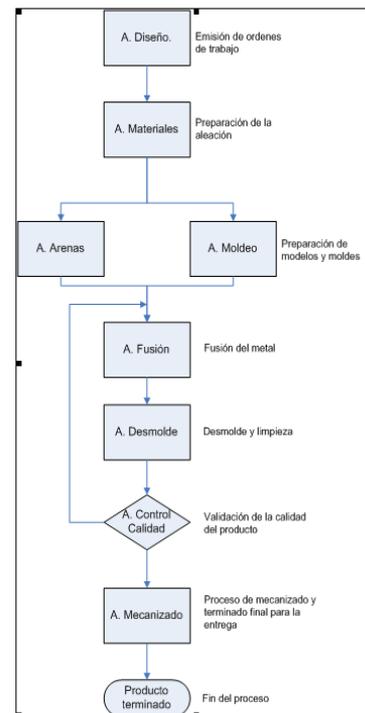
INTRAMET es una empresa que se dedica a la fundición de partes metálicas por más de 20 años, y durante este periodo la empresa ha adquirido la destreza en la ejecución de este trabajo y al mismo tiempo se ha organizado para realizarlo de una manera más productiva, esto consiste en que la planta está dispuesta en áreas de trabajo de tal manera que los procesos se los realiza de una manera rápida.

Las áreas de trabajo con que cuenta la empresa son las siguientes:

- 2 Área de diseño.- En esta área se planifica el trabajo según las especificaciones del cliente, se realizan los planos, se dimensionan las partes y se emiten las órdenes de trabajo.
- 3 Área de materiales.- En esta área se encuentra todo tipo de chatarra de los diversos metales que se utiliza en la fabricación de partes.
- 4 Área de arenas.- Es un lugar específico en donde se almacenan las arenas de fundición entre ellas tenemos: arena natural para moldeo en verde (húmedo), bentonita, arena de sílice para moldeo con silicato de sodio y CO2
- 5 Área de moldeo.- En esta área se elabora los modelos y los moldes.

- 6 Área de fusión.- En esta área se encuentran los hornos de fundición entre los hornos con que cuenta la empresa tenemos: horno de inducción magnética, horno de cubilote, horno de crisol.
- 7 Área de desmolde.- En esta área se retira la parte fundida del molde se cortan los bebederos y conductos, para luego aplicarle un limpieza superficial con discos abrasivos y si es necesario se le aplica limpieza por medio de chorros de arena.
- 8 Área de control de calidad.- en esta área se inspecciona que la parte fundida se ha obtenido sin fallos, y si se encuentran fallos de consideración la parte se la regresa para reprocesarla, caso contrario se la pasa al área de mecanizado si fuera así el caso.
- 9 Área de mecanizado.- En esta área se realiza el mecanizado correspondiente según sea el requerimiento del cliente, la empresa cuenta con la maquinaria necesaria para este tipo de trabajo.

En el plano 1 que se adjunta en el apéndice se muestra la distribución de la planta de acuerdo al área de trabajo que tiene la empresa.



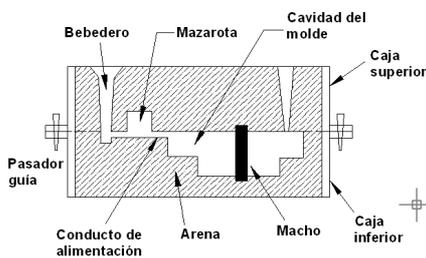
ESQUEMA AREAS DE TRABAJO DE INTRAMET

Fundición artesanal con moldes de arena, defectos frecuentes.

El proceso para producir piezas u objetos útiles con metal en estado líquido se le conoce como proceso de fundición, este proceso se ha practicado desde el año 2000ac. Consiste en vaciar metal fundido en un recipiente con la forma de la pieza u objeto que se desea fabricar y esperar a que se solidifique al enfriarse y adquiera resistencia mecánica.

Para lograr la producción de una pieza fundida es necesario hacer las siguientes actividades:

1. Diseño de los modelos de la pieza y sus partes internas
2. Diseño del molde
3. Preparación de los materiales para los modelos y los moldes
4. Fabricación de los modelos y los moldes
5. Colado de metal fundido
6. Enfriamiento de los moldes
7. Extracción de las piezas fundidas
8. Limpieza de las piezas fundidas
9. Terminado de las piezas fundidas
10. Recuperación de los materiales de los moldes



ESQUEMA DE MOLDE LISTO PARA SER LLENADO.

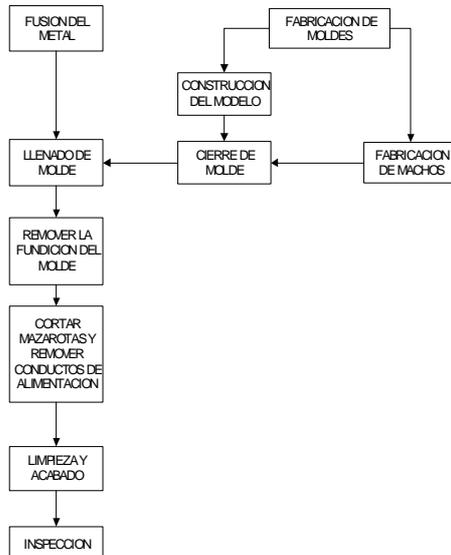
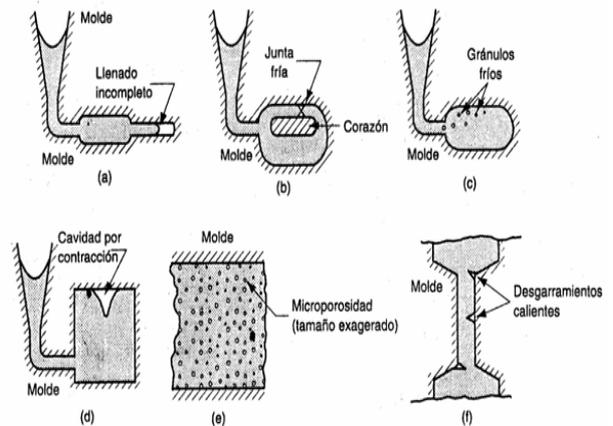


DIAGRAMA DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

DEFECTOS FRECUENTES EN LA FUNDICIÓN



DEFECTOS MÁS COMUNES EN LAS FUNDICIONES: (A) LLENADO INCOMPLETO, (B) JUNTA FRÍA, (C) GRÁNULOS FRÍOS. (D) CAVIDAD POR CONTRACCIÓN, (E) MICRO POROSIDAD Y (F) DESGARRAMIENTOS CALIENTES.

Métodos de inspección Los procedimientos de inspección en la fundición incluyen:

- 1) Inspección visual para detectar defectos obvios como llenado incompleto, cortes fríos y grietas severas en la superficie.
- 2) medida de las dimensiones para asegurarse que están dentro de las tolerancias.
- 3) pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y otras relacionadas con la calidad inherente del metal fundido, pruebas de presión para localizar fugas en la fundición, métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de líquidos penetrantes fluorescentes y pruebas supersónicas para detectar defectos superficiales o internos en la fundición, ensayos mecánicos para determinar propiedades, tales como la resistencia a la tensión y dureza.

Si se descubren defectos, pero éstos no son serios, muchas veces es posible salvar la fundición por soldadura, esmerilado y otros métodos de recuperación que se hayan convenido con el cliente.

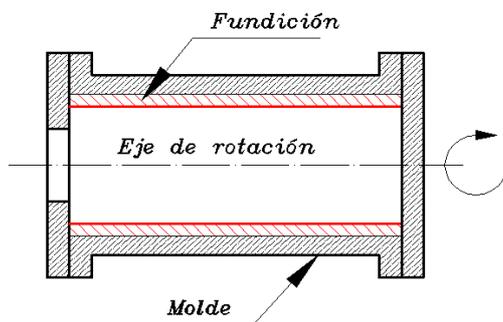
Producción centrífuga con moldes metálicos, diagrama de producción en serie

La fundición centrífuga es el proceso de hacer girar el molde mientras se solidifica el metal, utilizando así la fuerza centrífuga

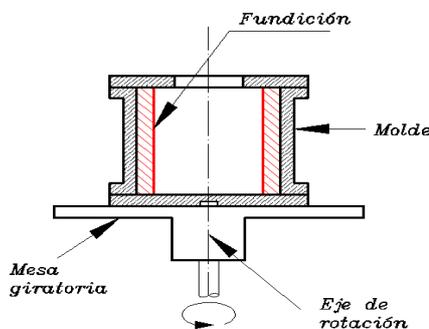
para acomodar el metal en el molde. Se obtienen mayores detalles sobre la superficie de la pieza y la estructura densa del metal adquiere propiedades físicas superiores. Las piezas de forma simétricas se prestan particularmente para este método, aun cuando se pueden producir otros muchos tipos de piezas fundidas.

Existen tres tipos de fundición centrífuga:

Fundición centrífuga real En la fundición centrífuga real, el metal fundido se vacía en un molde que está girando para producir una parte tubular. Ejemplos de partes hechas por este proceso incluyen tubos, caños, manguitos y anillos. Este método se ilustra en las figuras 1.5 y 1.6. El metal fundido se vacía en el extremo de un molde rotatorio horizontal. La rotación del molde empieza en algunos casos después del vaciado. La alta velocidad genera fuerzas centrífugas que impulsan al metal a tomar la forma de la cavidad del molde. Por tanto, la forma exterior de la fundición puede ser redonda, octagonal, hexagonal o cualquier otra.



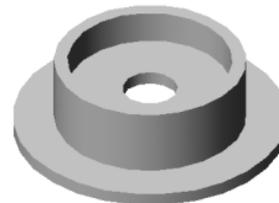
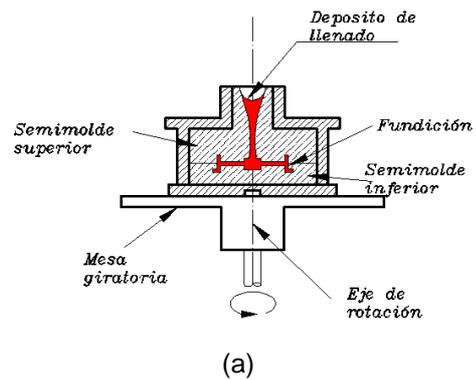
ESQUEMA DE LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA REAL HORIZONTAL.



ESQUEMA DE LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA REAL VERTICAL.

Fundición semicentrífuga En este método se usa la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas en lugar de partes tubulares, como se muestra en la figura (a) y (b). La velocidad de rotación se ajusta generalmente para un factor G alrededor de 15, y los moldes se diseñan con mazarotas que alimenten metal fundido desde el centro. La densidad del metal en la fundición final es más grande en la sección externa que en el centro de rotación. El centro tiene poco material o es de poca densidad.

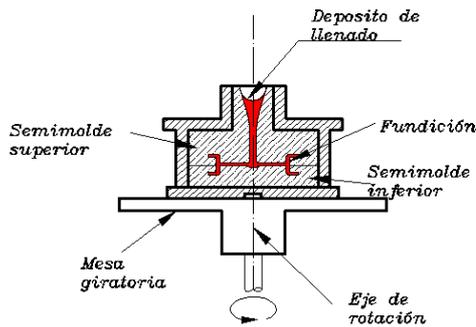
Por lo regular el centro en este tipo de sistemas de fundición es maquinado posteriormente, excluyendo así la porción de más baja calidad. Los volantes y las poleas son ejemplos de fundiciones que pueden hacerse por este proceso. Se usan frecuentemente moldes consumibles o desechables en la fundición semicentrífuga.



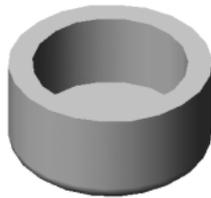
(b)
(A) ESQUEMA DE FUNDICIÓN SEMICENTRÍFUGA, (B) PIEZA FUNDIDA.

Fundición centrifugada Es un sistema donde por medio de un tallo se hace llegar metal fundido a racimos de cavidades colocadas simétricamente en la periferia figura (a) y (b), de manera que la fuerza centrífuga distribuya la colada del metal entre estas cavidades. El proceso se usa para partes pequeñas, la simetría radial de la parte no es un requerimiento como en

los otros dos métodos de fundición centrífuga.



(a)



(b)

(A) ESQUEMA DE LA FUNDICIÓN CENTRIFUGADA (B) PIEZAS FUNDIDAS

Esquema de la fundición centrífuga: la fuerza centrífuga hace que el metal fluya a las cavidades del molde lejos del eje de rotación. **Piezas fundidas**, con este método se funden más de una unidad.



FUNDICIÓN CENTRIFUGADA

TIPOS DE MOLDE

En fundición centrífuga se usan dos categorías de moldes: los moldes desechables y los moldes permanentes. Cada uno será considerado en las siguientes líneas.

Moldes desechables

Los moldes desechables son normalmente hechos de arena, cerámica, o yeso. Con

estos materiales, es necesario destruir el molde completamente para quitar la fundición. Los métodos para producir estos moldes para la fundición centrífuga es muy similar a aquéllos usados en fundición estática de arena ordinaria o en el proceso de cera perdida.

En la fundición centrífuga, el uso de moldes desechables tienen sólo un uso limitado. Ellos se usan principalmente cuando se realiza solamente una fundición, cuando se requiere una muy lenta tasa de enfriamiento por las razones metalúrgicas, o porque la fundición es tan grande que un molde permanente no se justificaría económicamente. Este tipo de método de moldeo es bastante popular para la producción de productos grandes.

Es preferible hacer las fundiciones en moldes permanentes, si es posible. Esto es porque el costo de hacer trabajo de arena (moldes desechables) son tales que en las altas producciones no es económicamente justificable. Además, una comparación de la calidad del producto hecho en un molde arena contra uno hecho en un molde permanentes demostró que la calidad del producto hecho en un molde permanente tiene mayor calidad debido a su efecto de enfriando más rápido del metal fundido que le confiere altas propiedades mecánicas y físicas.

