



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la

Producción

**“Construcción y Puesta en Marcha de Centrifugadora Horizontal para hacer
Tubería de Hierro Dúctil”**

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Gustavo Vicente Salazar Ramírez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2009.

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ingeniero Ignacio Wiesner Falconí, Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A mis padres

A mi esposa

A mis hijos.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

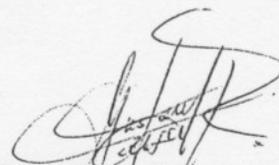
Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
VOCAL - PRESIDENTE

Ing. Ignacio Wiesner F.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Wilson Chávez B.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”



Gustavo V. Salazar Ramírez

RESUMEN

Se construyó un equipo piloto para hacer pruebas de fabricación de tubería de hierro dúctil de acuerdo a las normas AWWA usadas para la conducción de agua potable. Se hizo una investigación de mercado de la tubería de hierro dúctil para suplir la demanda que generan los proyectos de distribución de agua potable en el Sur de la ciudad de Guayaquil en los próximos años.

Se trabajó con un horno de inducción para la elaboración de hierro base con tecnología de Intramet hecho con acero ordinario de bajas azufre y fósforo para después recarburarlo durante la fusión y se hizo modificación de la estructura con aleaciones de Mg-Fe -Si y se solidificó la colada en una máquina centrifugadora para producción de tubos, se demuestra que es posible la producción de tubería de hierro dúctil de 200mm, aunque las medidas de tubos que requiere la demanda de Interagua son de 400 y 800mm.

En caso de tener que producirlos se necesitaría una inversión elevada y existe dificultad de mantener un precio competitivo por los costos de financiamiento y no es posible competir con un material globalizado. El estudio ha servido para recomendar que exista un mercado interesante para las pequeñas industrias locales para la fabricación de accesorios fundidos ya que tienen mejores precios intencionales.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGIA.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	IX
INDICE DE PLANOS.....	X
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO 1

1. CONSIDERACIONES GENERALES DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Plan de distribución de agua potable.....	3
1.2 Tipo de tubería para el sistema de distribución.....	6
1.3 Especificaciones de la tubería y el material seleccionado.....	11
1.4 Producción Nacional de tubería en hierro de grafito . esferoidal.....	14
1.5 Producción de hierro dúctil con horno inducción y centrifugadora horizontal.....	16

CAPÍTULO 2

2. CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO PILOTO.....	21
2.1 Equipo piloto de 250 mm de diámetro	21
2.2 Elaboración de partes mecánicas de la maquina.....	28
2.3 Adaptación de motor de corriente continua.....	35

2.4	Adaptación de equipo de agua de enfriamiento.....	36
2.5	Ensayos en equipo piloto para establecer operabilidad del equipo.....	37
2.6	Ensayos de hierro dúctil.....	39

CAPÍTULO 3

3.	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN	45
3.1	Análisis de la calidad del producto con ajuste a la norma EN124.....	45
3.2	Análisis de costos de producción.....	49

CAPÍTULO 4

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
4.1	Conclusiones.....	52
4.2	Recomendaciones.....	53

APÉNDICES

BIBLIOGRAFIA

ABREVIATURA

Mm	Milímetro
AWWA	American Water Works Association
ISO	International Standard Organization
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
Kg,	Kilogramo
GM	General Motors
Kw	Kilowatt
Gr	Gramo
M2	Superficie -Area
D	Diámetro
h	Altura
e	Espesor
L	Longitud
M3	Volumen
HP.	Horsepower
RPM	Revoluciones por minuto
Fig.	Figura
T	Temperatura
Cp	Calor específico
J	Joule
SAE	Society of Automitive Engineering
BHN	NúmerodeDureza Brinell
ANSI	American National Standard Institute

SIMBOLOGIA

C	Carbono
Mn	Manganeso
Cr	Cromo
Ni	Níquel
S	Azufre
P	Fósforo
Mg	Magnesio
Fe	Hierro
Si	Silicio
%	Porcentaje
"	Pulgada
°C	Grado centígrado
*	Producto
Δ	Delta, variación

INDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Sectores programados para instalación de tuberías de agua potable y alcantarillado.....	4
Figura 1.2	Tubería de hierro dúctil lado recto y extremo campana.....	8
Figura 1.3	Revestimiento de tuberías interna y externamente.....	10
Figura 1.4	Diferencias microestructurales, a la izquierda hierro dúctil y a la derecha hierro gris.....	12
Figura 1.5	Nomograma para seleccionar RPM de acuerdo al diámetro de la tubería.....	19
Figura 1.6	Sistema de enfriamiento.....	20
Figura 2.1	Proceso del sistema centrifugador.....	22
Figura 2.2	Componentes del cuerpo de la maquina centrifugadora horizontal.....	23
Figura 2.3	Base metálica sobre la que descansa el sistema centrifugador.....	24
Figura 2.4	Tolva de suministro de material base.....	24
Figura 2.5	Motor eléctrico de corriente continua.....	25
Figura 2.6	Sistema de enfriamiento con radiadores existentes en INTRAMET.....	25
Figura 2.7	Molde con arena sílice.....	26
Figura 2.8	Horno de inducción.....	26
Figura 2.9	Sistema total centrifugado.....	27
Figura 2.10	Partes del cilindro centrifugador.....	31
Figura 2.11	Proceso de construcción del foso para la maquina.....	32
Figura 2.12	Acoplamiento de bridas con el cilindro.....	33
Figura 2.13	Acoplamiento de cubiertas en los extremos del cilindro.....	34
Figura 2.14	Acoplamiento de ejes con chumaceras y ruedas.....	34
Figura 2.15	Motor eléctrico acoplado con un reóstato.....	35
Figura 2.16	Sistema de enfriamiento por radiadores y ventiladores.....	37
Figura 2.17	Sistema de amortiguación.....	38
Figura 2.18	Material vertido en el molde y tubería formada.....	41

Figura 2.19	Secciones.....	41
Figura 2.20	Tubería de hierro dúctil formada.....	43
Figura 2.21	Esquema de herramienta.....	43
Figura 2.22	Probeta de ensayo.....	44
Figura 3.1	Producto terminado.....	45
Figura 3.2	Equipo de microscopio asistido por computadora.....	47
Figura 3.3	Micrografía de tubería de hierro dúctil sin ataque.....	47
Figura 3.4	Micrografía de hierro dúctil con ataque.....	48
Figura 3.5	Maquina para ensayo de tracción.....	48

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Demanda actual y proyectadas de tuberías de 800 mm.....6
Tabla 2	Demanda actual y proyectada de tuberías de 400 mm.....6
Tabla 3	Espesores de revestimiento.....9
Tabla 4	Medidas de peso de centrifugadora - densidad.....29
Tabla 5	Continuación de las medidas de peso de Centrifugadora densidad.....30
Tabla 6	Capacidad de la bomba de agua.....42
Tabla 7	Propiedades químicas del hierro dúctil.....46
Tabla 8	Propiedades Mecánicas del hierro dúctil.....49

INDICE DE PLANOS

Plano 1	Detalle de medidas de foso para la máquina
Plano 2	Detalle del sistema de amortiguación
Plano 3	Detalle del sistema cilindro centrifugador

INTRODUCCION

La investigación en la ESPOL sobre los métodos de trabajo para la obtención de hierro dúctil, que entró en el mercado de fabricación de cigüeñales por el año de 1948 en los EE.UU, comenzó con la tesis de grado del Ing. Jacinto Flor Díaz en 1970, en la que se usó un horno de crisol artesanal de 250Kg en la Fundición Acuña y se hizo este material por primera vez en el Ecuador.

Posteriormente, el Ing. Fulvio Espinoza en 1980-1981 usó un horno de cubilote de 400mm de diámetro interior y revestimiento ácido o lo que comúnmente es conocido como cubilote convencional de aire frío, produjo hierro dúctil usando la misma técnica de modificación de estructura que ya se había usado en la investigación hecha por Flor (Primera Tesis experimental en la FIMCP).

En ambos casos se usó como materia prima chatarra de hierro dúctil en forma de cigüeñales de motores G.M. y se introdujo una lanza con la aleación modificadora de Mg-Fe-Si de bajo Mg para controlar la reacción de volatilización del Mg. En ambos casos la calidad del metal fue de un hierro dúctil de matriz perlítica y se hicieron partes de uso en obras públicas dedicadas al tendido de redes de alta tensión.

El uso de tuberías de hierro dúctil en la conducción de Agua Potable es reciente en el medio de Guayaquil. Debido a que la concesionaria del Agua

Potable es francesa y ellos usan este material desde hace tiempo, los fundidores franceses lograron combinar la técnica de centrifugación y la de elaboración de hierro dúctil ferrítico para la fabricación en serie de tubería tan barato como la fabricación con acero soldado. En nuestro medio sería prácticamente imposible de hacerlo sin el concurso del horno de inducción y es precisamente este equipo el que brinda la seguridad de hacerlo bien y ajustado a las normas que tienen relación con estas tuberías.

Intramet, poseedora de tecnología y equipo de fusión quiso experimentar el método de centrifugación de hierro dúctil para la producción de tubería de Hierro dúctil con 1m de longitud y posteriormente ver la posibilidad de hacerlo a las longitudes normales de 6m.

Los objetivos específicos que se formularon para apoyar el objetivo general tienen relación con los siguientes aspectos:

- Construir y probar máquina de tipo piloto para hacer pieza de 200mm de diámetro y 1000 mm de longitud
- Usar el hierro dúctil ferrítico producido por Intranet con sus métodos de trabajo.
- Establecer costos de producción para comparar con los tubos de importación y establecer la relación de precios.
- Acoplar equipo de provisión de agua de enfriamiento para mantener baja la temperatura del cilindro de centrifugación.

CAPITULO 1

1. CONSIDERACIONES GENERALES DEL PROBLEMA

El proyecto de inversión para la producción de hierro dúctil para satisfacer la demanda en la ciudad de Guayaquil considera la información proporcionada por la empresa Interagua y es la que se expone a continuación.

1.1 Plan de distribución de agua potable

En el sector sur de la ciudad de Guayaquil se tiene proyectado en un futuro mediano realizar cambios de tuberías e instalaciones nuevas en el sistema de alcantarillado y agua potable.

En la figura 1.1 se muestran sectores que requieren de este servicio y que serán atendidos por Interagua en los próximos años.

Para el año 2009 Interagua tiene proyectado realizar otras obras de distribución de agua y según los técnicos de esta empresa se requerirá un promedio de 3200 m de tuberías para suplir las necesidades de reemplazo e incremento de redes de suministro de agua potable en las áreas marginales de la ciudad y para las diferentes ciudadelas que se están extendiendo vía a la costa y otros sectores.

La ciudad y el país están en constante crecimiento poblacional y urbanístico a un promedio de 2 % anual. A medida que pasan los años se requerirá de mayor cantidad de redes de distribución de agua potable y alcantarillado para abastecer las necesidades de la población, motivo por el cual el presente proyecto consiste en construir y montar una planta piloto para aplicar la técnica de la producción de hierro dúctil con la que posteriormente se puede suplir esta necesidad.

La demanda de tuberías de hierro nodular de 800 mm y 400 mm de diámetro se ha proyectado por año un incremento del 8 %, la misma que da como resultado de la suma de las tasas por crecimiento poblacional y por renovación de tuberías deterioradas.

La demanda mínima de tuberías para tres años de este tipo de tuberías estarían proyectadas en la tabla no. 1

TABLA 1
DEMANDA ACTUAL Y PROYECTADA DE TUBERIAS DE 800 MM

AÑO	DEMANDA EN METROS
2009	1900
2010	2052
2011	2216

TABLA 2
DEMANDA ACTUAL Y PROYECTADA DE TUBERIAS DE 400 MM

AÑO	DEMANDA EN METROS
2009	1300
2010	1404
2011	1516

Nota: se utiliza tuberías de otras dimensiones en la red de distribución de agua potable.

1.2 Tipo de tubería para el sistema de distribución

Durante muchos años se ha venido utilizando tuberías de hierro dúctil para distribución de agua potable en Guayaquil y otras ciudades del país por las propiedades que tiene este material, las principales son:

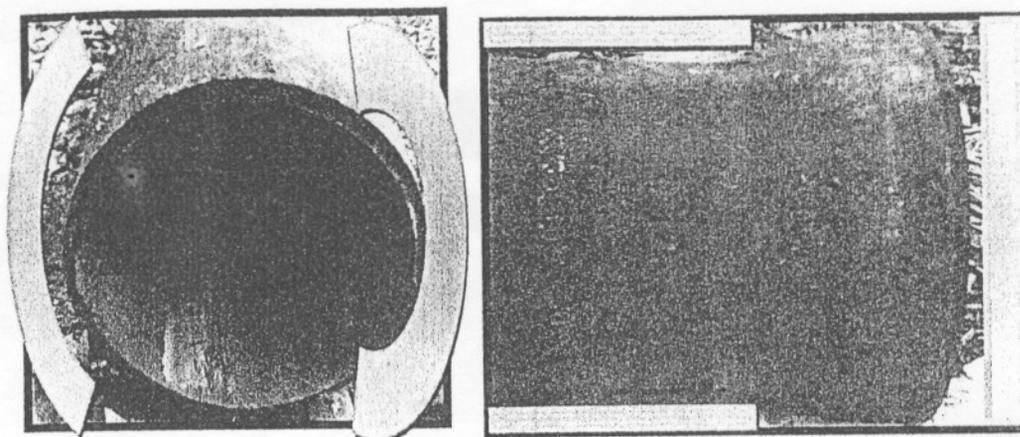
- Excelente resistencia a la corrosión natural en suelos salinos, que es el caso de Guayaquil.

- Características mecánicas más elevadas que el hierro gris, que ha sido un metal de uso tradicional
- Capacidad para deformarse plásticamente
- Módulo de elasticidad casi como la del acero
- Resistencia a la rotura por tracción y flexión de dos a tres veces superior a la fundición laminar
- Elevada resistencia al impacto

En el año 2007 se utilizaron 500 m. de tuberías de hierro dúctil de 800 mm de diámetro y 400 metros de 400 mm de diámetro tanto para el proyecto del Guasmo como para otros sectores puntuales de renovación de tuberías de este material en la distribución de agua potable para la ciudad de Guayaquil y redes de alcantarillado, ambas con tipo de unión de juntas standard (campana).

Las tuberías de PVC son utilizadas para redes secundarias que requieren diámetros menores a 150 mm.

Las tuberías de hierro dúctil utilizadas para el sistema de red de distribución de Agua potable para la ciudad de Guayaquil tienen las siguientes características , las cuales cumplen con las normas internacionales.



**FIGURA 1.2 TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL LADO RECTO Y
EXTREMO CAMPANA**

Diámetro de tuberías: Desde 150 mm – 400 mm hasta 750 mm

Material de la tubería: Hierro dúctil

Revestimiento externo: Zinc. Metálico + barniz Bituminoso + Manga de polietileno.

El revestimiento externo de los tubos es de 200 gr/ m² de zinc metálico de acuerdo con la norma ISO 8179 o equivalente. La capa de pintura bituminosa un promedio de espesor de 100 micras de acuerdo a la norma internacional ISO 8179 o equivalente. El recubrimiento exterior adicional de manga de polietileno según aplicación del sitio, se hace de acuerdo a las especificaciones AWWA C- 105 o ISO 8180.

Revestimiento interno

El revestimiento interno tiene por objeto garantizar la conservación de las características hidráulicas de la tubería al pasar el tiempo, evitar el ataque físico químico del agua al transportarse. Los tubos serán revestidos interiormente de morteros de cemento de acuerdo a la norma ISO 4179 o equivalente. El espesor del revestimiento de mortero deberá ser de acuerdo a la norma ISO 4179 como se muestra en la siguiente tabla. Para diámetros de 450mm y mayores, los bordes expuestos del revestimiento deberán ser parejos y perpendiculares al eje del tubo y el revestimiento no deberá disminuir su espesor conforme se acerca a los extremos.

TABLA 3
ESPEORES DE REVESTIMIENTO

Diámetro del tubo (mm)	Espesor nominal del revestimiento (mm)	Media del espesor mínimo (mm)	Valor mínimo en un punto (mm)
100mm - 300mm	3.0	2.5	1.5
350mm - 600mm	5.0	4.5	2.5
700mm - 1200mm	6.0	5.5	3.0
1400mm - 1600mm	9.0	8.0	4.0

Nota: Para ciertas condiciones de servicio, se pueden necesitar mayores espesores de revestimiento. Consulte al fabricante para recomendaciones específicas.

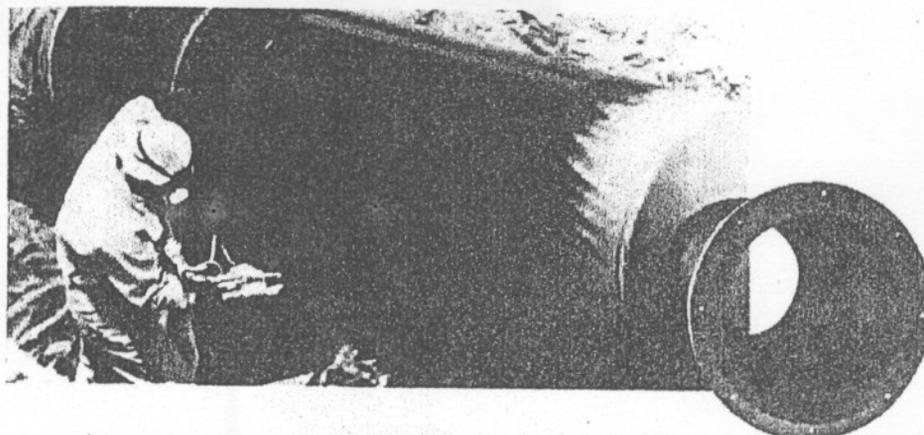


FIGURA 1.3 REVESTIMIENTO DE TUBERÍAS INTERNA Y EXTERNAMENTE

Las tuberías y piezas de conexión de hierro dúctil se fabricarán cumpliendo con los requerimientos de las ediciones recientes de las normas AWWA e ISO que se expresan a continuación.