Moldes permanentes

Un molde permanente es hecho de metal o grafito y puede usarse repetidamente para la producción de muchas fundiciones de la misma forma.

Los moldes permanentes son divididos en dos clasificaciones. La primera clasificación es moldes hechos de grafito o carbono. La segunda clasificación es moldes hechos de metal, como acero, hierro colado, o cobre. En esta tesis nos ocuparemos especialmente en los moldes metálicos.

Moldes metálicos.

El tipo más durable de molde permanente es hecho de acero o hierro colado. Algunos moldes de cobre son usados solamente para fundición no ferrosa. Mientras un gran número de moldes de hierro colado se usa, hay un problema en su construcción, porque es difícil de producir una forma cilíndrica de alta calidad usando el método de fundición por gravedad. Así, en muchos casos, los moldes para la fundición

centrífuga son producidos por fundición centrífuga.

Por varias razones, no se recomienda que los moldes de hierro colado se usen, una razón es porque los ahorros en el costo material comparado con aquéllos de acero no son muy grandes, y otra razón es ese moldes hierro colado no pueden ser enfriados seguramente, se encuentra que un molde de hierro colado, cuando se somete a un enfriamiento puede llegar a la ruptura. Los moldes de acero comúnmente no tienen este problema y de acuerdo con esto son más recomendables, y además los moldes de acero son más baratos debido a su larga vida. Se puede usar diferentes aleaciones y tipos de hierro colado para los moldes permanentes, pero el hierro gris ordinario con una resistencia aproximadamente 30000 Psi, ha demostrado ser el más barato y el material más satisfactorio, para baja producciones. Generalmente se encontrará que el uso de un acero ordinario de bajo carbono como el AISI 1020, normalizado después del mecanizado será muy satisfactorio. Sin embargo estos moldes deben ser sometidos a un alivio de tensiones durante el proceso industrial. Por otro lado, si un molde será usado para altas producciones se recomienda que el molde se construya de un acero de la aleación, como AISI E-4130, tratado térmicamente.

Bocines centrifugados de alta resistencia.

El presente estudio se basa en la fabricación de bocines de bronce de gran tamaño y principalmente que estos sean centrifugados. Antes de comenzar a describir a los bronce apropiados para fundición centrífuga, se define lo que es una aleación de cobre, cuáles son sus aplicaciones y sus principales aleaciones y propiedades.

El cobre posee una alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad, resistencia y facilidad de fabricación. Es no magnético, se puede soldar y dar terminaciones superficiales con revestimientos metálicos (galvanizado) o barnizado.

Se pueden mejorar sus propiedades por aleación.

Las aleaciones de cobre tienen su aplicación en la mecánica, donde la dureza y resistencia mecánica son más importantes que la conductividad eléctrica, entonces las aleaciones como bronce y latón son aplicadas en lugar de cobre puro.

Clasificación del cobre y sus aleaciones, propiedades mecánicas y sus aplicaciones más comunes.

- 1 Cobre refinado con oxígeno o cobre electrolítico.
- 2 Cobre libre de oxígeno con desoxidante residual.
- 3 Aleaciones Cobre – Aluminio.
- 4 Aleaciones Cobre – Níquel.
- 5 Aleaciones Cobre – Berilio.
- 6 Aleaciones Cobre – Silicio.
- 7 Latones de baja, media y alta resistencia a la tracción
- 8 Bronces.- de baja, media y alta resistencia a la tracción.

Cobre refinado o cobre electrolítico.- Tiene una conductividad térmica y eléctrica alta y se usa en electrotecnia, es el conductor clásico, se suministra deformado en frío en forma de alambre, cables, barras, etc. Contiene un porcentaje medio de oxígeno de 0,04%, no se puede utilizar en soldaduras ni aplicaciones que impliquen calentamientos por encima de los 300°C

Cobre libre de oxígeno con desoxidante residual.- Contiene entre 0,004 y 0,05 de fósforo, si la cantidad de fósforo libre

Diagrama de producción en serie.

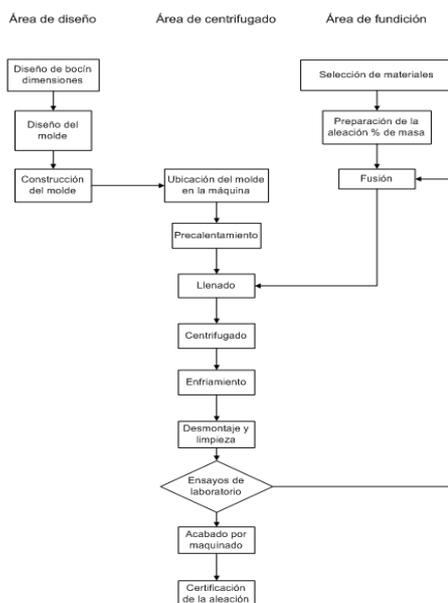


DIAGRAMA DE PRODUCCIÓN EN SERIE PARA FUNDICIÓN CENTRIFUGA.

permanece por debajo de 0,005 la conductividad eléctrica se mantiene elevada, si el porcentaje de fósforo está sobre el (0,04%); en esos casos, la conductividad eléctrica es más baja. Estos cobs pueden embutirse, estamparse, soldarse, se emplean en la fabricación de tubos para plomería o para intercambiadores de calor.

Aleaciones Cobre – Aluminio.- Tienen excelente resistencia a la corrosión marina, corrosión bajo tensión y a la corrosión por fatiga, resistencia a la oxidación en caliente, buena resistencia mecánica en caliente y muy buena a temperatura ambiente y a baja temperatura, buenas características de fricción, ausencia de chispas en el choque, soldabilidad excelente, incluso sobre acero.

Aleaciones Cobre – Níquel.- Cuproníqueles propiamente dichos tienen contenidos de níquel que varían del 5 al 44%. Los cuproníqueles con 40-45% tienen un coeficiente de resistividad eléctrica nulo. Tienen facilidad de conformación en frío y en caliente, facilidad de moldeo, buenas características mecánicas, incluso a bajas y altas temperaturas, propiedades eléctricas especiales de los tipos con alto contenido de níquel y muy buena resistencia a la corrosión por el agua de mar que circula a grandes velocidades.

Aleaciones Cobre – Berilio.- Son aleaciones relativamente nuevas. Se las envejece para obtener una muy alta resistencia. Cuando se las trata térmicamente se logra aumentar la resistencia a la tracción, sus propiedades mecánicas: son muy elevadas (puede soportar los 1400 Mpa) y se mantienen hasta los 300 °C. Tiene una alta dureza y tenacidad, elevado límite de fatiga. El Be tiene menor densidad que el Al, pero su punto de fusión es mucho más elevado (1280 °C), es muy escaso y caro, sus principales aplicaciones son: resortes, arandelas, relés, membranas, herramientas antichispa, piezas magnéticas, etc.

Aleaciones Cobre – Silicio.- Esta aleación de cobre – silicio, contiene menos del 5% de silicio y es la más resistente de las aleaciones de cobre que se pueden endurecer por deformación. Tiene las propiedades mecánicas del acero de maquinaria (alta resistencia, buena ductilidad y una excelente tenacidad) y la resistencia a la corrosión. Se utiliza en tanques, recipientes a presión, y líneas hidráulicas a presión.

Los Latones.- Son aleaciones a base de cobre y zinc, contienen de 5 a 46% de este último metal y eventualmente, varios otros elementos en pequeñas proporciones, su buena resistencia a la corrosión y su aptitud para tratamientos superficiales (barnices transparentes, recubrimientos diversos), permiten realizar económicamente objetos de bello aspecto, de larga duración y de mantenimiento fácil. Pueden ser colados, trabajados en frío o en caliente según su composición. Son fácilmente estampados, embutidos o mecanizados con aleaciones de plomo y zinc mejoran sus propiedades y aplicaciones.

Bronces al estaño.- Los auténticos bronce son aleaciones de cobre y de estaño, con contenidos que varían del 2 al 20% de estaño, ya que por encima de esta proporción el material se vuelve frágil. Se caracterizan por una buena resistencia, tenacidad, y resistencia al desgaste y a la corrosión. Por todo ello se utilizan en engranajes, rodamientos y elementos sometidos a grandes cargas de compresión.

Bronce al fósforo (CuSn8P).- Contiene 90% de cobre, aproximadamente 10 % de estaño y se agrega alrededor de un 0,3% de fósforo que actúa como endurecedor, formando con el cobre el compuesto Cu₃P duro y frágil, que mejora la resistencia mecánica. El bronce fosforoso tiene alta resistencia y tenacidad, buena resistencia a la tracción y resistencia a la corrosión. Se utiliza en la fabricación de bombas, engranajes, resortes y rodamientos, chavetas y discos de embrague.

Bronce al estaño con plomo.- El plomo es insoluble en la aleación. Hasta un 7% mejora la aptitud al mecanizado y a la estanqueidad. Por encima, hasta el 30%, las aleaciones se usan para resistir al desgaste. Estos bronce se utilizan para la fabricación de cojinetes. Los cojinetes que se utilizan para soportar pesadas cargas tienen alrededor de 80% de cobre, 10% de estaño y 10% de plomo. Para cargas más ligeras y velocidades mayores el contenido de plomo aumenta. Un cojinete típico de esta clase puede contener 70% de cobre, 5% de estaño y 25% de plomo.

Bronce al estaño con zinc (CuSn5Zn4).- Tiene 2 % de zinc, el zinc facilita la desoxidación, mejora la colabilidad y ductilidad. Además con el agregado de plomo (<6%), este bronce se usa en grifería o válvulas de agua, vapor y petróleo. Además al tener buena resistencia a la

tracción y a la corrosión por agua de mar, se utiliza en buques, para guarniciones de tuberías y piezas de bombas.

Bronce al manganeso.- Tiene 60% de cobre, 40% de zinc y manganeso hasta 3,5%. Es altamente resistente a la corrosión del agua de mar, por esto se utiliza en la fabricación de hélices de barcos. En la siguiente tabla se presentan las características técnicas de los bronce más usados en la industria.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS BRONCES.

ALEACIONES	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS BRONCES										
	NORMAS ACTUALES Y EQUIVALENCIAS		ELEMENTOS COMPOSICIÓN QUÍMICA %								
	SAE / UNS	ASTM DIN	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Ni	P	
BRONCES ALESTANO	40 / C-83600	B-145-4A 1705-R08	84-86	4-6	4-6	4-6	0.3	0.25	1	0.05	
	62 / C-90500	B-143-1A 1705-R010	86-89	9-11	0.3	1-3	0.2	1.25	1	0.05	
	63 / C-92700	B-427 1705-GS0B210	86-89	9-11	1-2.5	0.7	0.2	0.25	1	0.05	
	65 / C-90700	B-584-300 1716-GS0B210	88-90	10-12	0.5	0.5	0.15	0.2	0.5	0.05	
	620 / C-90300	B-143-1B 1705-GS0B212	86-89	7.5-9	0.3	3-5	0.2	0.2	1	0.05	
	640 / C-92500	B-584-302 1705-GS0B214	85-88	10-12	1-1.5	0.5	0.3	0.25	1.05	0.3	
BRONCES AL PLOMO	64 / C-93700	B-144-3A 1716-GS0B210	78-82	9-11	B-11	0.8	0.15	0.55	1	0.15	
	66 / C-93500	B-144-3C 1716-GS0B210	82-86	4.3-6	B-10	2	0.2	0.3	1	0.05	
	67 / C-93800	B-584-300 1716-GS0B214	75-79	6.3-7.5	13-16	0.8	0.15	0.8	1	0.05	
	680 / C-93200	B-584-302 1705-R07	81-85	6.3-7.5	6-8	2.4	0.2	0.35	1	0.15	
				Cu	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Sn	Pb
	BRONCES AL ALUMINIO	68A / C-95200	B-148-9B 1714-GN0B250	86min	8.5-9.5	-	-	2.5-4	-	-	-
C-95400		B-148-9C 1714-GN0B250	89min	10-11.5	-	-	0.5	3.5	2.5	-	
C-95500		B-148-9D 1714-GN0B250	78min	10-11.5	-	-	3.5	3.5	3.5	-	

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS BRONCES.

ALEACIONES	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y FÍSICAS							
	NORMAS ACTUALES Y EQUIVALENCIAS		Resistencia Tracción (kg/mm ²)	Límite Elástico (kg/mm ²)	Alargamiento %	Dureza Brinell	Densidad (g/cm ³ a 20°)	Módulo Elástico (GPa)
	SAE / UNS	ASTM DIN						
BRONCES ALESTANO	40 / C-83600	B-145-4A 1705-R08	20.5	9.5	20	62	8.83	96
	62 / C-90500	B-143-1A 1705-R010	27.5	12.5	20	75	8.72	103
	63 / C-92700		24	12.5	10	70	8.80	90
	65 / C-90700	B-427 1705-GS0B210	24	12.5	10	80	8.78	97
	620 / C-90300	B-143-1B 1705-GS0B212	27.5	12.5	20	72	8.7	103
	640 / C-92500	B-584-302 1705-GS0B214	24	12.5	10	95	8.85	90
BRONCES AL PLOMO	64 / C-93700	B-144-3A 1716-GS0B210	20.5	8.5	15	60	8.95	76
	66 / C-93500	B-144-3C 1716-GS0B210	19.5	8.5	15	52	8.87	100
	67 / C-93800	B-584-300 1716-GS0B214	18	9.5	12	50	9.25	69
	680 / C-93200	B-584-302 1705-R07	20.5	9.05	15	58	8.93	97
BRONCES AL ALUMINIO	68A / C-95200	B-148-9B 1714-GN0B250	45	17	20	110	7.84	103
	C-95400	B-148-9C 1714-GN0B250	51.5	20.5	12	150	7.45	107
	C-95500	B-148-9D 1714-GN0B250	82	27.5	6	185	7.53	110

SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

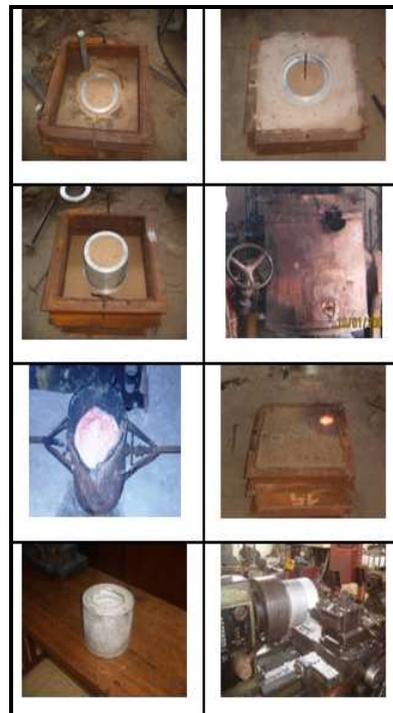
En este capítulo se desarrollarán los cálculos necesarios para la construcción de la máquina centrífuga vertical de metales, en primera instancia se dimensionará la máquina según los requerimientos de la empresa, para determinar el tamaño y la forma que tendrá

la máquina, el número de partes que la conforman, el tipo de materiales que se utilizarán, el sistema de transmisión de potencia, el sistema de variación de velocidades, el sistema de enfriamiento, la selección del motor, la selección de los rodamientos y los tamaños y las formas de los moldes.