Normativa AWWA y ANSI para fabricación de tuberías de Hierro

Dúctil

AWWA C-104	CEMENT MORTAR LINING FOR DUCTILE IRON AND FITTINGS FOR WATER DUCTILE IRON. (ANSI A21.4)
AWWA C-105	POLYTHYLENE ESCASSEMENT FOR DUCTILE IRON PIPE (ANSI A21.5) SYSTEMS
AWWA C-110 (ANSI A21.10)	DUCTILE-IRON AND GRAY IRON FITTINGS 2 IN. THROUGH 48 IN. FOR WATER.

AWWA C-111 RUBBER – GASKET JOINTS FOR CAST IRON
 ANS DUCTILE
 (ANSI 21.11) IRON PRESSURE PIPE AND FITTINGS.
 AWWA C-115 FLAGEND CAST IRON AND DUCTILE IRON
 PIPE WITH THER-
 (ANSI 21.15) MADED FLNGES.

AWWA C-150 THICKNESS DESIGN OF DUCTILE FRON PIPE
 (ANSI 21.50)

AWWA C-151 DUCTILE IRON PIPE CENTERFUGALLY CAST
 IN METAL
 (ANSI A21.51) MOLDS OR SAND LINED MOLDS FOR WATER
 OR OTHER LIQUIDS.

Normativa ISO:

ISO 2531 Tubos uniones y piezas especiales de hierro fundido dúctil para canalización con presión

ISO 4633 Anillos de caucho especificación de los materiales.

ISO 8179 revestimiento exterior con zinc

ISO 8180 manga de polietileno

ISO 4179 revestimiento interno con mortero de cemento centrifugado.

ISO 9002 modelo para el aseguramiento de la calidad en producción e instalación.

ISO 9001 Modelo para aseguramiento de calidad en diseños, producción y comercialización.

1.3 Especificaciones de la tubería y el material seleccionado

Para producir el hierro dúctil con la mejor combinación de resistencia, alta ductilidad y dureza, las materias primas que deben elegirse serán aquellas con bajo contenido de materiales indeseables, particularmente

aquellos que promueven una matriz de estructura perlítica. Un bajo contenido de magnesio es también necesario para conseguir ductilidad del material colado y para facilitar el éxito de los tratamientos térmicos para producir una estructura ferrítica. Para este propósito es necesario utilizar chatarra de acero de calidad o hierro en lingotes, también de calidades especiales.

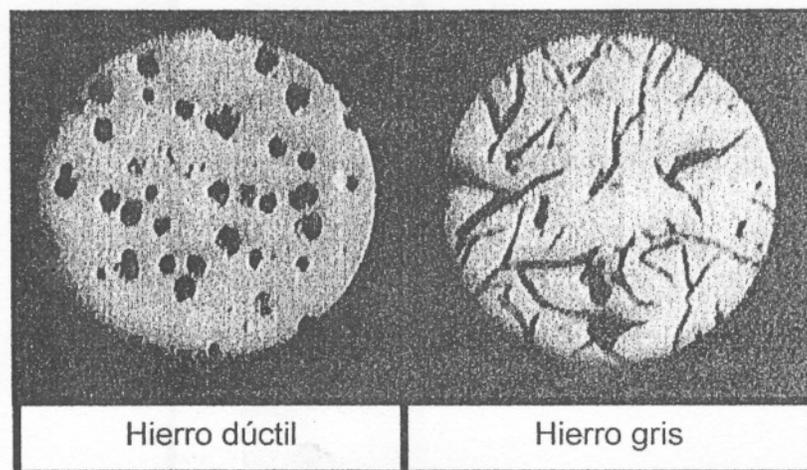


FIGURA 1.4 DIFERENCIAS MICROESTRUCTURALES, A LA IZQUIERDA HIERRO DÚCTIL Y A LA DERECHA HIERRO GRIS

La forma estructural del grafito que caracteriza al hierro dúctil es producida usualmente con un contenido de magnesio de aproximadamente de 0.04 a 0.06%. el magnesio es un elemento altamente reactivo a la temperatura del hierro fundido líquido y es el elemento que promueve la solidificación del grafito.

Para economizar magnesio y por la limpieza del metal, el contenido de azufre del hierro tratado debe ser bajo, preferiblemente menor a

0.02%, esto se logra fácilmente en un horno eléctrico. Por fundición de cargas basadas en chatarras de acero de bajo azufre y fósforo o hierro en lingotes de calidad especial para producción de hierro dúctil que se suministran con esta exigencia.

Un importante control de las materias primas implica la exclusión del aluminio que puede promover fragilizaciones y defectos superficiales. así mismo algunos elementos como plomo, antimonio y titanio deben ser mantenidos siempre lo más bajo posible para lograr una buena estructura de grafito.

La tubería de hierro dúctil y sus accesorios se fabrican bajo normas estrictas de la American National Standard Institute, la American Water Works Association y la International Standards Organization.

Este material hierro dúctil tiene propiedades mecánicas sobresalientes que se acercan a la ductilidad y resistencia del acero, combinadas con la resistencia a la corrosión que tiene el hierro fundido. Las tuberías de hierro dúctil se fabrican desde diámetro de 100mm hasta 1600mm. todos los tubos se fabrican de 6 mtrs. de largo. la tubería también se produce en diámetro de 4" a 64" de acuerdo con las normas AWWA.

Las juntas de tuberías de varios tipos se abastecen para que satisfagan las condiciones de servicio e instalación para obtener una fácil instalación y confiabilidad bajo una variedad de condiciones de servicio. Las juntas de tuberías de acuerdo con las normas ISO incluyen: juntas de campana – espiga, juntas con cerrojo (Lok-Ring), juntas con cerrojo rápido (FAST –LOK) juntas con bridas empernadas.

Datos requeridos cuando la tubería es solicitada:

- Diámetro
- Longitud Total Requerida
- Tipo De Conexión
- Clase K-7 O K-9 *; espesor de la pared del tubo
- Tipo De Protección

*La tubería ISO se fabrica de acuerdo a la norma ISO 2531 y viene en clase k-7 y clase k-9. la clase k-9 es mas gruesa.

1.4 Producción Nacional de tubería en hierro de grafito esferoidal

Previa investigación realizada en nuestra ciudad y a nivel nacional sobre empresas que se dediquen a la producción de tuberías de hierro dúctil o grafito esferoidal, se determinó que hasta la fecha no ha habido empresa ó inversionista alguno que haya tomado en consideración esta área de producción.

Uno de los inconvenientes para abrir este mercado de las tuberías es que el material debe alcanzar temperaturas de fundición sobre los 1500° C., ya que el proceso es endotérmico y reduce la temperatura de la mezcla fundida (caldo) después de la reacción con el Mg, por ello es imprescindible el horno de inducción.

Existen cinco empresas nacionales que tienen Hornos de Inducción y una de ellas es INTRAMET, la misma que se ha interesado en la producción de este tipo de tuberías motivo por el cual ha proyectado la construcción de una centrifugadora horizontal la que servirá para pruebas de producción de tubería de 1 mt. de longitud.

A continuación se detalla empresas que tienen hornos de inducción con sus respectivas capacidades de producción.

Constructora Mejía ubicada en la ciudad de Cuenca provincia del Azuay con una capacidad de crisol de 500 Kg. y su producción está orientada a la minería y a la fabricación de partes para molinos hechos en acero de manganeso.

INTRAMET, ubicada en la ciudad de Guayaquil con una capacidad de crisol de 500 Kg. y sus instalaciones están dentro del Campus Politécnico de la ESPOL

La Politécnica Nacional ubicada en la ciudad de Quito con una capacidad de crisol de 120 Kg.

La Politécnica del Ejercito ubicada en la ciudad de Quito con una capacidad de crisol de 120 Kg.

La ESPOCH ubicada en la ciudad de Riobamba con una capacidad de crisol de 80Kg.

Estos centros de estudio y empresas se han dedicado a la fabricación de otros productos sin aprovechar la ventaja de la tecnología que poseen por contar con el equipo apropiado para producir hierro dúctil, es por esta circunstancia que INTRAMET tiene la visión de aprovechar o explotar este mercado.

1.5 Producción de hierro dúctil con horno de inducción y centrifugadora horizontal

La producción de tubería de hierro dúctil u otros productos centrifugados, por ejemplo bronce, requiere de tres sistemas importantes completamente acoplados que se deben tomar en cuenta para una producción exitosa, uno es el Horno de Inducción (etapa de preparación del hierro base), en segundo lugar el equipo para realizar

la modificación de estructura con Mg. y en tercer lugar la máquina centrifugadora que sirve para dar forma a los tubos.

Las tres máquinas son importantes en la fabricación de tuberías

Desde los años setenta se ha venido produciendo hierro dúctil en hornos de crisol y horno de cubilote, pero el equipo apropiado para hacer el hierro base de bajo S y P es el Horno de inducción sin tener que hacer disulfuración del caldo, de esta forma hacerlo susceptible de formar grafito esferoidal en la solidificación, para que luego sea vertido en la máquina centrifugadora.

Si no se realiza una buena preparación del material base toda la operación de formación de estructura tiene como resultado producir hierro gris, para evitar este problema se deben tener las siguientes condiciones.

- Un bajo contenido de azufre tal como se lo indicó anteriormente, es decir menor al 0.02% con la finalidad de que permita al magnesio formar el grafito esferoidal cuando la masa se solidifique, y evitando de esta forma que disminuya la capacidad de modificación de estructura al formarse el sulfuro de magnesio si la cantidad de azufre es elevada.

- Una cantidad relativamente baja de silicio entre 1.0% a 1.50% para evitar un excesivo aporte de silicio durante la operación de modificación de la microestructura cuando se utiliza aleaciones de magnesio ferrosilicio como nodulizante.
- Para facilitar la operación de llenado en el molde el rango de contenido de carbono debe estar entre 3.60% y 4%, a pesar de ser considerado un porcentaje alto.
- Una escoria limpia y libre de hierro con un contenido óxido lo más bajo posible, de no ser así se disminuiría el poder modificador del magnesio.

Máquina Centrifugadora: la función de esta máquina es la de formar el tubo por medio del proceso de centrifugado, es decir el molde gira a una velocidad de acuerdo al diámetro de la tubería producida (ver figura 1.5) y durante este proceso el material empieza a solidificar y a formarse el tubo en las pared interior del molde de metal.

La temperatura a la que entra el material base fundido es de 1350 ° C , empieza a solidificar aproximadamente a las 1200 ° C en el lapso de 30 seg. Esto obliga a buscar un medio de enfriamiento para poder sacar y manipular el tubo una vez que está formado tratando de obtener por

medio de este sistema de enfriamiento una temperatura externa del molde de aproximadamente 200°C. lo cual se muestra en la figura 1.6

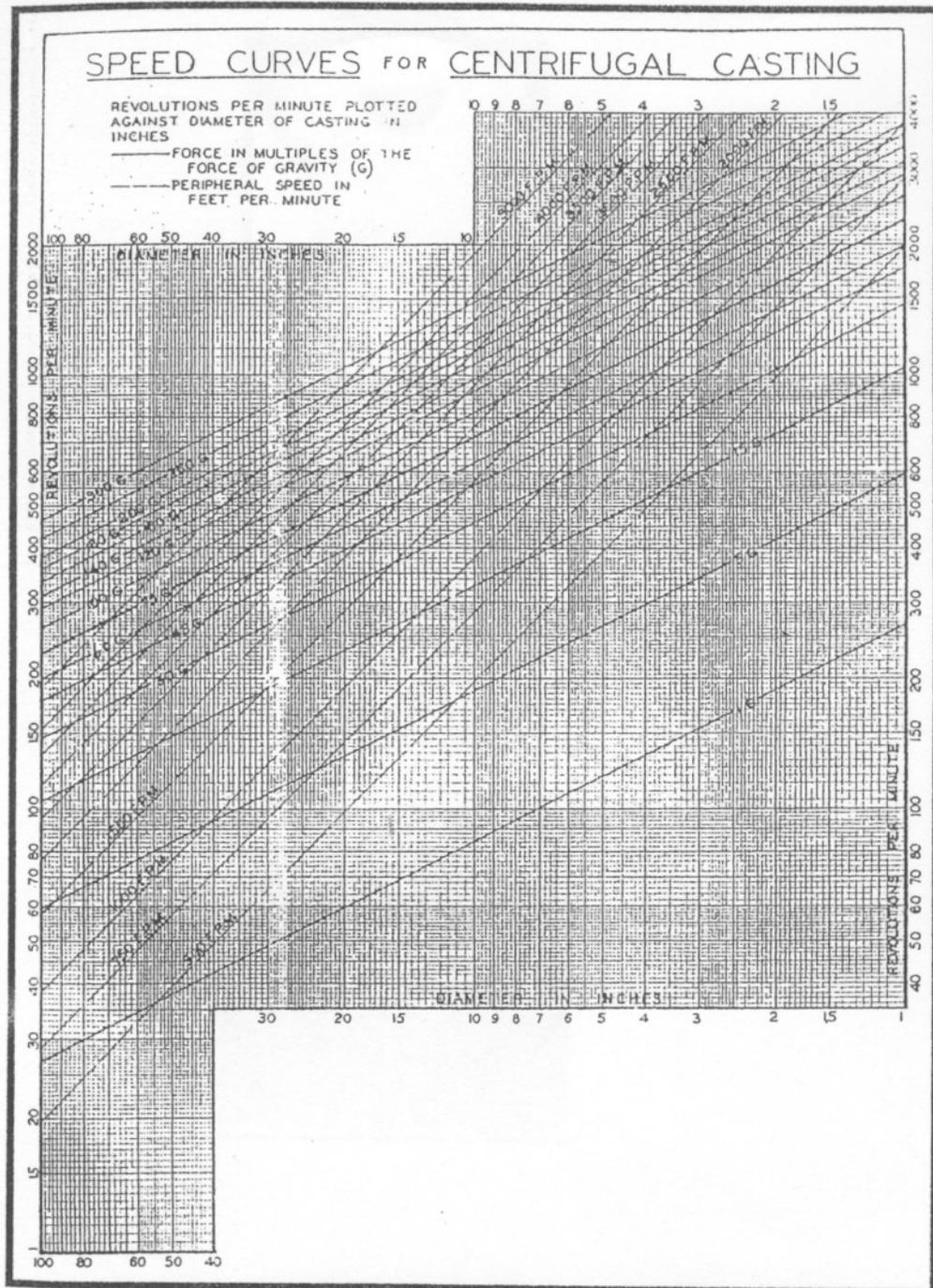


FIGURA 1.5 NOMOGRAMA PARA SELECCIONAR RPM DE ACUERDO AL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

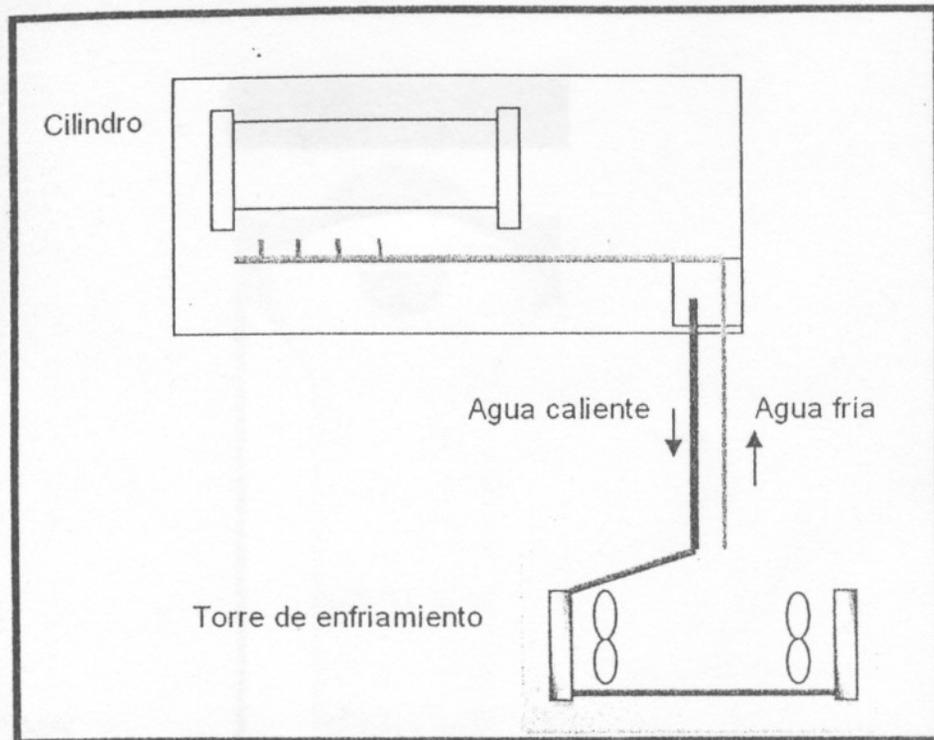


FIGURA 1.6 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

CAPITULO 2

2. CONSTRUCCION DE EQUIPO PILOTO

2.1 Equipo piloto de 250 mm de diámetro

Este equipo piloto es un sistema de vaciado centrífugo que consiste en darle vuelta a un molde de metal en su eje horizontal mientras que el hierro fundido se introduce dentro del molde.

La fuerza centrífuga del molde en rotación distribuye el metal en forma pareja , produciendo una tubería uniforme sin tener que usar un núcleo central.