Capacidad de producción de partes en aleaciones de cobre

A continuación unas fotografías que ilustran el proceso de fundición por el método de fundición por gravedad.

ETAPAS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN ARENA.



ETAPAS Y TIEMPOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN ARENA POR GRAVEDAD.

Etapas del proceso	Tiempo. (minutos)
Fabricación del modelo	60
Moldeo	30
Preparación de la aleación	20
Fusión	45
Colado	2
Tiempo de enfriamiento	180
Desmolde	20
Limpieza	20
Total	377

A continuación unas fotografías que ilustran el proceso de fundición por el método de fundición centrifugada.

ETAPAS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN CENTRIFUGA



ETAPAS Y TIEMPOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN CENTRIFUGADA

Etapas del proceso	Tiempo. (minutos)
Ubicación del molde en la máquina	5
Pre calentamiento del molde	5
Pre calentamiento de la tobera	2
Preparación de la aleación	20
Fusión del metal	45
Colado	2
Enfriamiento	3
Desmontaje	5
Total	95

Dimensionamiento de la máquina.

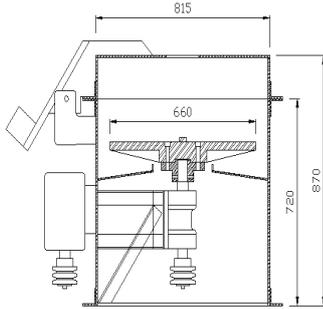
Para el dimensionamiento de la máquina se tomaran en cuenta los siguientes factores: la máquina será utilizada para la fabricación de bocines y partes que tengan cierta simetría cilíndrica, el material que utilizará en el proceso de centrifugado será el bronce por su densidad más alta que la del acero, la capacidad máxima de carga de la máquina será de 100 Kg de fundición, la forma de la máquina será cilíndrica, con el motor pagado a un costado, tendrá una tapa pivoteada en un extremo la misma que tendrá un contrapeso para que facilite la operación de abrir y cerrar, internamente la máquina estará compuesta de una mesa giratoria, eje, sistema de acoplamiento de la mesa y el eje, chumacera, polea, sistema de enfriamiento y un sistema de recolección de agua de enfriamiento.

Para obtener las dimensiones de la máquina se empieza dimensionando el bocín, para luego dimensionar el molde y con esto se dimensiona la mesa giratoria con ello se dimensiona la estructura que albergara todos estos elementos, tomando en cuenta que la altura de la máquina debe ser tal que una persona promedio pueda trabajar sin problemas en el momento de vaciar el metal fundido dentro del molde.

Como dato adicional se tiene que el diámetro del bocín debe ser de 350mm como máximo, con esto y con ayuda de una tabla del libro de Centrifugal Casting de Nathan Janco 1988. Se determina el espesor que debe tener el molde, el mismo que es 40mm sumando todo esto se obtiene que el molde tiene un diámetro de 430mm, adicional a este diámetro se necesita unas bridas en los extremos del molde con la finalidad de poder sujetar el molde a la mesa y poder asegurar la tapa del molde.

Esto da un diámetro final del molde de 470mm.

Ahora con el diámetro del molde mas unos espacios para poder sujetar el molde a la mesa se determina que la mesa debe tener un diámetro de 660mm, con esto se procede a dimensionar el diámetro que debe tener el cuerpo cilíndrico de la máquina, al diámetro de la mesa se le adiciona un espacio concéntrico para poder acoplar el sistema de enfriamiento, tomando en cuenta todos los detalles se determina que el diámetro de cilindro debe ser de 815 mm.



ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DE LA MÁQUINA

Cronograma de construcción del equipo.

La etapa de selección y dimensionamiento de la máquina ha finalizado. Ahora para poder implementar la solución encontrada se requiere empezar, el proceso de construcción. Para ello hay que elaborar un cronograma de las actividades que hay que realizar para la ejecución del proyecto. Además hay que hacer un estimativo de los tiempos y de los recursos que se necesitará tanto en mano de obra como en materiales.

Entre las principales actividades o tareas que se desarrollaron para la construcción de la máquina se tienen las siguientes:

TAREAS QUE SE EJECUTARON PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA

TABLA DE DATOS USADOS EN EL DIAGRAMA DE GANTT					
Tarea	Nombre de tarea	Duración En días	Inicio	Fin	Tarea predecesora
1	Selección de la máquina	1d	01/06/09	01/06/09	
2	Dimensionamiento de la máquina.	2d	02/06/09	03/06/09	1
3	Cálculo y dimensionamiento de elementos	5d	04/06/09	10/06/09	2
4	Levantamiento de planos de construcción	3d	11/06/09	15/06/09	3
5	Selección de materiales	1d	16/06/09	16/06/09	4
6	Selección de accesorios	1d	17/06/09	17/06/09	5
7	Adquisición de materiales	2d	18/06/09	19/06/09	6
8	Adquisición de accesorios	1d	18/06/09	18/06/09	6
9	Construcción de bastidor de máquina	4d	19/06/09	24/06/09	8
10	Construcción de partes móviles	7d	25/06/09	03/07/09	9
11	Construcción de la mesa giratoria por medio de fundición	3d	19/06/09	23/06/09	8
17	Selección de variador de velocidad	2d	14/07/09	15/07/09	15
18	Ensamble total de la máquina	3d	16/07/09	20/07/09	16
19	Instalación eléctrica	2d	14/07/09	15/07/09	15
20	Pruebas en vacío	2d	21/07/09	22/07/09	17
21	Correctivos	1d	24/07/09	24/07/09	19
22	Pruebas con carga	3d	28/07/09	30/07/09	20

Cálculo y construcción de las partes estructurales.

Masa de la tapa

Dimensiones del cilindro: Diámetro exterior $D_{e1} = 815\text{mm}$, altura $H = 150\text{mm}$, espesor de plancha $e_1 = 6\text{mm}$.

Dimensiones de la placa superior: Diámetro exterior $D_{e2} = 815\text{mm}$, $e_2 = 3\text{mm}$

Dimensiones del anillo de refuerzo: Diámetro exterior $D_{e3} = 895\text{mm}$, diámetro interior $D_i = 815\text{mm}$, $e_3 = 6\text{mm}$

Densidad del acero $\rho = 7850 \text{ Kg / m}^3$

Aplicando las formulas de volumen y densidad se calculó las masas respectivas.

$$m_{cilindro} = \pi * D_{e1} * H * e * \rho \quad \text{Ec.7}$$

$$m_{cilindro} = \pi * 0.815 * 0.15 * 0.006 * 7850 = 18 \text{ Kg}$$

$$m_{placa} = \frac{\pi * D_{e2}^2}{4} * e_2 * \rho \quad \text{Ec.8}$$

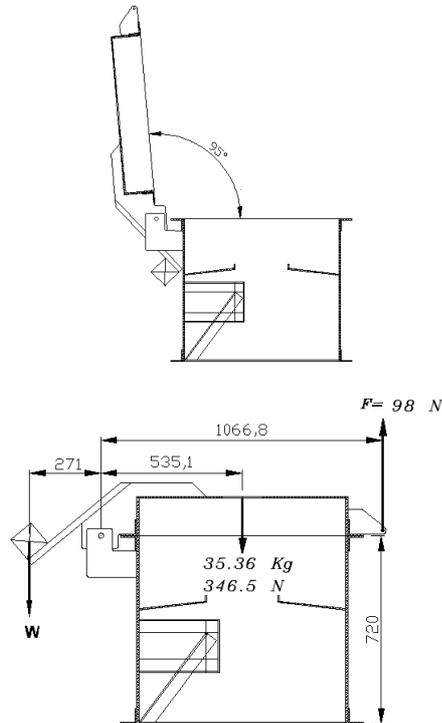
$$m_{placa} = \frac{\pi * 0.815^2}{4} * 0.003 * 7850 = 12.3 \text{ Kg}$$

$$m_{anillo} = \frac{\pi * (D_{e3}^2 - D_i^2)}{4} * e_3 * \rho \quad \text{Ec.9}$$

$$m_{anillo} = \frac{\pi * (0.895^2 - 0.815^2)}{4} * 0.006 * 7850 = 5.06 \text{ Kg}$$

Entonces la masa total de la tapa es la suma de lo anterior y esto es 35.36 Kg.

A continuación se muestra un esquema de las dimensiones de la máquina que incluye el bastidor, la tapa, el sistema de bisagra y el contrapeso que ayudará a abrir y cerrar la tapa.



ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTRAPESA DE LA TAPA.

Realizando sumatoria de momentos con respecto al eje de rotación obtenemos la masa del contrapeso, también se considera que hay que aplicar un fuerza de 98N para poder levantar la tapa.

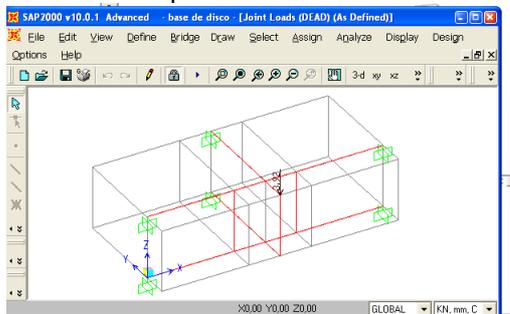
$$\sum m_p = W * 271 - 346,5 * 535 + 98 * 1066,8 = 0 \quad Ec.10$$

$$W = 298,27 \text{ N}$$

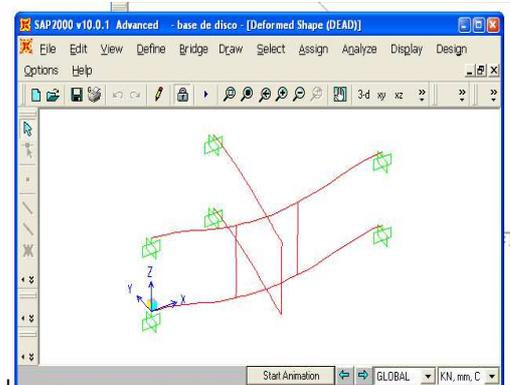
Cálculo de la base de la chumacera principal.

Esta parte fue construida con perfiles de ángulos de 50 x 6 mm los mismos que se encontraban en la bodega de materiales de la empresa estos ángulos van fuertemente soldados al bastidor de la máquina, se utilizó electrodos 7018 de AGA para tener un mayor confianza en la soldadura, sin embargo se realizo un análisis a la estructura con el programa SAP 2000 para verificar que este todo bien.

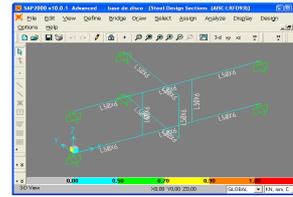
La carga aplicada es el peso de todo el sistema de rotación este peso ya está calculado pero se lo explicará detalladamente en el siguiente ítem 2.5, la misma que es 3920 N, con esto se utiliza el programa SAP 2000 para verificar que todo este correcto, los apoyos se consideran totalmente empotrados.



BASE DE CHUMACERA MODELADA EN SAP 2000



BASE DE CHUMACERA MODELADA EN SAP 2000 Y DEFORMADA



FACTORES DE SEGURIDAD CALCULADOS POR SAP 2000

Cálculos de los pernos para sujetar la chumacera principal a la base.

La chumacera principal es otro de los elementos con que disponía la empresa en sus bodegas esta chumacera era parte de los componentes de un puente grúa, la chumacera va sujeta por medio de cuatro pernos la carga total que soportaran estos pernos es de 3920 N la medida de los pernos se determinará a continuación.

La fuerza aplicada en cada perno es la carga total (P) dividida para el número de pernos existentes.

$$F_p = \frac{P}{n} = \frac{3920}{4} = 980 \text{ N} \quad Ec.11$$

El esfuerzo cortante en un perno es:

$$\tau = \frac{F_p}{A_p} \quad Ec.12$$

Dónde.

F_p = fuerza aplicada al perno.

A_p = área en el fondo de la rosca del perno.

El factor de seguridad para este caso se calcula de la siguiente manera.

$$N_s = \frac{0,5 * S_y}{\tau} \quad Ec.13$$

Para este caso se utilizará un factor de seguridad de 10 y los pernos serán de grado SAE 2 los mismos que tienen un límite de fluencia elástico mínimo (S_y) de (57 kpsi) 393Mpa. De la tabla 14-6 del libro diseño de máquinas de Robert L. Norton, con las ecuaciones 11, 12 y 13 reordenando se obtiene:

$$A_p = \frac{N_s * F_p}{0,5 * S_y} = \frac{10 * 980}{0,5 * 393} = 50 \text{ mm}^2$$

Con esta área y con la fórmula del área de un círculo se despeja el diámetro requerido:

$$D = \sqrt{\frac{50 * 4}{\pi}} = 8 \text{ mm} = 0,31 \text{ in}$$

Este diámetro es del fondo de la rosca y corresponde a un perno de 7/16 in.

Cálculo y construcción partes móviles: eje, mesa giratoria y selección de rodamientos.

Para empezar con los cálculos hay que establecer la masa total del sistema que va a rotar durante la operación de centrifugación entre los elementos que rotan se tiene los siguientes: el bocín, el molde, la mesa giratoria, el acople de la mesa al eje, el eje y la polea.

Cálculo de las dimensiones del bocín.

Con la información de la masa requerida 100 Kg, la forma cilíndrica de un bocín y del material se procede a calcular las dimensiones que debe tener este bocín. La densidad y el volumen de un cilindro hueco se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 14}$$

$$V = \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)h}{4} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

ρ = densidad.

V = volumen.

m = masa.

D_e = diámetro exterior.

D_i = diámetro interior.

h = altura.

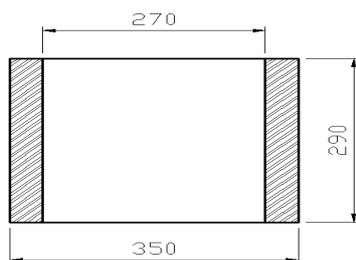
Para realizar el cálculo de las dimensiones se tiene una referencia de que el diámetro exterior tiene que ser a lo máximo de 350 mm y el espesor de pared debe ser a lo máximo de 40mm, con esto se tiene que el diámetro interior es de 270mm y considerando que la masa del bocín es de 100kg, se procede al cálculo con el uso de las ecuaciones 14, 15 y con una densidad de 8874 Kg/m³, se calcula la altura que ha de tener el bocín.

$$m = \rho * \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2) * h}{4}$$

$$100 = 8874 * \frac{\pi(0.35^2 - 0.27^2) * h}{4}$$

$$h = 0.289 \cong 0.29 \text{ m}$$

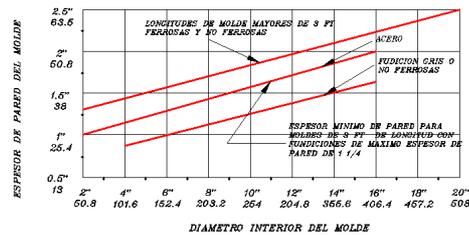
En resumen se tiene que las dimensiones del bocín son: $D_e=350\text{mm}$, $D_i=270\text{mm}$, $h=290\text{mm}$ y su masa es de 100 Kg.



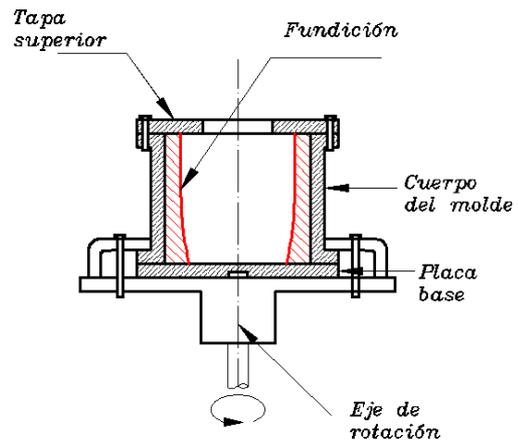
ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DEL BOCÍN.

Determinación de las dimensiones del molde.

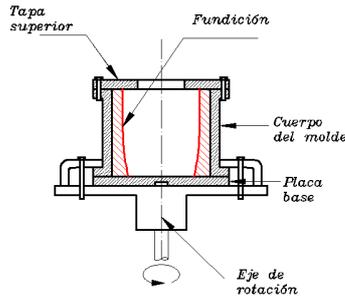
Con los datos anteriores encontraremos las dimensiones que debe tener el molde, lo primero que hacemos es determinar el espesor de pared que debe tener el molde teniendo como partida el diámetro interior del molde que es el mismo del diámetro exterior del bocín en este caso 350mm, para ello nos referimos a la tabla que se encuentra en el libro de Centrifugal Casting de Nathan Janco 1988.



REPRODUCCIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE CÁLCULO DE ESPESOR DE PARED DE MOLDE DE NATHAN JANCO 1988

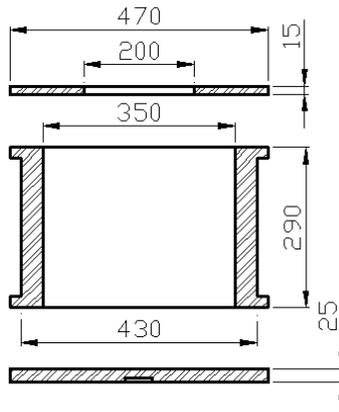


Con la utilización de esta tabla se encuentra que el espesor de pared de molde debe ser de 40mm, ahora se calcula la masa del molde, pero antes se detallará los componentes del molde, el mismo que está compuesto de un cuerpo de molde una placa base y un tapa superior, a continuación se muestra un esquema de la forma del molde.



ESQUEMA DE LOS COMPONENTES DE UN MOLDE METÁLICO PARA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA

Con los datos anteriores se dimensiona el molde de la siguiente manera.



ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DEL MOLDE.

El espesor de la placa base se estimo en 25mm, en base a una prueba inicial que se realizo, ya que para la determinación del espesor optimo se tiene que realizar cálculos de esfuerzos térmicos combinado con la teoría de deformación de placas y choques térmicos los mismos que son muy complejos y algunos autores recomiendan el uso del método de elementos finitos para resolver este problema. Con el mismo criterio se estimo el espesor de la tapa superior en 15mm por el motivo de que esta está sometida a menos esfuerzos que la base, con todas esta dimensiones se calcula la masa del molde.

Cálculo de la masa del molde.

Cálculo de la masa del cuerpo del molde.

El cuerpo del molde está compuesto de tres partes, un bocín y dos bridas con esto se calcula como sigue:

Masa del bocín del molde.

Se tiene que $D_e=430\text{mm}$, $D_i=350\text{mm}$ y $H=290\text{mm}$ con la densidad de 7850 Kg/m^3 , con las ecuaciones 14 y 15 se obtiene:

$$m_{\text{bocin}} = 7850 * \frac{\pi(0.43^2 - 0.35^2) * 0.29}{4} = 111.5 \text{ Kg}$$

Las dimensiones de las bridas son: $D_e=470\text{mm}$, $D_i=430\text{mm}$ y $H=20\text{mm}$, con esto se obtiene la masa de los dos anillos.

$$m_{\text{anillos}} = 7850 * \frac{\pi(0.47^2 - 0.43^2) * 0.02}{4} * 2 = 8.9 \text{ Kg}$$

Entonces:

$$m_{\text{cuerpo del molde}} = 111.5 + 8.9 = 120.4 \text{ Kg}$$

Masa de la placa base.

Las dimensiones son: $D_e=470\text{mm}$, $H=25\text{mm}$ con las ecuaciones 14, 15 y con la densidad de 7850 Kg/m^3 se obtiene:

$$m_{\text{placa base}} = 7850 * \frac{\pi * 0.47^2 * 0.025}{4} = 34 \text{ Kg.}$$

Masa de la tapa superior.

Las dimensiones son: $D_e=470\text{mm}$, $D_i=200\text{mm}$, $H=15\text{mm}$ con las ecuaciones 14, 15 y con la densidad de 7850 Kg/m^3 se obtiene:

$$m_{\text{tapa}} = 7850 * \frac{\pi(0.47^2 - 0.2^2) * 0.015}{4} = 16.7 \text{ Kg.}$$

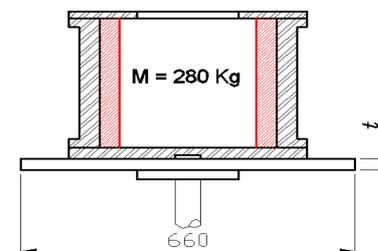
Entonces la masa del molde es:

$$m_{\text{molde}} = 120.4 + 34 + 16.7 = 171.1 \text{ Kg.}$$

Con lo anterior se determina que la masa del molde es de 171.1 Kg, a esto se le suma la masa del bocín la misma que es de 100 Kg, obteniendo un total de 271.1 kg, con esta información se procederá a determinar las dimensiones y masa de la mesa giratoria para una carga de 280 Kg.

Determinación de las dimensiones y masa de la mesa giratoria.

Como ya se determinó que el diámetro de la mesa será de 660mm solo hay que determinar el espesor de la mesa para que pueda soportar una carga de 280 Kg.



ESQUEMA DEL MOLDE CON LA FUNDICIÓN EN SU INTERIOR.

Como se puede observar la mesa es una placa circular que está sometida a una carga uniformemente distribuida sobre un área definida, debido a esta carga la mesa

tendera a flexionar en todos los planos normales a ella, esto difiere de la flexión en una viga que flexiona solamente en un plano, por lo tanto no se puede aplicar las formulas de esfuerzos por deflexión de las vigas, entonces para el análisis de esta placa se utilizará las formulas que se dan en el libro Curso Superior de resistencia de materiales de Seely y Smith para el caso de placas circulares Apoyadas en la zona central y cargadas uniformemente con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{max} = \frac{3\omega r^2}{2t} \left[(1+\mu) \ln \frac{r}{r_o} + \frac{1}{4}(1-\mu) \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \right] \quad Ec.16$$

Donde:

r = radio de la placa.

r_o = radio de la zona central cargada.

t = espesor de la placa.

ω = carga uniforme por unidad de superficie.

μ = modulo de Poisson.

La placa fallara por esfuerzos de flexión y estos se desarrollaran en la superficie, como la placa en este caso la mesa giratoria es fabricada de fundición de acero, podemos asumir las propiedades del acero AISI 1020 que tiene Su = 379 Mpa y Sy = 207 Mpa.

Ahora definimos un factor de seguridad para el cálculo del espesor de la placa, y en este caso se escogerá un valor de 4 porque es el caso de diseño de estructura estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales y análisis de esfuerzos o el ambiente de trabajo.

Para este caso se aplicará el método del esfuerzo de fluencia para esfuerzos estáticos uniaxiales normales en materiales dúctiles, las siguientes ecuaciones aplican el principio de la resistencia de fluencia al diseño:

Para esfuerzo de tensión:

$$\sigma_{max} < \sigma_d = \frac{S_{yt}}{N} \quad Ec.17$$

Para esfuerzo de compresión:

$$\sigma_{max} < \sigma_d = \frac{S_{ct}}{N} \quad Ec.18$$

Para la mayor parte de los materiales dúctiles forjados S_{yt} = S_{ct}.

Para este caso se debe cumplir:

$$\sigma_{max} < \sigma_d = \frac{S_{yt}}{N}$$

$$\sigma_{max} < \frac{S_{yt}}{N} = \frac{207}{4} = 51.75 \text{ Mpa}$$

Ahora se calcula el área de aplicación de la carga la misma que se trata de un círculo

de diámetro 0.47m (470mm) entonces el área es:

$$A = \frac{\pi * 0.47^2}{4} = 0.173 \text{ m}^2. \quad Ec.19$$

Se calcula la fuerza ejercida por la masa de 280Kg, la misma que es:

$$F = m * g \quad Ec.20$$

$$F = 280 * 9.8 = 2744 \text{ N.}$$

Con esto se calcula la fuerza distribuida por unidad de área ω:

$$\omega = \frac{F}{A} \quad Ec.21$$

$$\omega = \frac{2744 \text{ N}}{0.173 \text{ m}^2} = 15861.21 \text{ Pa} = 0.01586 \text{ Mpa.}$$

Teniendo en cuenta que μ para el acero es 0.27, r = 330mm, r_o = 235mm, con estos datos y el valor de σ_{max} = 51.75 Mpa y con la ecuación 16 se calcula el espesor mínimo para t.

Entonces el valor mínimo requerido para t es:

$$51.75 = \frac{3 * 0.01568 * 330^2}{2t} \left[(1 + 0.27) \ln \frac{330}{235} + \frac{1}{4}(1 - 0.27) \left(1 - \frac{235^2}{330^2} \right) \right]$$

$$t = 25.79 \text{ mm} \cong 26 \text{ mm}$$

La mesa es una placa circular que tiene un diámetro exterior D_e = 660 mm (0.66 m), y un espesor t = 26mm (0.026 m), con las ecuaciones 14, 15 y con la densidad de 7850 Kg/m³, se obtiene la masa de la mesa:

$$m_{mesa} = 7850 * \frac{\pi * 0.66^2 * 0.026}{4} = 69.82 \text{ Kg.}$$

El proceso de centrifugado consta de dos etapas, la primera etapa es de llenado y la segunda etapa es de centrifugado, en la primera etapa la velocidad de rotación es de 100 rpm, luego esta velocidad es acelerada hasta llegar a los 875 rpm en un tiempo de 20 segundos, a continuación se presenta una tabla que indica las velocidades y las aceleraciones que se dan en las dos etapas.

ACELERACIONES EN LA ETAPA DE LLENADO Y EN LA DE CENTRIFUGO

Etapas	V (rpm)	V (rpm)	V (rad/seg)	V (rad/seg)	Tiempo (seg)	Aceleración Rad/sg ²
Etapas de llenado	0	100	0	10.47	30	0.35
Etapas de centrifuga	100	875	10.47	91.7	25	3.25

Como se puede observar la aceleración más grande se da en la etapa de

centrifugado, entonces el análisis dinámico se realizará para esta etapa, para esto se utiliza la forma rotacional de la segunda ley de Newton esto es:

$$T = I\alpha \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

T = par de torsión resultante con respecto al centro de masa.

α = aceleración angular.

I = momento de inercia de masa con respecto a un eje que pasa por el centro de masa.