El hierro fundido ingresa al molde por medio de una tolva cónica que permite la distribución radial de la materia prima que en pocos segundos

empieza a solidificarse dando lugar a la formación homogénea del tubo
ver fig 2.1

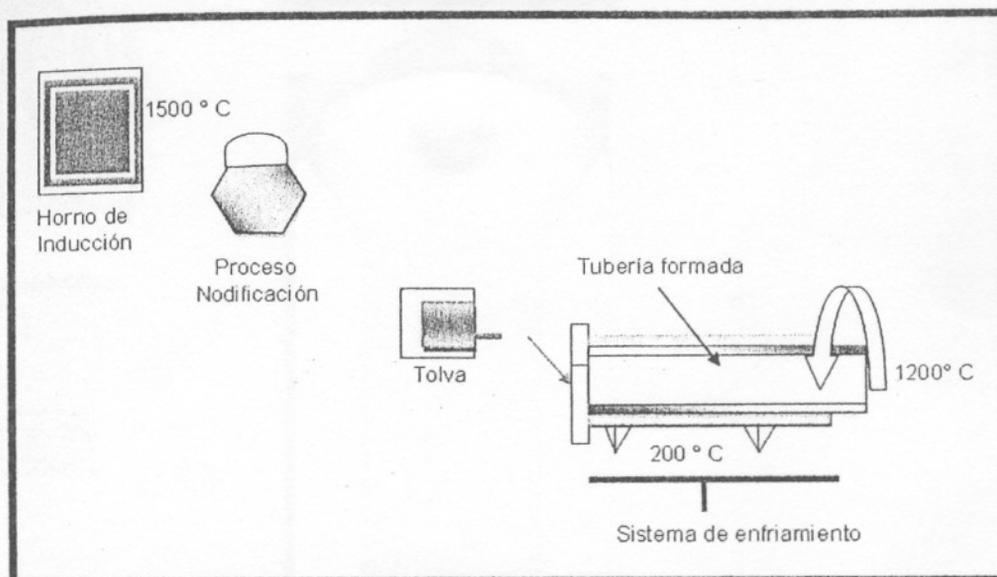
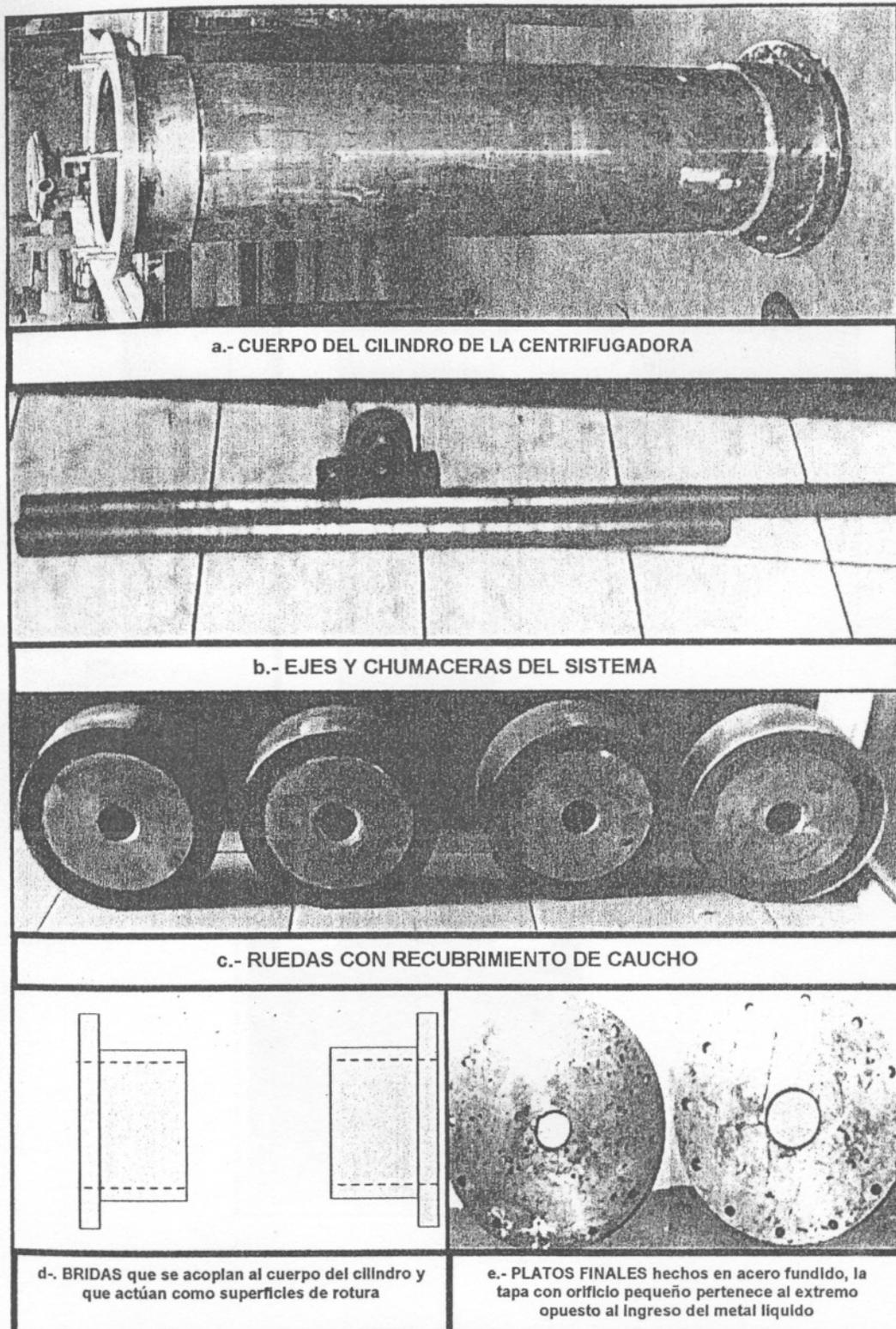


FIGURA 2.1 PROCESO DEL SISTEMA CENTRIFUGADOR

Durante el proceso de solidificación la temperatura permanece elevada aproximadamente unos 1300 ° C, lo cual impide que el producto pueda ser manipulado con facilidad y extraído del molde.

Para ello se procederá a realizar un enfriamiento en el exterior del cuerpo del cilindro centrifugador, utilizando agua impulsada por una bomba y distribuida a través de tuberías con toberas sobre el cuerpo exterior del cilindro con la finalidad de mantener la temperatura superficial a un promedio de 200° C.

El equipo piloto está conformado por las siguientes partes:



**FIGURA 2.2 COMPONENTES DEL CUERPO DE LA MAQUINA
CENTRIFUGADORA HORIZONTAL**

- Una base de estructura metálica sobre la cual se apoya todo el conjunto centrifugador.

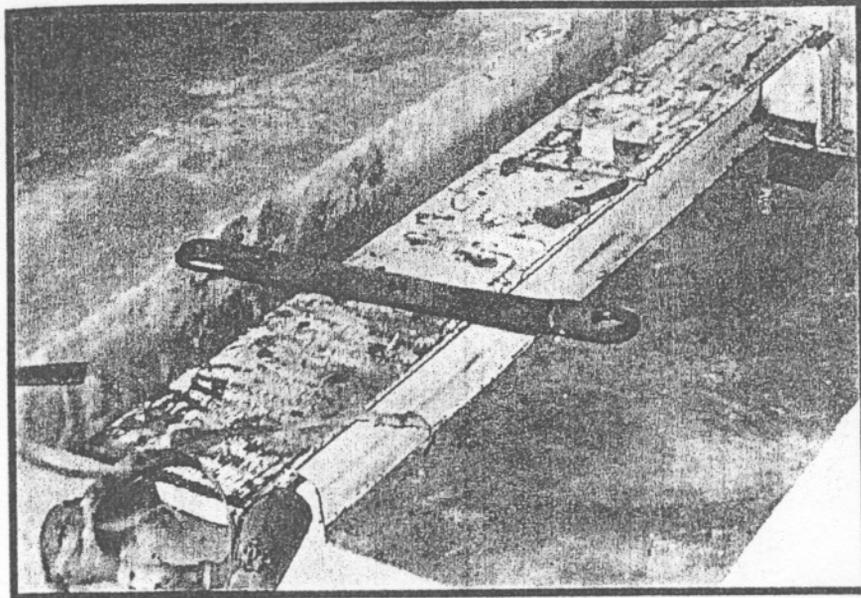


FIGURA 2.3 BASE METÁLICA SOBRE LA QUE DESCANSA EL SISTEMA CENTRIFUGADOR

- Una tolva para verter el material base fundido

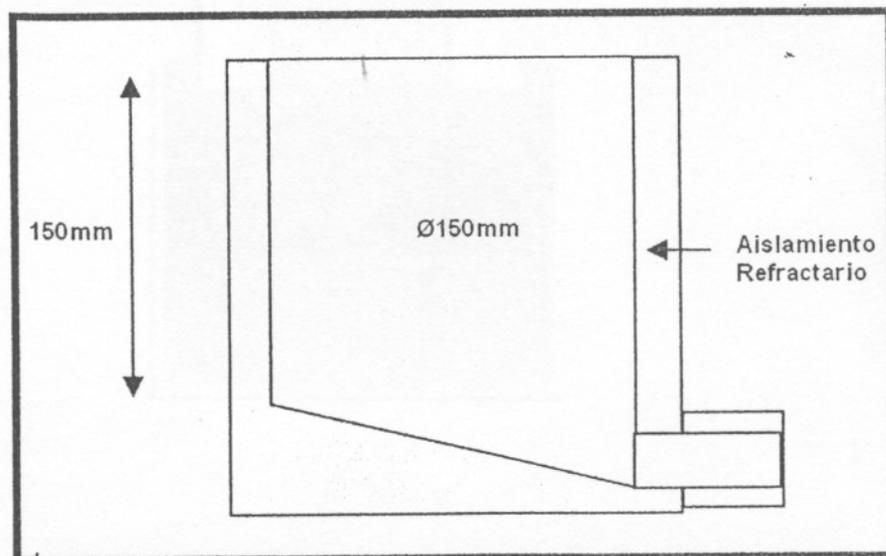


FIGURA 2.4 TOLVA DE SUMINISTRO DE MATERIAL BASE

- Un motor eléctrico con revoluciones variables para hacer girar el cilindro centrifugador, desde la velocidad cero a la requerida de acuerdo al diámetro seleccionado.