Para este caso $I = 12.2 \text{ kg m}^2$ y $\alpha = 3.25 \text{ Rad/sg}^2$, con esto se calcula el valor del par de torsión necesario para hacer rotar el sistema a la aceleración requerida entonces:

$$T = 12.2 * 3.25 = 39.64 \text{ N * m}$$

Este valor sirve para calcular la potencia del motor necesario para realizar la operación de centrifugación y además sirve para dimensionar exactamente el eje, para calcular la potencia del motor se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = T * \omega \quad \text{Ec. 23}$$

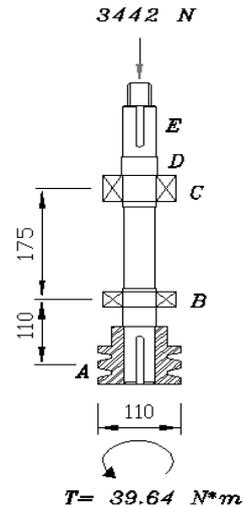
Donde T es el par de torsión en (N*m) y ω es la velocidad angular en (rad/seg), entonces:

$$P = 39.64 * 91.7 = 3635.9 \text{ Watts} = 4.8 \text{ hp}$$

Con esto significa que un motor de 5 hp trabajara normalmente.

Calculo del eje.

Ahora se dimensionará exactamente el eje, para ello se sabe que el eje está montado sobre dos rodamientos el rodamiento C es de rodillos cónicos y el rodamiento B es rígido de bolas el eje soporta una carga axial de 351.2 kg, equivalente a 3442 N que corresponde al peso de la mesa, el acople, el molde y la fundición además existe un par de torsión de 39.64 N*m .



ESQUEMA DE LAS CARGAS APLICADAS AL EJE.

El motor que se encuentra a la disposición dentro de la empresa es un motor de 5 Hp a 1750 rpm, la velocidad a la que debe opera la máquina cuando está trabajando con fundiciones pequeñas debe ser de 1200 rpm, se selecciona una polea de 75mm de diámetro para el motor, y se calcula el diámetro de la polea del eje con la siguiente relación:

$$\omega_m * D_{pm} = \omega_e * D_{pe} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

ω_m Es la velocidad angular del motor.

D_{pm} Es el diámetro de la polea del motor.

ω_e Es la velocidad angular del eje.

D_{pe} Es el diámetro de la polea del eje.

Entonces:

$$D_{pe} = \frac{\omega_m * D_{pm}}{\omega_e} = \frac{1750 * 75}{1200} = 109.3 \cong 110 \text{ mm}$$

Entonces el diámetro de la polea del eje es de 110mm.

Para el caso de transmisión de potencia por medio de bandas V se toma en cuenta las siguientes consideraciones, los dos lados de la banda están en tensión, pero la tensión del lado tenso es mayor a la tensión del lado flojo, entonces existe una fuerza neta sobre las poleas igual a:

$$F_N = F_1 - F_2 \quad \text{Ec. 25}$$

La magnitud de la fuerza impulsora neta se puede calcular con el par torsional transmitido.

$$F_N = \frac{T}{r_p} \quad \text{Ec. 26}$$

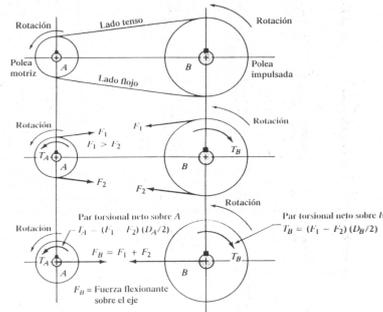
$$F_N = \frac{39.64}{0.055} = 720.72 \text{ N}$$

Donde r_p es el radio de la polea del eje, pero la fuerza de flexión sobre el eje que sostiene la polea es $F_A = F_1 + F_2$

Para este caso se tiene que la relación de $F_1 / F_2 = 5$ y se puede decir que $F_A = C F_N$, haciendo la debida manipulación algebraica se obtiene que:

$$F_A = 1.5 * F_N \quad \text{Ec. 27}$$

$$F_A = 1.5 * 720.72 = 1081 \text{ N}$$

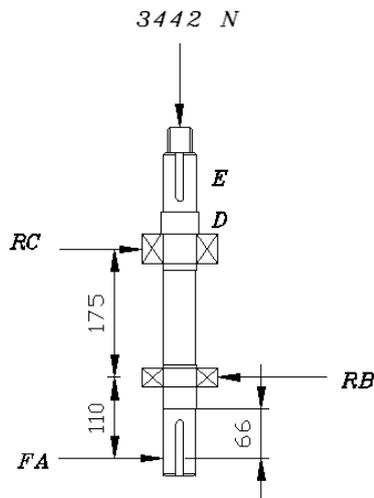


ESQUEMA DE LA FUERZA FLEXIONANTE DEBIDO A LAS BANDAS.
 Ahora se procede a calcular las reacciones en los apoyos, aplicamos sumatoria de momentos en C para calcular la reacción en B y luego con sumatoria de fuerzas encontramos la reacción en B:

$$\sum M_C = 0 \quad \text{Ec. 28}$$

$$F_A * 285 - R_B * 175 = 0$$

$$R_B = \frac{1081 * 285}{175} = 1760.5 \text{ N}$$

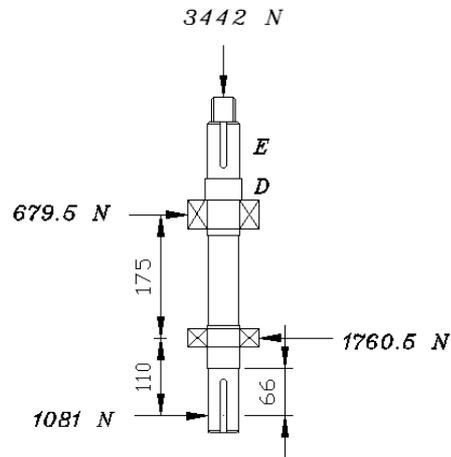


ESQUEMA DE LAS REACCIONES EN EL EJE

$$\sum F_X = 0 \quad \text{Ec. 29}$$

$$F_A - R_B + R_C = 0$$

$$R_C = 1760.5 - 1081 = 679.5 \text{ N}$$



ESQUEMA DE RESULTADOS DE LAS REACCIONES EN EL EJE

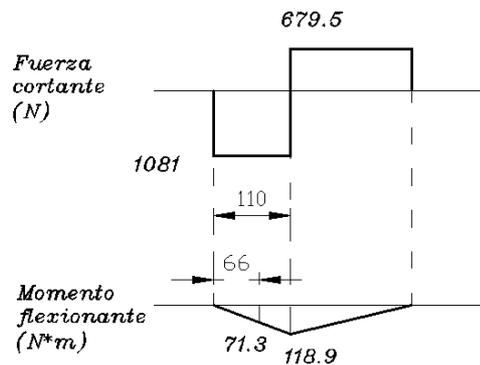


DIAGRAMA DE LA FUERZA CORTANTE Y EL MOMENTO FLEXIONANTE

El material que se utilizará en la construcción del eje es el acero AISI 1020 laminado al caliente, de la tabla del apéndice C-9 del libro de Diseño de máquinas de Robert Norton encontramos que $S_y = 207 \text{ Mpa}$ y $S_{ut} = 379 \text{ Mpa}$, como es un elemento que está en rotación se realiza un análisis de resistencia a la fatiga, para ello se empieza por determinar la resistencia real a la fatiga S_e con la siguiente ecuación:

$$S_e = S_e(C_{carga})(C_{tamaño})(C_{superficie})(C_{temperatura})(C_{confiabilidad}) \quad \text{Ec. 30}$$

$$S_e = 0.5 S_{ut} \quad \text{Ec. 31}$$

$$S_e = 0.5 * 379 = 189.5 \text{ Mpa}$$

La carga es a flexión y a torsión, por lo que $C_{carga} = 1$, asumimos $C_{tamaño} = 1$, con la ecuación (6.7e) del libro de Norton se calcula el valor de $C_{superficie}$. Relativo aun terminado por mecanizado.

$$C_{superficie} = A(S_{ut})^b \quad \text{Ec. 32}$$

Los valores de A y b se encuentran en la tabla 6-3 del libro de Norton, los mismos que son: A = 4.51 y b = -0.265 con esto Csuperficie = 0.93, la temperatura no es elevada por lo que Ctemperatura = 1, se considera una confiabilidad del 90% de la tabla 6-4 del libro de Norton Cconfiabilidad = 0.897 con todo esto se tiene que:

$$S_e = 189.5 * (1)(1)(0.93)(1)(0.897) = 158.1 \text{ Mpa}$$

Se supone que el factor de diseño es N=4 porque se espera que el sistema debe manejar cargas de tamaño grande esto implica que en algunos casos existirá algo de vibración en el sistema.

La sensibilidad a la muesca del material se determina ya sea usando la ecuación 6.13, o la figura 6-36, y es q = 0.5 para un radio de muesca supuesto de 0.25mm.

El factor de concentración de esfuerzos a la fatiga se determina a partir de la ecuación 6.11b, y conforme al factor geométrico de concentración de esfuerzos (Kt) supuestos para este caso los mismos que son: 3.5 para los radios del escalón a flexión, 2 para los radios del escalón a torsión y 4 para los cuñeros.

Para analizar cada parte del eje nos valemos de la ecuación (9.6a) del libro de Norton:

$$D = \left[\frac{32N_f}{\pi} \sqrt{\left(K_f \frac{M}{S_e}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(K_{fsm} \frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3}$$

Donde:

Nf factor de seguridad a la fatiga.

Kf factor de concentración de esfuerzos a la fatiga debido a flexión.

M momento.

Se límite de resistencia a la fatiga corregida.

Kfsm factor de concentración de esfuerzos a la fatiga debido a torsión.

T par de torsión.

Sy límite de fluencia elástico.

En el punto A, justo en el escalón donde descansa la polea el momento no es cero y tiene un valor de 71.3 N*m, y el par torsional es constante, la polea se instala con una cuña y un perno por la parte inferior para evita que se salga de su posición de trabajo, el factor de concentración de esfuerzos para un cuñero por fatiga a flexión en el punto A Se calcula con la ecuación 6.11b de Norton como sigue:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{Ec. 34}$$

$$K_f = 1 + 0.5(4 - 1) = 2.5$$

Para este caso el factor de concentración de esfuerzos para un cuñero por fatiga a torsión K_{fsm} es el mismo que K_f , entonces $K_{fsm} = 2.5$

$$D_A = \left[\frac{32 * 4}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2.5 * 71.3}{158.1 * 10^6}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{2.5 * 39.64}{207 * 10^6}\right)^2} \right]^{1/3} = 0.0366 \text{ m} = 36.6 \text{ mm}$$

En el punto B el momento flexionante es máximo y el par torsional es constante, los factores de concentración de esfuerzo por fatiga para un escalón debido a flexión y torsión son:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0.5(3.5 - 1) = 2.25$$

$$K_{fsm} = 1 + q(K_{ts} - 1) = 1 + 0.5(2 - 1) = 1.5$$

$$D_B = \left[\frac{32 * 4}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2.25 * 118.9}{103.28 * 10^6}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{1.5 * 39.64}{207 * 10^6}\right)^2} \right]^{1/3} = 0.0412 \text{ m} = 41.2 \text{ mm}$$

En el punto C no existe momento solo existe un par torsional constante por debajo de un escalón

El factor de concentración de esfuerzos para un escalón cargado a torsión se calcula como sigue:

$$K_{fsm} = 1 + q(K_{ts} - 1) = 1 + 0.5(2 - 1) = 1.5$$

$$D_C = \left[\frac{32 * 4}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4}\left(\frac{1.5 * 39.64}{207 * 10^6}\right)^2} \right]^{1/3} = 0.0215 \text{ m} = 22 \text{ mm}$$

El punto D del eje está sometido a un par de torsión constante y a una carga axial.

Para este caso la inclusión de la carga axial en los cálculos complicaría grandemente la solución, además que los esfuerzos que se genera por la carga axial es relativamente pequeños comparados con los esfuerzos flexionante, también el hecho que el esfuerzo sea de compresión mejora el funcionamiento del eje por fatiga.

El factor de concentración de esfuerzos para un escalón cargado a torsión se calcula como sigue:

$$K_{fsm} = 1 + q(K_{ts} - 1) = 1 + 0.5(2 - 1) = 1.5$$

$$D_D = \left[\frac{32 * 4}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4}\left(\frac{1.5 * 39.64}{207 * 10^6}\right)^2} \right]^{1/3} = 0.0215 \text{ m} = 22 \text{ mm}$$

El punto E del eje está sometido a un par de torsión constante y a una carga axial.

Se realiza el mismo razonamiento con respecto a la carga axial, en este punto existe un cuñero entonces el factor de concentración de esfuerzos para un cuñero cargado a torsión se calcula como sigue:

$$K_{fsm} = 1 + q(K_{ts} - 1) = 1 + 0.5(4 - 1) = 2.5$$

$$D_E = \left[\frac{32 * 4}{\pi} \sqrt[3]{\frac{2.5 * 39.64}{207 * 10^6}} \right]^{1/3} = 0.0257 \text{ m} = 26 \text{ mm}$$

En resumen los diámetros mínimos que se requieren para las diversas partes del eje son:

$$D_A = 36.6 \text{ mm.}$$

$$D_B = 41.2 \text{ mm}$$

$$D_C = 22 \text{ mm.}$$

$$D_D = 22 \text{ mm.}$$

$$D_E = 26 \text{ mm.}$$

Como se puede observar el diámetro que sobresale es el punto B en donde existe el máximo momento de flexión acompañado del par de torsión.

Para la construcción del eje se busca las dimensiones en un catalogo y se encuentra que la medida más apropiada es un eje con 51 mm de diámetro, esta medida servirá de base para el tramo D en donde el diámetro decidido para la construcción es de 50 mm.

Ahora analizando los puntos B y C en donde van acoplados los rodamientos y buscando las dimensiones de los rodamiento en un catalogo de la empresa NTN se observa que un rodamiento de diámetro exterior de 100mm se acopla a la chumacera existente, entonces se selecciona un rodamiento con el diámetro interno de 45mm, luego se verificará si este rodamiento es el adecuado, con esto los diámetros en los tramos B y C será de 45mm.

En el tramo A del eje en donde va acoplada la polea se decide que el diámetro debe ser de 40mm, con esto queda una escalón de 2,5 mm para que descansa la polea, finalmente el tramo E en donde va ubicada el acople se decide que el diámetro será de 42 mm y de esta manera se obtiene un escalón de descanso de 4mm. Ahora se calculará los verdaderos factores de seguridad para cada parte del eje con la siguiente formula despejada de la ecuación 9.6 de Norton.

$$N = \frac{D^3 \pi}{\sqrt{\left(K_f \frac{M}{S_e}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fsm} \frac{T}{S_y}\right)^2}} * 32$$

Ec. 35

$$N_A = 5.23$$

$$N_B = 5.23$$

$$N_C = 35.96$$

$$N_D = 49.33$$

$$N_E = 17.54$$

A continuación una tabla con los valores calculados.

VALORES CALCULADOS

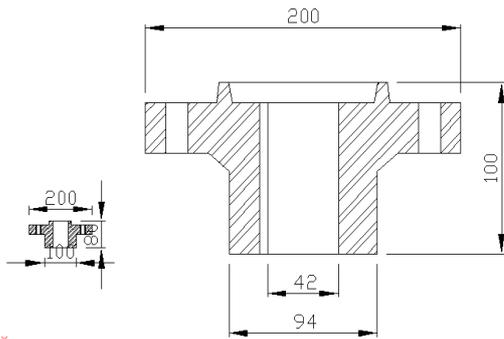
Sección de eje	Diámetro calculado (mm)	Factor de seguridad calculado	Diámetro utilizado(mm)	Factor de seguridad final
A	36.6	4	40	5.23
B	41.2	4	45	5.23
C	22	4	45	35.96
D	22	4	50	49.33
E	26	4	42	17.54

Calculo del acople de la mesa al eje.

Este es un elemento que se fabricó por medio de fundición en acero y las dimisiones se las determino por relación de tamaños y las dimensiones que se dieron fueron las siguientes. La carga que debe soportar este elemento es la carga de la mesa, el molde y la fundición, esta carga es 350 Kg que corresponde a una fuerza de 3430 N.



MOLDE DONDE SE FUNDIÓ EL ACOPLE.



ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DEL ACOPLER.

Para calcular el esfuerzo de compresión al que está sometido este elemento se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 36}$$

Considerando el área más pequeña que corresponde a un anillo de diámetro exterior de 50 mm y un diámetro interno de 42mm entonces el área es:

$$A = \frac{\pi * (50 - 42)^2}{4} = 50.26 \text{ mm}^2$$

Entonces el esfuerzo es:

$$\sigma = \frac{3430}{50.26} = 68.24 \text{ Mpa}$$

Calculando el factor de seguridad:

$$N = \frac{207}{68.24} = 3$$

Como se puede observar el elemento tiene un factor de seguridad de 3 y esto en el límite de su capacidad de carga para valores menores de carga este factor mejora.

Por último se calculara la capacidad de transmisión de torsión de los cuatro pernos de 1/2 pulgada que se utilizo en el acople y la mesa, se utiliza pernos grado SAE 5 con una resistencia a la fluencia $\sigma_y = 558.5 \text{ Mpa}$. Entonces el esfuerzo permisible en cortante es:

$$\tau_{perm} = 0.5 * \sigma_y \quad \text{Ec. 37}$$

$$\tau_{perm} = 558.5 * 0.5 = 279.4 \text{ Mpa}$$

El perno de 1/2 tiene un diámetro menor de 10 mm entonces:

$$A = \frac{\pi * 10^2}{4} = 78.5 \text{ mm}^2$$

La fuerza permisible en un perno es:

$$F = A * \tau_{perm} \quad \text{Ec. 38}$$

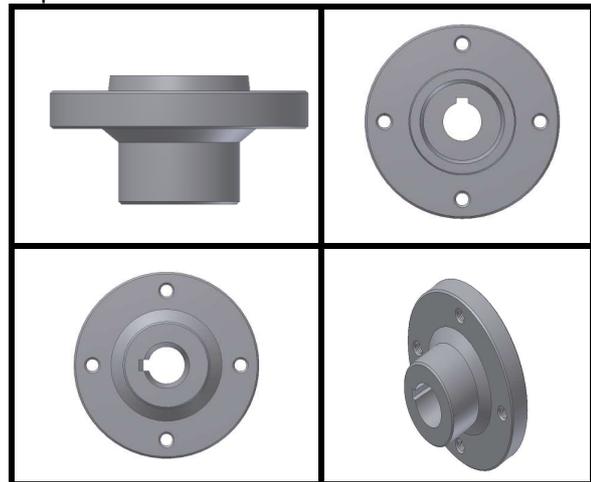
$$F = 78.5 * 279.4 = 21932 \text{ N}$$

Como existen cuatro pernos a una distancia de 80 mm desde el centro del eje el Par de torsión permisible es:

$$T_{perm} = F * d * n \quad \text{Ec. 39}$$

$$T_{perm} = 21932 * 0.08 * 4 = 7018 \text{ N.m}$$

El par de torsión calculado anteriormente para la operación de centrifugado fue de 39.64 N.m esto quiere decir que los pernos nunca fallaran por cortante y menos aun por tensión.



DIVERSAS VISTA DEL ACOPLER REALIZADAS EN INVENTOR 2008.

Selección de rodamientos.

En el sistema que se ha diseñado van acoplados dos rodamientos, el rodamiento que va ubicado en el punto C del eje es un rodamiento que soportara cargas combinadas una carga axial y una carga radial, el rodamiento que va ubicado en el punto B es un rodamiento que soportará solamente una carga radial. Ambos rodamientos tienen las mismas dimensiones, ambos tienen un diámetro exterior de 100 mm y un diámetro interior de 45mm.

Con estos datos se consultó un catalogo de rodamientos de la empresa NTN y se encontró que el rodamiento más apropiado para el punto C es un rodamiento de rodillos cónicos de una hilera el mismo que tiene la siguiente referencia **4T-32309U**, y para el punto B se encontró que el rodamiento más apropiado es un rodamiento rígidos de bolas el mismo que tiene la siguiente referencia **6309**.

Ahora se analizará cada uno de estos rodamientos para comprobar que son los indicados y calculamos la vida útil de cada uno de ellos.

Para el rodamiento de rodillos cónico 4T-32309U la carga de trabajo que soportará es una carga axial $F_a = 3620$ N que es el peso de todo el sistema rotatorio y una carga radial $F_r = 600$ N, y trabajará a una velocidad máxima de 1200 rpm, siguiendo el procedimiento mostrado en el libro de Norton se procede de la siguiente manera.

Del catalogo se toma los valores de la carga dinámica $C_r = 154000$ N, de la carga estática $C_{or} = 191000$ N, y la velocidad admisible es de 4000 rpm, estos valores están muy por encima de las cargas aplicadas esto significa que este rodamiento trabajara sin problema dentro del sistema, ahora se calcula su vida a la fatiga expresada en millones de revoluciones.

En el catalogo se encuentra que el valor de $e=0.35$, para este rodamiento y se calcula la siguiente relación.

$$\frac{F_a}{VF_r} = \frac{3620}{1(600)} = 6 > e = 0.35 \quad \text{Ec. 40}$$

Cuando el anillo interior es rotatorio el valor de V es 1.

Para calcular la carga equivalente dinámica utilizamos la formula:

$$P_r = XF_r + YF_a \quad \text{Ec. 41}$$

Los valores de X y Y dependen del valor de e, para la relación $F_a/VF_r > e$, en el catalogo los valores de $X=0.4$ y $Y=1.74$

$$P_r = 0.4 * 600 + 1.74 * 3620 = 6538.8$$

Con la siguiente formula se calcula la vida a la fatiga aplicada a rodamientos de rodillos expresada en millones de revoluciones:

$$L = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^{10/3} \quad \text{Ec. 42}$$

$$L = \left(\frac{154000}{6538.8} \right)^{10/3} = 3.74E4 = 3.74E10 \text{ revoluciones.}$$



CHUMACERA Y EL RODAMIENTO CÓNICO.

Para el rodamiento rígido de bolas 6203 la carga de trabajo que soportara es una carga radial de 1554.5 N y trabajara a una velocidad máxima de 1200 rpm, siguiendo el procedimiento mostrado en el libro de Norton se procede de la siguiente manera.

Del catalogo se toma los valores de la carga dinámica $C_r = 53000$ N, de la carga estática $C_{or} = 32000$ N, y la velocidad admisible es de 7000 rpm, estos valores están muy por encima de las cargas aplicadas esto significa que este rodamiento trabajara sin problema dentro del sistema, ahora se calcula su vida a la fatiga expresada en millones de revoluciones.

Como no existe carga axial el valor de P_r es el mismo de la carga radial, entonces se procede directamente a utilizar la siguiente fórmula para calcular la vida a la fatiga.

$$L = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^3 \quad \text{Ec. 43}$$

$$L = \left(\frac{53000}{1554.5} \right)^3 = 3.96E4 = 3.96E10 \text{ revoluciones.}$$

Cálculo y adaptación del sistema de agua de enfriamiento.

Si los moldes no se enfrían por algunos medios estos llegarían gradualmente a temperaturas muy elevadas, dependiendo de la tasa de producción. Utilizar aire para el enfriamiento de moldes es muy ineficaz y sólo se usa para tasas de producción muy bajas.

El enfriamiento por medio de agua es muy eficaz y puede permitir altas producciones, prácticamente todos los tipos de máquinas de fundición centrífugas utilizan bombas de agua para enfriar el diámetro externo del molde. Este método es bastante eficaz quitando el calor del molde así como manteniendo una temperatura deseada del molde.

La práctica usual para utilizar bomba de agua para el enfriamiento puede ser automáticamente o manual, se prende la bomba inmediatamente después de la realización de la operación vaciado. El agua puede salirse entonces adelante y después puede apagarse automáticamente, por medio de un cronómetro, si lo desea.

Naturalmente, durante el período de fundición el molde absorberá el calor del metal fundido, mientras aumenta la temperatura del molde así. El agua de enfriamiento extrae el calor del molde para que los dos puedan ser equilibrados para mantener una temperatura **promedia global**. Debe tenerse presente que, mientras la temperatura del molde subirá después de que el metal se ha vertido allí, disminuirá debajo de la temperatura media de operación si el agua se sale adelante durante un largo tiempo.

Cálculos.

Antes de empezar con los cálculos hay que tomar en cuenta que la empresa cuenta ya con una torre de enfriamiento, sistema enfriamiento en la torre, las bombas y el sistema de tuberías que ya fueron diseñadas para el funcionamiento de una centrifugadora horizontal que existe en la empresa, para la instalación de la centrifugadora vertical se tomo una derivación de la tubería para el sistema de enfriamiento.



TORRE DE ENFRIAMIENTO



SISTEMA DE RADIADORES UBICADOS EN LA PARTE SUPERIOR DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

La torre de enfriamiento se encuentra a una altura de 3.5 m, entonces la presión por gravedad en el sistema se la calcula con la siguiente fórmula:

$$P = \rho * g * h \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

P = Presión (Pa).

ρ = Densidad (Kg/m³).

g = Aceleración de la gravedad (m/sg²).

h = Altura del sistema (m).

$$P = 1000 * 9.8 * 3.5 = 34300 \text{ Pa.}$$

Esta presión expresada en Psi se tiene que la presión de del sistema es 5 Psi, pero en el sistema existe una bomba de 2 Hp que aumenta esta presión a 16 Psi, el tubo que se utilizó para la alimentación de agua hacia la máquina es 1" NPT el mismo que tiene un diámetro exterior de 33mm y un diámetro interno de 27mm, este diámetro se reduce a un tubo de 1/2 " NPT el mismo que tiene un diámetro de 17 mm, el caudal que se midió del sistema es de 3.5E-4 m³ /sg, el caudal sin la bomba es de 1.37E-4 m³/sg.

Con estos datos se diseñara el sistema interno de enfriamiento para la máquina, pero antes se realizara un balance de energía para determinar cuánto calor existe en el sistema y cuanto calor hay que retirar. Prácticamente lo que se tiene es un molde de sección circular en el que se ha depositado un metal fundido en este caso es el bronce el mismo que esta a una temperatura de 950°C y considerando que hay que bajar la temperatura hasta aproximadamente 100 °C, entonces el calor que hay que retirar es:

$$Q = m * c_p * \Delta t \quad \text{Ec. 45}$$

Donde:

M = Masa de metal fundido (Kg)

C_p = Poder calorífico del bronce (W/m*K)

Δt = Diferencias de temperatura (K)

M= 100Kg

C_p =355 J/Kg*K.

Δt = 850.

$$Q = 100 * 355 * 850 = 3.02E7 \text{ Julios.}$$

Este calor es el mismo que se retirara por medio de chorros de agua. En la practica la temperatura a la que debería estar el molde para su retiro de la máquina esta alrededor se los 100°C la cual es una temperatura manejable en este tipo de trabajos. Para calcular la cantidad de agua que hay que utilizar para evacuar este calor hasta una temperatura de 100°C se utiliza la misma fórmula del calor pero esta vez aplicada para el agua y considerando que el incremento en la temperatura del agua al rededor de 50°C.

C_p = 4186 J/Kg*K .

Δt = 50.

$$m = \frac{Q}{C_p \Delta t} \quad \text{Ec. 46}$$

$$m = \frac{3.02E7}{4186 * 50} = 144 \text{ Kg}$$

A esta cantidad de agua hay que multiplicarle por un factor de corrección ya que solo una parte del agua que sale de las boquillas realizan el trabajo de enfriamiento, durante la práctica que se realizó se puede estimar este factor de corrección a un valor de 2, entonces la cantidad de agua que se necesitó para enfriar 100 kg de fundición es 288 kg de agua.