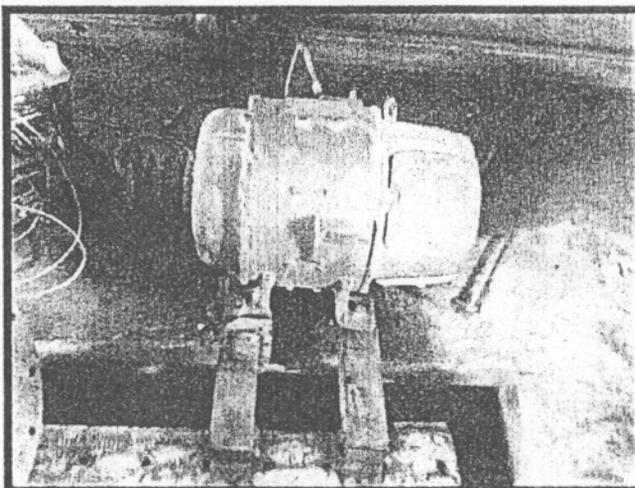
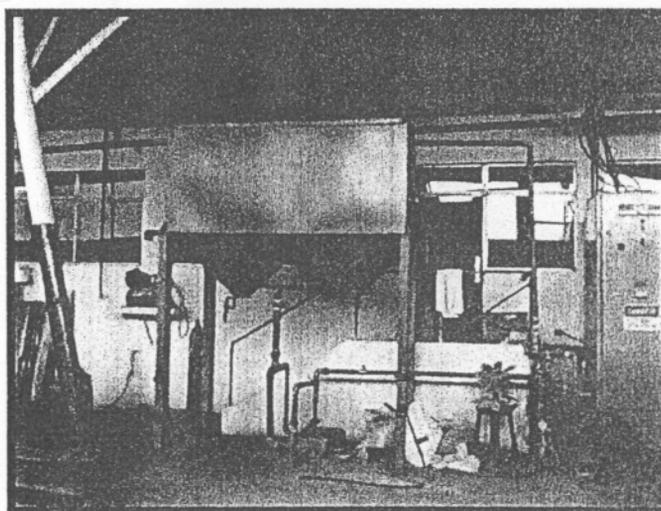


FIGURA 2.5 MOTOR ELÉCTRICO DE CORRIENTE CONTINUA

- Un sistema de enfriamiento para mantener baja la temperatura del sistema centrifugador.



**FIGURA 2.6 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON RADIADORES
EXISTENTES EN INTRAMET**

- Internamente un molde de arena dependiendo su grosor de acuerdo al diámetro de tubería a ser fabricada.

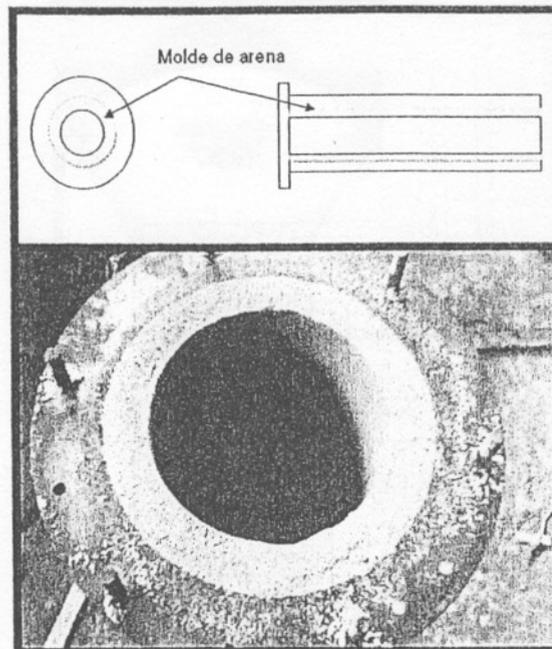


FIGURA 2.7 MOLDE CON ARENA SILICE

- Horno de Inducción

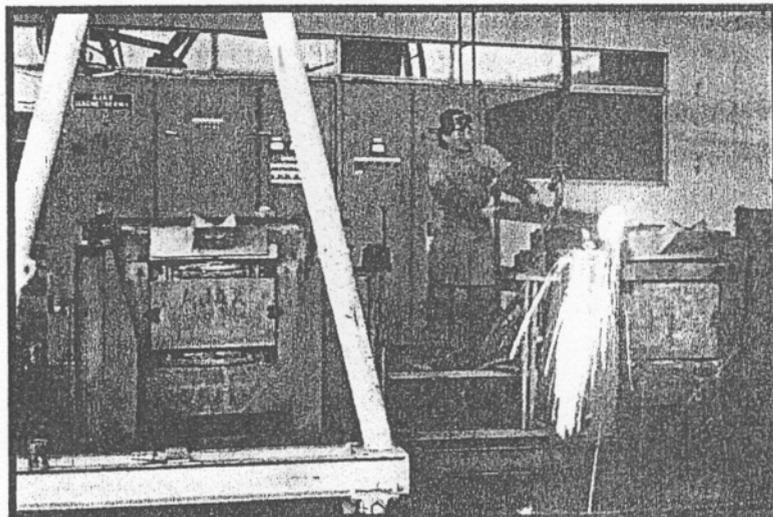


FIGURA 2.8 HORNO DE INDUCCIÓN

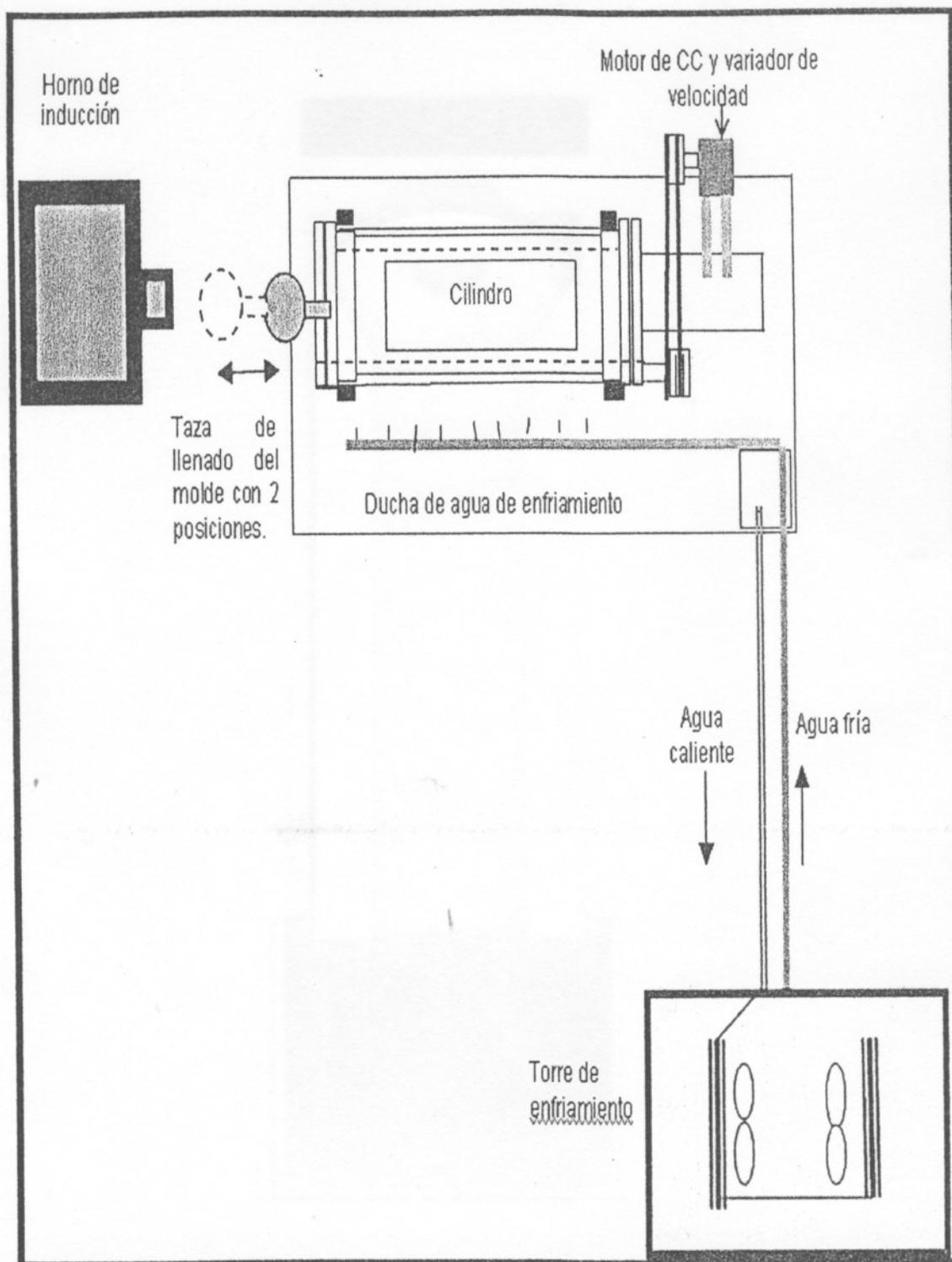


FIGURA 2.9 SISTEMA TOTAL DE CENTRIFUGADO

2.2 Elaboración de partes mecánicas de la máquina

Todos los elementos mecánicos principales de la centrifugadora horizontal fueron construidos en los talleres de INTRAMET con las especificaciones proporcionadas por el autor de la tesis.