El sistema de enfriamiento que se diseñó consta de un anillo circular de tubo el mismo que tiene 3 columnas de tubos ubicados a 120° y en cada columna hay 6 boquillas y en total existe 18 boquillas para no perder mucha presión se realizó un cálculo en función del diámetro del tubo para determinar el diámetro adecuado en las boquillas, el diámetro interior del anillo circular es de 16mm, entonces el área de la boquilla es igual al área del tubo dividido para 18.

$$A_{boquilla} = \frac{\pi * 16^2}{4 * 18} = 11.17 \text{ mm}^2$$

$$D_{boquilla} = \sqrt{\frac{11.17 * 4}{\pi}} = 3.7 \text{ mm}$$

Pero para aumentar un poco la velocidad del agua las boquillas se construyeron con un diámetro de 3mm.



ETAPA DE CONSTRUCCIÓN ANILLO CIRCULAR PARA ENFRIAMIENTO



TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN Y DRENAJE DE AGUA



PROCESO DE ENFRIAMIENTO CON EL DISEÑO PROPUESTO

Por último se calculó el tiempo de enfriamiento en función del caudal y la masa de agua que se emplea en el enfriamiento, el caudal es $3.5E-4 \text{ m}^3/\text{sg}$ y la masa de agua es 288 kg, para ello calculamos el caudal másico de agua como sigue:

$$\dot{Q} = Q * \rho \quad \text{Ec. 46}$$

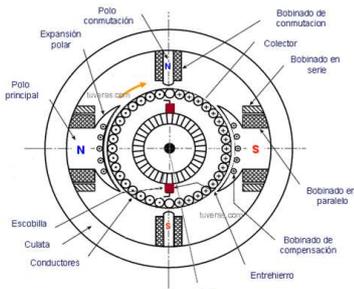
$$\dot{Q} = 3.5E-4 \frac{\text{m}^3}{\text{sg}} * \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{m}^3} = 0.35 \frac{\text{Kg}}{\text{sg}}$$

$$t = \frac{m}{\dot{Q}} \quad \text{Ec. 47}$$

$$t = \frac{288}{0.35} = 823 \text{ sg} = 13 \text{ minutos.}$$

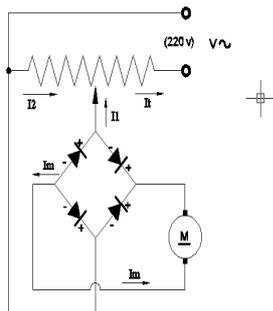
Adaptación de motor de corriente continua y variador de velocidad

Se optó por un motor de corriente continua tipo serie debido a que estos motores poseen un gran torque de arranque y su control de velocidad es relativamente fácil, además, dado que se tenía a la mano un reóstato y un rectificador industrial compatibles con la potencia del motor, se los empleó para su control de velocidad. En la siguiente figura se describen las partes de un motor de corriente continua:



PARTES CONSTITUTIVAS DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.

El esquema de la instalación empleada es el siguiente:



ESQUEMA ELÉCTRICO.

La adaptación realizada en el motor se debe a que este fue diseñado para trabajar con su eje en posición horizontal, pero debido a que trabajaría en posición vertical, se analizó las consecuencias de este cambio y se concluyó que el rodamiento inferior, que es el del lado de la polea (motriz) iba a ser afectado por una fuerza axial, que no fue considerada en la selección del rodamiento suministrado por el fabricante, el rodamiento que estaba acoplado era un rodamiento rígido de bolas y su referencia es 6207.

Se consideró el ciclo de operación variable y el peso del rotor para seleccionar un rodamiento de bolas de contacto angular el mismo que es un rodamiento diseñado para soportar cargas combinadas y cargas puramente axiales en una sola dirección, se empleó el manual de la NTN [5], y basado en que no se podían cambiar las dimensiones de la cajera se seleccionó el rodamiento 7207B, el mismo que supera con demasía la carga considerada.

Debido a que el rodamiento seleccionado tiene exactamente las mismas dimensiones solo se procedió a cambiar el uno por el otro y con esto el motor quedó adaptado para su operación en las condiciones reales de trabajo, sin afectar las

características estructurales de su diseño original.

El motor está montado en el bastidor de la máquina por medio de pernos de 1/2 pulgada de acero grado 5 sobre una placa abatible con la finalidad de poder tensionar las bandas, los detalles del montaje del motor se encuentra en el ítem 2.4 de este capítulo.

PUESTA EN MARCHA Y PRUEBAS DE CENTRIFUGACIÓN DE BOCINES DE BRONCE SAE 40.

Antes de empezar con la ejecución de este capítulo se hará una aclaración acerca de la utilización del bronce de prueba. En esta tesis se iba a estudiar el comportamiento del bronce SAE 40 en el proceso de fundición centrífuga, pero por razones de conveniencia se las realizó con el bronce SAE 64 el mismo que se estaba procesando dentro de la empresa en grandes cantidades en el momento de la realización de dichas pruebas y se las utilizó para este estudio.

Las pruebas con carga se realizaron fundiendo aluminio a diferentes velocidades para comprobar cómo mejoraba el tamaño de grano en función de la velocidad de rotación del molde, finalmente se realizaron las pruebas con el bronce SAE 64 de igual manera se realizaron varias pruebas para poder comparar como varían las propiedades en función de la velocidad de rotación.

Características de moldes metálicos para proceso de fundición centrífuga

En el proceso de fundición centrífuga la utilización de moldes metálicos es la mejor opción cuando se requiere una alta tasa de producción los moldes pueden ser fabricados en fundición gris como en acero, los moldes fabricados en fundición gris tiene su limitación a piezas grandes en donde no es práctico ni económico la utilización del acero también tiene su limitación porque este material no es propenso a ser enfriado por medio de chorros de agua por esta razón se recomienda que cuando se utilicen moldes de fundición gris se le dé el menor caudal posible para evitar los choques térmicos y evitar que el molde se fracture, también es recomendable que el molde siga rotando durante el enfriamiento para así poder utilizar el poder convectivo del aire que se genera por las partes en rotación, como una sugerencia técnica de los expertos en

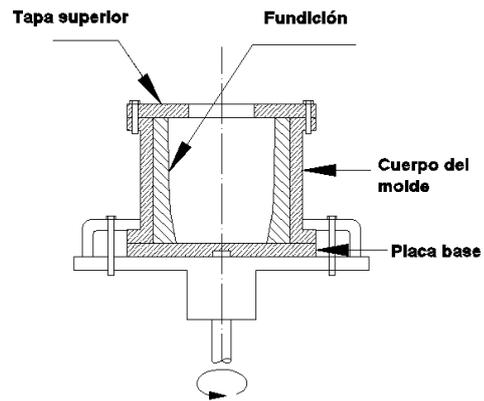
fundición centrífuga ellos sugieren que si se va a utilizar moldes de fundición gris estos también deben ser procesados por centrifugación para garantizar que tengan una resistencia mínima a la tracción de 36000 PSI con grano fino y con esta condición existe menor riesgo de fisuras por choque térmico.

Los molde fabricados en acero son los más recomendables para procesos de fundición centrífuga, tienen su ventaja por el hecho que no tienen problemas al ser enfriados por medio de agua así como su coeficiente de dilatación térmica mayor que la del hierro gris ayuda al retiro de la pieza fundida, es decir que el metal fundido al enfriarse se contrae más que el acero de tal manera queda una holgura entre la pieza y el molde, sin embargo es recomendable fabricar los moldes con una cierta conocidad en su diámetro interno, para facilitar más aun el retiro de la pieza fundida. Los aceros más recomendables para la fabricación de moldes metálicos se presentan a continuación.

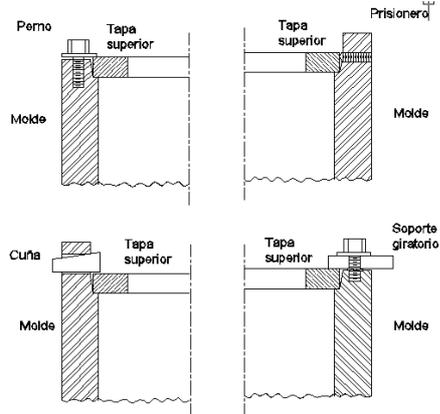
Con respecto a la forma del molde este está formado por tres partes principales, las mismas que son: el cuerpo del molde, la placa base y la tapa superior

El cuerpo tiene forma cilíndrica pero en sus extremos tiene bridas que sirven para poder sujetar el molde a la mesa y la tapa al molde, la placa base es una placa circular que tiene por la parte inferior una guía que sirve para que el molde quede perfectamente centrado en la mesa, la tapa superior es otra placa circular en forma de arandela la misma que sirve para la entrada del metal fundido, esta tapa puede ser sujeta al molde de diferentes maneras aquí mencionamos las más comunes.

Estas pueden ir emperrada directamente al molde como en el caso de esta tesis, puede ser sujeta a través de cuñas, con prisioneros y finalmente también puede ser sujeta a través de soportes giratorios, a continuación un esquema de lo anterior.



ESQUEMA DE LAS PARTES DE UN MOLDE PARA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.



DIFERENTES FORMAS DE SUJETAR LA TAPA SUPERIOR.



MOLDE INSTALADO EN LA MESA GIRATORIA.

Pruebas en vacío del equipo, evaluación y correctivos.

PROBLEMA 1

Una vez ensamblada la máquina y anclada en el lugar de trabajo se procedió a la evaluación de los mecanismos para comprobar el buen funcionamiento de todo el sistema, uno de los primeros problemas que se encontró en las pruebas fue el desbalance que presentó la mesa giratoria, la misma que fue fabricada por fundición en acero y se incluyó nervaduras en su parte inferior para rigidizarla, luego se la mecanizó a la medida por la parte superior, pero por la parte inferior donde se le había

colocado las nervaduras uno de esos sectores quedo con mas masa que los demás, entonces para solucionar el problema se procedió a realizar un balanceamiento estático, que se realizó en la misma empresa y este proceso consistió en retirar el material de desbalance por medio de perforaciones que se aplico en las parte afectadas.

Para el proceso de balanceamiento se utilizó todo el sistema rotatorio de la máquina pero se lo dispuso de manera horizontal para poder detectar en donde existía exceso de material, Luego de superar este inconveniente se procedió a instalarlo nuevamente en la máquina,

Mesa para proceso de balanceamiento.- está dispuesta horizontalmente para el proceso de balanceamiento, se puede apreciar las nervaduras rigidizantes que provocaron el desbalanceamiento.

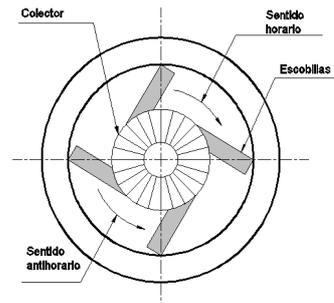


MESA YA BALANCEADA

Se aprecia en esta foto las perforaciones realizadas para alcanzar el balanceamiento.

PROBLEMA 2

Otro problema que se presento fue el sentido de rotación del motor, parecía que el sentido de rotación no era muy importante y se dispuso que la rotación sea en sentido horario, esta disposición en las primeras prueba no daba problemas ya que la velocidad que se empleaba no era más de 600 rpm, pero en el momento que esta velocidad aumentaba el motor comenzaba a botar chispas por el colector en donde van las escobillas, para poder detectar la falla se tuvo que bajar el motor y abrirlo, lo que se determino es que el colector y las escobillas tenían una disposición en ángulo formando aproximadamente unos 70° con respecto a los ejes de simetría, tal como se aprecia en la figura 3.7.



ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS ESCOBILLAS Y SU RELACIÓN AL SENTIDO DE ROTACIÓN CORRECTO.

Cuando la rotación era de sentido horario se producía un golpeteo entre las ranuras del colector y las puntas de las escobillas y esto era lo que producían las chispas, la solución fue cambiar el sentido de rotación, al final la máquina quedo con sentido de giro anti horario con esto se alcanzo la velocidad máxima de la máquina la misma que es de 1300 rpm.

PROBLEMA 3

Con respecto al motor se tuvo el problema de que el motor iba a funcionar de manera vertical, cuando este fue diseñado para trabajar horizontalmente en primera instancia se analizo cuales serian las consecuencia de este cambio de posición de trabajo, se determino que en lo eléctrico no tendría problemas pero en la parte mecánica y sobre todo de que se trata de un motor grande con una masa aproximada de 50Kg se determinó que el rodamiento que estaba instalado no era el adecuado ya que este era un rodamiento rígido de bolas el cual soporta grandes cargas radiales y moderadas cargas axiales,.

Trabajando verticalmente la carga axial aumenta considerablemente y la solución para este caso fue el de cambiar el rodamiento existente por uno equivalente que trabaje de mejor manera con la carga axial, revisando el catalogo de rodamientos de la empresa NTN se determinó que un rodamiento de bolas de contacto angular era el más recomendable para esta situación, la capacidad de carga de este rodamiento es mayor con respecto al anterior, esto nos da la seguridad de que el motor trabajara confiablemente.



POSICIÓN VERTICAL DE TRABAJO PARA EL MOTOR.

PROBLEMA 4

Un problema adicional se presentó con respecto a la nivelación de la máquina,

No se tomó en cuenta el desnivel que podría tener el piso y se ancló la máquina directamente al piso, durante las pruebas y ya con la mesa balanceada, se detectó que cuando la velocidad llegaba alrededor de las 900 rpm se presentaban vibraciones, en primera instancia se refinó un poco más el balanceamiento pero el problema seguía, con la ayuda de un nivel y se comprobó que la mesa tenía un desnivel, para reparar este problema se colocó unos pernos de 1 pulgada de diámetro en cada apoyo, tal como se ve en la siguiente fotografía

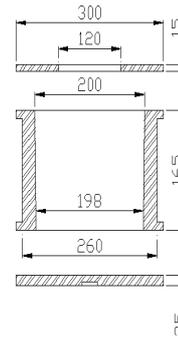


SISTEMA DE NIVELACIÓN DE LA MÁQUINA CON PERNOS.

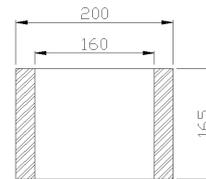
Control de propiedades por medio de: Ensayo de tracción, ensayos de dureza y análisis microscópico.

Ahora se describirá la forma en que se realizaron las diferentes pruebas para observar el comportamiento de la máquina en producción, determinar los parámetros de funcionamiento y para elaborar un programa de operación el mismo que servirá de guía para las personas que operarán esta máquina en el futuro.

Tomando como diámetro interior del molde 200mm, se determinó que el espesor de pared es 30mm.



ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DEL MOLDE QUE SE EMPLEO EN LAS PRUEBAS.

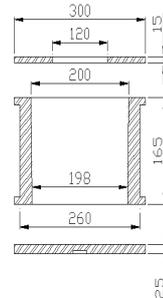


ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DEL BOCÍN DE

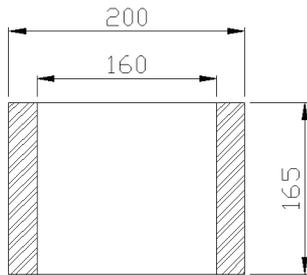
Control de propiedades por medio de: Ensayo de tracción, ensayos de dureza y análisis microscópico.

Ahora se describirá la forma en que se realizaron las diferentes pruebas para observar el comportamiento de la máquina en producción, determinar los parámetros de funcionamiento y para elaborar un programa de operación el mismo que servirá de guía para las personas que operarán esta máquina en el futuro.

Para las pruebas se construyó el molde en acero AISI 1020 las dimensiones que se consideraron para las pruebas fueron para un bocín de diámetro exterior de 200mm, diámetro interior de 160mm y una altura de 165 mm, para determinar el espesor de pared del molde se utilizó el diagrama de la figura 2.15, tomando como diámetro interior del molde 200mm, se determinó que el espesor de pared es 30mm.



ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DEL MOLDE QUE SE EMPLEO EN LAS PRUEBAS.



ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DEL BOCÍN DE PRUEBA.



MOLDE Y LA FUNDICIÓN DE PRUEBA EN ALUMINIO.

Las primeras pruebas de la máquina se trabajo con aluminio, se realizaron tres centrifugaciones a diferentes Factores de fuerza de gravedad (FG), la primera prueba se la realizo a 75 FG, la segunda prueba se la realizo a 120 FG y la última prueba se la realizo a 200 FG, el objeto de estas pruebas es comparar como mejora el tamaño de grano en la microestructura y las propiedades del material, al mismo tiempo se registraron los pasos, procedimientos y tiempos que se utilizaron en la operación de centrifugación.

Antes de realizar las pruebas de centrifugación se procede a calcular la

velocidad de rotación para cada una de las pruebas para ello se utiliza la ecuación 5 como sigue:

$$N = 42.3 \sqrt{\frac{FG}{D}}$$

Donde:

D = Diámetro interior del molde (m)

N = Velocidad rotacional en (RPM).

FG= Es la relación de fuerza centrífuga dividida por el peso o número de veces de la fuerza de gravedad.

PRUEBAS EN ALUMINIO A DIFERENTES FACTORES DE GRAVEDAD.

Material	FG	RPM
Aluminio	75	820
Aluminio	120	1036
Aluminio	200	1337

Con el análisis realizado en el capítulo 2 ítem 2.6 se elabora el siguiente diagrama de tiempos de enfriamiento en función de la masa de la fundición y el material a fundirse, los materiales que se consideraron para el diagrama son: el aluminio y el bronce, hay que tener en cuenta que la capacidad de carga de la máquina es de 100 Kg en bronce y 50 Kg en aluminio.

Una vez determinada la velocidad de rotación y el tiempo de enfriamiento se procede a la ejecución de la centrifugación para ello se debe seguir los siguientes pasos:

Preparación de la aleación.

Fusión del metal.

Ubicación del molde en la máquina.

Pre calentamiento del molde hasta alcanzar una temperatura de 200°C.

Pre calentamiento de la tobera de llenado.

Arrancar la máquina hasta 100 rpm.

Colado del metal dentro del molde.

Aceleración hasta la velocidad de centrifugado, la aceleración debe ser suave y uniforme.

Abrir la llave de agua.

Encender la bomba.

Esperar que se cumpla el tiempo de enfriamiento.

Desmontaje.

Ubicación del molde para una nueva operación.

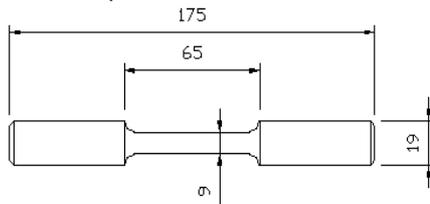
A continuación se presentan unas fotografías del momento del desmontaje de la pieza fundida.



DESMONTAJE DE LA PIEZA FUNDIDA DE ALUMINIO

Ensayos realizados a las probetas de aluminio como prueba preliminar.

Luego de ser obtenida la parte de fundición se procede al mecanizado para poder observar el acabado superficial y la buena simetría que se obtiene con este método de fundición centrífuga. Una vez comprobada la simetría y el buen acabado superficial se procede a cortar el bocín para elaborar las probetas calibradas para realizar el ensayo de tracción las mismas que están normalizadas por la norma ASTM E8-08, estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales (LEMAT) de la facultad de Ingeniería Mecánica. Las medidas de la probeta normalizadas se las muestran en el siguiente esquema:



ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM E8-08



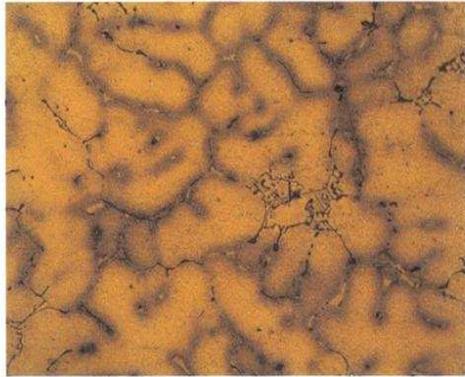
ETAPAS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCIÓN, DUREZA Y METALOGRAFÍA EN LAS PRUEBAS DE ALUMINIO.

DESIGNACIÓN PROBETA	Espesor (mm)	Area (mm ²)	Esfuerzo Máximo (N/mm ²)	Esfuerzo Rotura (N/mm ²)	Esfuerzo Fluencia (N/mm ²)	Elongación (%)
Fundición Aluminio en arena	9,24	268,22	116,140	112,393	72,002	2,2%
Fundición centrífuga 800 RPM	8,90	248,85	169,111	169,021	70,676	4,0%
Fundición centrífuga 1000 RPM	8,99	253,90	194,838	153,182	107,211	1,1%
Fundición centrífuga 1300 RPM	8,95	251,85	211,604	211,604	72,094	3,1%

RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN REALIZADO EN LAS PRUEBAS DE ALUMINIO

DESIGNACIÓN PROBETA	Dureza Brinell (BH10)+
Fundición Aluminio en arena	66
Fundición centrífuga 800 RPM	81.4
Fundición centrífuga 1000 RPM	87.0
Fundición centrífuga 1300 RPM	No se realizo

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA REALIZADAS EN LAS PRUEBAS DE ALUMINIO



100X Ácido Hidrofluorídrico 0.5%

Fig. 1. Microestructura muestra 09-666

MICROESTRUCTURA FUNDICIÓN DE ALUMINIO EN ARENA



100X Ácido Hidrofluorídrico 0.5%

Fig. 3. Microestructura muestra 09-668

MICROESTRUCTURA FUNDICIÓN CENTRIFUGA DE ALUMINIO A 800 RPM



100X Ácido Hidrofluorídrico 0.5%

Fig. 2. Microestructura muestra 09-667

MICROESTRUCTURA FUNDICIÓN CENTRIFUGA DE ALUMINIO A 1000 RPM

Pruebas Finales realizadas en Bronce SAE 64.

Los resultados obtenidos siguen el mismo procedimiento que las realizadas para las pruebas preliminares en aluminio a continuación se presentan los resultados:

ETAPAS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA / ENSAYO DE TRACCIÓN, DUREZA Y METALOGRAFÍA EN LAS PRUEBAS DE BRONCE



RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN REALIZADO EN LAS PRUEBAS DE BRONCE

DESIGNACIÓN PROBETA	Espesor (mm)	Area (mm ²)	Esfuerzo Máximo (N/mm ²)	Esfuerzo Rotura (N/mm ²)	Esfuerzo Fluencia (N/mm ²)	Elongación (%)
Fundición Bronce en arena	9,01	255,03	218,147	194,429	150,009	6,4%
Fundición centrifuga 800 RPM	9,08	259,01	222,470	202,215	138,178	11,7%
Fundición centrifuga 1000 RPM	9,08	259,01	263,341	239,756	147,777	12,4%

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA REALIZADAS EN LAS PRUEBAS DE BRONCE

DESIGNACIÓN PROBETA	Dureza Brinell (BHN)+
Fundición Bronce en arena	69,1
Fundición centrifuga 800 RPM	74,1
Fundición centrifuga 1000 RPM	76,9

A continuación fotografías de las Microestructura tomadas a las distintas pruebas de fundición en Bronce.



Fig. 4. Microestructura muestra 09-669

MICROESTRUCTURA FUNDICIÓN DE BRONCE EN ARENA.

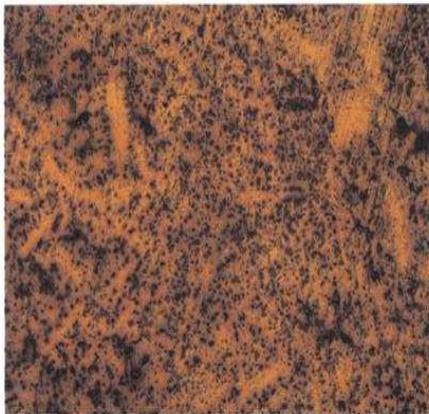


Fig. 6. Microestructura muestra 09-671

MICROESTRUCTURA FUNDICIÓN CENTRIFUGA DE BRONCE A 800 RPM

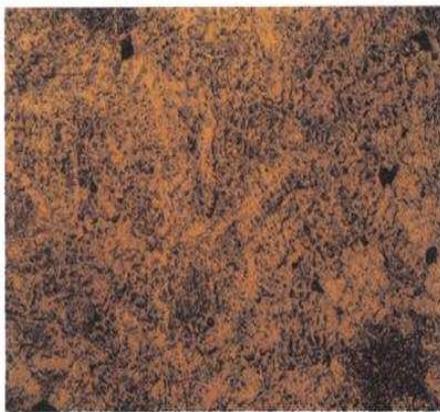


Fig. 5. Microestructura muestra 09-670

MICROESTRUCTURA FUNDICIÓN CENTRIFUGA DE BRONCE A 1000 RPM

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Una vez realizado el estudio, la fabricación de la maquina y las pruebas en vacío y con

carga se llega a las siguientes conclusiones:

Conclusiones

1. Los métodos de ingeniería nos permitieron diseñar, calcular, construir, ensamblar, certificar y probar la máquina de centrifugación exitosamente quedando en perfecto funcionamiento.
2. Las pruebas realizadas sobre el funcionamiento de la máquina para establecer la relación entre velocidad angular y el número de fuerzas de gravedad nos aseguraron un funcionamiento de acuerdo al diseño y modo de operación en producción normal, sin que se haya registrado vibraciones excesivas a altas velocidades.
3. Los ensayos con las aleaciones de cobre SAE 64 proporcionaron resultados de propiedades mecánicas sobre los límites inferiores especificados en la información técnica.
4. La calidad metalúrgica de los bocines hechos en bronce SAE 64 alcanzaron fácilmente las propiedades de norma por el efecto de afinado de grano que es uno de los beneficios directos de la centrifugación en los metales procesados por este método.
5. La producción de bronce y otras aleaciones por medio de la centrifugación superan fácilmente las características mecánicas de las aleaciones que antes procesaba INTRAMET por medio del colado en arena por gravedad.
6. La aplicación de la centrifugación en Intramet como técnica para la producción en serie de bocines de gran tamaño ha demostrado ser eficaz, por lo tanto se debe aplicar inmediatamente.

Recomendaciones

La fundición centrífuga requiere más estudios para utilizarla en otras aplicaciones y no solo producir bocines, existen muchas formas de trabajar por este método por lo tanto.

1. Se recomienda seguir experimentando con el proceso para resolver otros problemas de la fundición de partes

- con máquinas diseñadas y construidas por la Ingeniería Local.
2. Para tener una mejor apreciación de las propiedades se debería probar con otro tipo de aleaciones y a diferentes factores de gravedad.
 3. Se debería probar el método con un factor de fuerza de gravedad constante y con distinto tiempo de enfriamiento para ver de qué manera afecta el tiempo de enfriamiento a las propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Rober L. Norton, Diseño de máquinas, Editorial Prentice Hall, Mexico 1999.
2. Robert L. Mott, Diseño de elementos de maquinas, Editorial Pearson educación, Mexico 2006
3. Shigley, Joseph e, Elementos de maquinaria: fundamentos de diseño de maquinas, Editorial Mc Graw Hill, 1995
4. Robert L. Norton, Diseño de Maquinaria, editorial Mc Graw Hill, México 2000
5. Ferdinand L. Singer / Andrew Pytel, Resistencia de materiales, Editorial Harla, Mexico 1982.
6. Egor P. Popov, Mecanica de Solidos, editorial Pearson Educacion, mexico 2000.
7. INVESTIGATION OF CENTRIFUGAL CASTING CONDITIONS INFLUENCE ON PART QUALITY, Department of marine and manufacturing Technology, national Technical university of Athens, Greece.
8. INFLUENCE OF THE ROTATIONAL SPEED IN CENTRIFUGAL CASTING, International conference on advanced materials and composites (ICAMC – 2007), Oct 24 – 26, 2007
9. Metal handbook, Ninth Edition, Tomos 2 y 15.
10. Fundición Centrifuga, UMSS – Facultad de Ciencias y tecnología, Capitulo II.
11. SAE HANDBOOK, Part 1, 1979.