El cilindro, las bridas, placas, las cuatro ruedas fueron fabricados bajo un proceso de moldeo, fundición y rectificación de materiales chatarras de acero obtenidos localmente con las dimensiones especificadas en la sección 2.1.

Así mismo se realizó la construcción del matrimonio o acople de aluminio utilizado para la transmisión de revoluciones del motor eléctrico al eje motriz.

Se ha utilizado la tecnología propia y los talleres industriales (torno, fresa, etc.) y el equipo de fundición de los talleres INTRAMET para llevar a cabo la construcción de cada elemento o parte de este laborioso sistema de centrifugado.

En la tabla 3 se muestra las dimensiones y pesos de cada uno de los componentes construidos.

TABLA 4
MEDIDAS / PESO DE PARTES DE LA CENTRIFUGADORA
CONSIDERANDO UNA DENSIDAD DEL ACERO IGUAL A : 7850
KG./M3

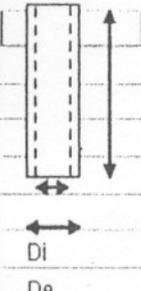
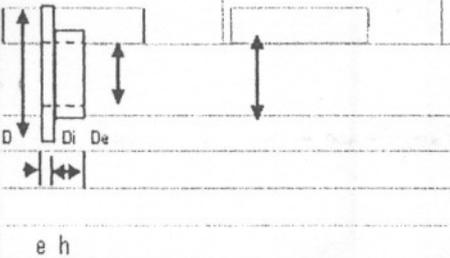
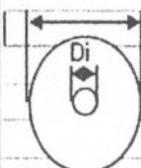
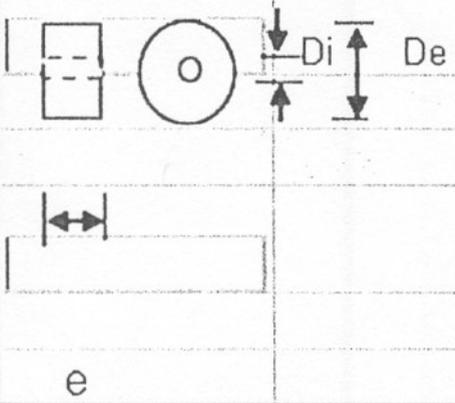
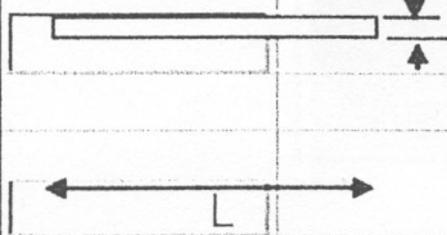
PIEZA	MEDIDAS (mm)	CANTIDAD	VOLUMEN (M ³)	PESO:U (KGR)	PESO TOTAL (KGR)
CILINDRO 	$D_{ext}=262$ $D_{int}=250$ $L = 1000$	1	4,82x10	37,84	37,84
BRIDA 	$D= 397$ $De=319$ $Di = 253$ $h= 400$ $e = 12$	2	0,01186	93,1	186,2
Plato de entrada de metal 	$De = 397$ $Di = 60$ $e = 25$	1	3,02x10	23,71	23,71
Plato de salida de gases 	$De = 397$ $Di = 90$ $e = 25$	1	2,93x10	23	23

TABLA 5
CONTINUACIÓN DEL CUADRO

PIEZA		CANTIDAD	DIMENSIONES
RUEDAS 		4	$D_e = 200$ $D_i = 38$ $e = 87$
PIEZA			CANTIDAD
EJES 		 D_e	1
		D_e	1

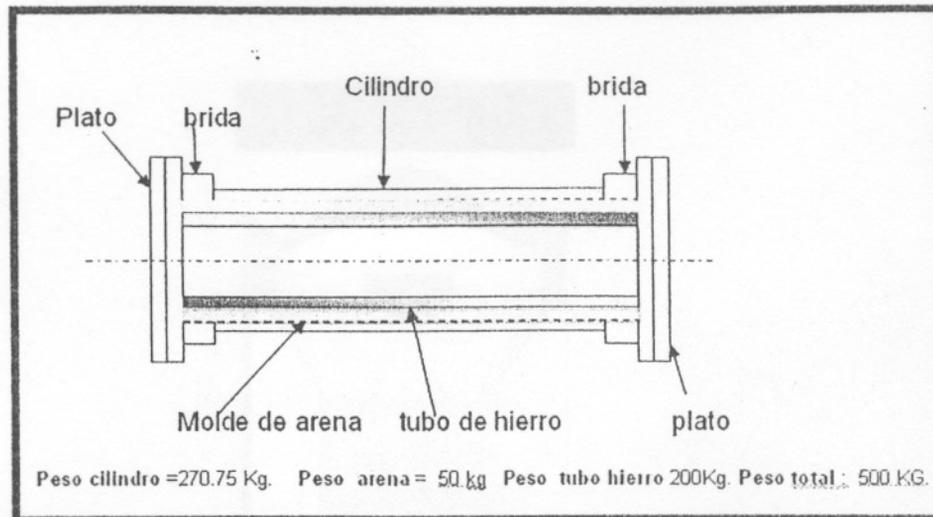


FIGURA 2.10 PARTES DEL CILINDRO CENTRIFUGADOR

A continuación se dará a conocer el proceso de acoplamiento y montaje de las partes que conforman la máquina prototipo Centrifugadora Horizontal para tubería de hierro dúctil.

CONSTRUCCIÓN DE FOSO RECOGEDOR DE AGUA

Para el montaje de la máquina centrífugadora en las instalaciones de los talleres de INTRAMET se realizaron previamente obras menores, como es la construcción del foso para montaje de la máquina, fue hecho de cemento, bajo el nivel del suelo, con dimensiones de 2000 mm x 1000 mm x 250 mm teniendo el piso un declive que permitirá el deslizamiento del agua de enfriamiento a utilizar hacia un pozo ubicado en el extremo de la caja para recoger el agua con una dimensión de 40*40*15 mm. La idea de realizarlo bajo el nivel del piso es con la finalidad de que nos

permita con facilidad el llenado de la materia prima fundida en la máquina centrífuga. Ver La figura 2.11 con el respectivo proceso de construcción.

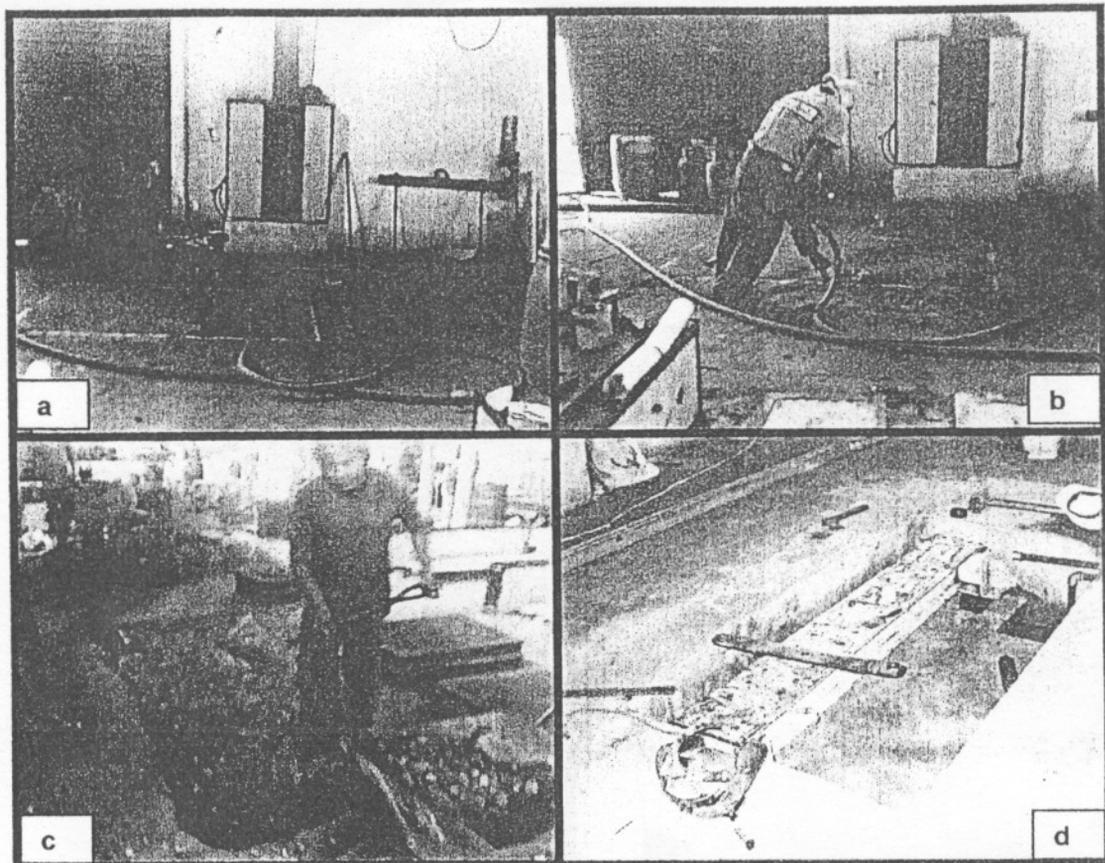


FIGURA 2.11 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE FOSO PARA LA MÁQUINA

Luego de construido el cajón se procedió a instalar la estructura sobre la cual va a ser asegurada la máquina centrífuga. Esta estructura descansa sobre el piso y está asegurada con pernos de anclaje de 12 mm de diámetro y 100 mm de largo, siendo la dimensión de la estructura de 250 mm de ancho*220mm de alto y *1800 mm de largo ver fig. 2.7.

Una vez asegurada la estructura y realizado el montaje de la máquina centrifugadora se procedió a revisar detalles como es la nivelación del sistema para que haya un perfecto acoplamiento del eje motriz con el motor eléctrico. Para instalar este motor se tuvo que construir una base para su sujeción y seguridad dejando nivelado de esta forma todo el sistema.

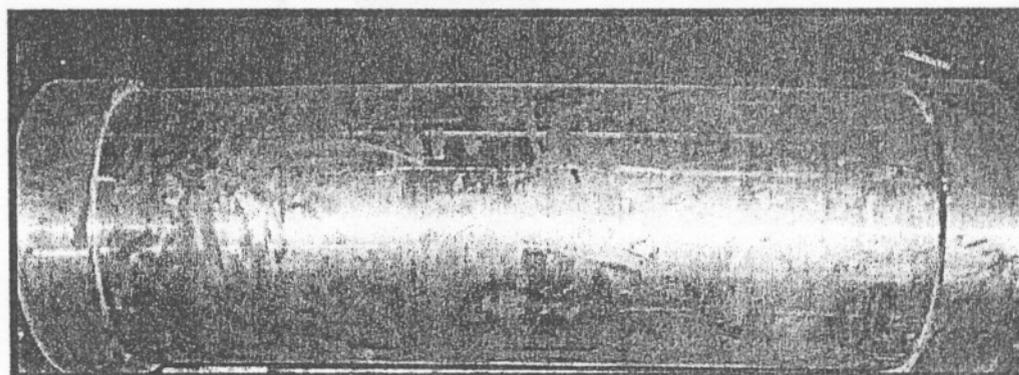


FIGURA 2.12 ACOPLAMIENTO DE BRIDAS CON EL CILINDRO

El cilindro y las bridas fueron acopladas durante un proceso de calentamiento para que entren y se mantengan unidos a presión los extremos del cilindro en los diámetros interiores de las bridas como se muestra en la figura donde se observa que no existe cordón de soldadura que adhiera estas partes de la máquina centrifugadora.

A continuación se instalaron los dos platos con sus respectivos espárragos y tuercas de seguridad. Ver fig. 2.13.

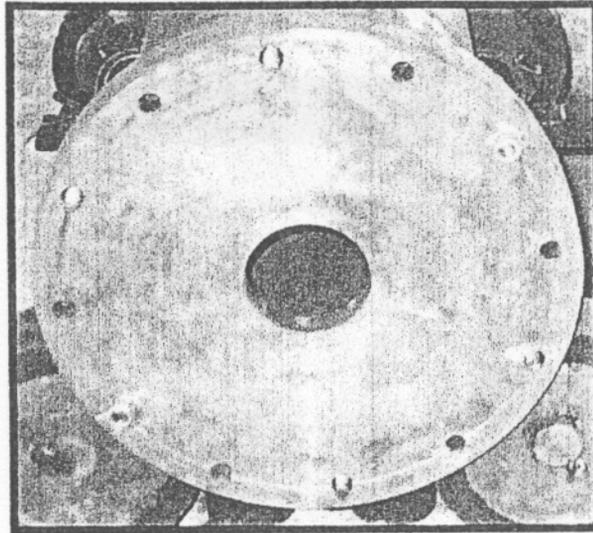


FIGURA 2.13 ACOPLAMIENTO DE CUBIERTAS EN LOS EXTREMOS DEL CILINDRO.

Se acoplaron las cuatro ruedas con cubierta de caucho a los ejes de acero , dos ruedas en el eje motriz ver fig. 2.14, aseguradas por topes laterales y cuñas para evitar el deslizamiento axial y patinamiento de las ruedas durante el giro y dos ruedas en el eje loco igualmente aseguradas. Así mismo cada eje descansa sobre dos chumaceras.

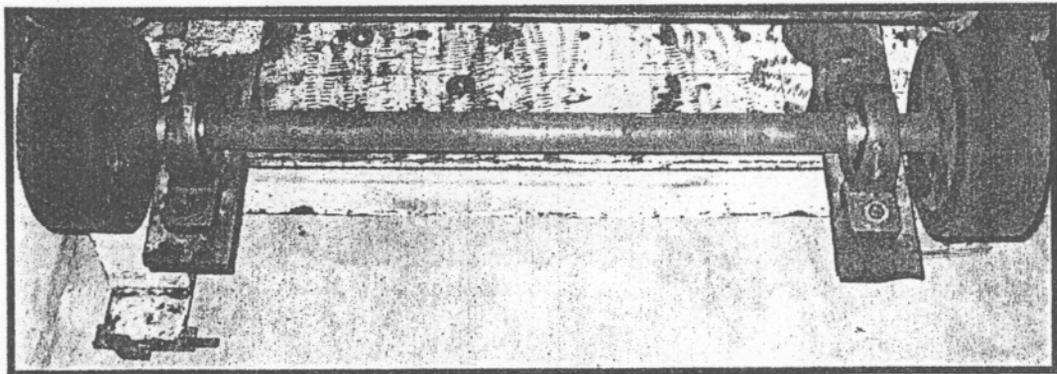


FIGURA 2.14 ACOPLAMIENTO DE EJES CON CHUMACERAS Y RUEDAS.

2.3 Adaptación de motor de corriente continua

Se adaptó el motor de corriente continua existente en Intramet de las siguientes características: 5 HP y de 1800 RPM.

El motor fue instalado a un lado del cilindro centrifugador transmitiendo su potencia al Sistema por medio de poleas y bandas.

Esta potencia es transmitida al cilindro centrifugador por medio de la fricción generada entre las dos ruedas motrices, montadas en el eje impulsor, con la parte externa de las bridas del cilindro que descansa sobre estas ruedas.

Para poder controlar las revoluciones de giro del cilindro centrifugador se le adaptó al motor de corriente continua un reóstato que permitirá controlar el giro o revoluciones del motor. Ver FIG. 2.15

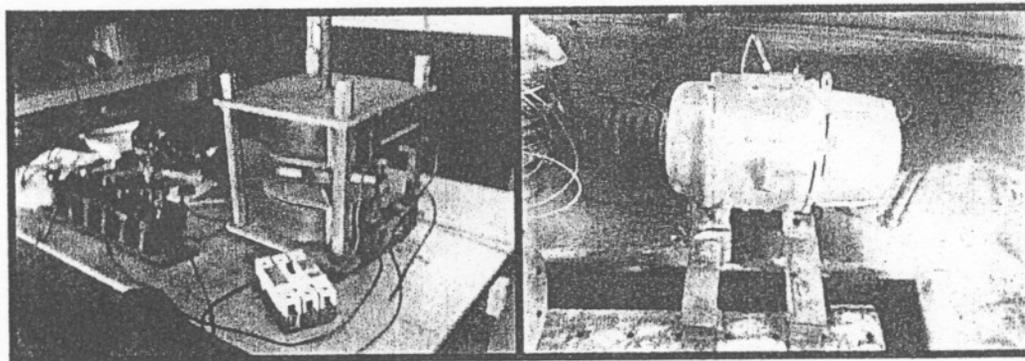


FIGURA 2.15 MOTOR ELÉCTRICO ACOPLADO CON UN REÓSTATO

2.4 Adaptación del equipo de agua de enfriamiento

Este equipo se construyó para funcionamiento del horno de inducción cuando se trabajó bajo potencia nominal y ha estado sin uso desde que se adquirió la torre de enfriamiento de mejor capacidad.

El equipo de agua de enfriamiento consta de los siguientes elementos:

- Dos radiadores por donde circula el agua caliente para ser enfriada por ventiladores

- Dos bombas de agua , una sirve para enviar agua " fría " que sale de los radiadores hacia el sistema centrifugador . La otra bomba se encargará de recoger el agua caliente que se deposita en el sumidero una vez que realiza el enfriamiento del cuerpo centrifugador y envía esta agua a los radiadores de enfriamiento.

- Dos tuberías enterradas para la circulación de agua fría y caliente

- Una tubería con toberas que permiten que el agua sea rociada sobre el cuerpo caliente de la máquina centrifugadora.

- El sistema consta de válvulas de control de flujo, un medidor de temperatura del agua de enfriamiento y otros accesorios para su mejor funcionamiento.

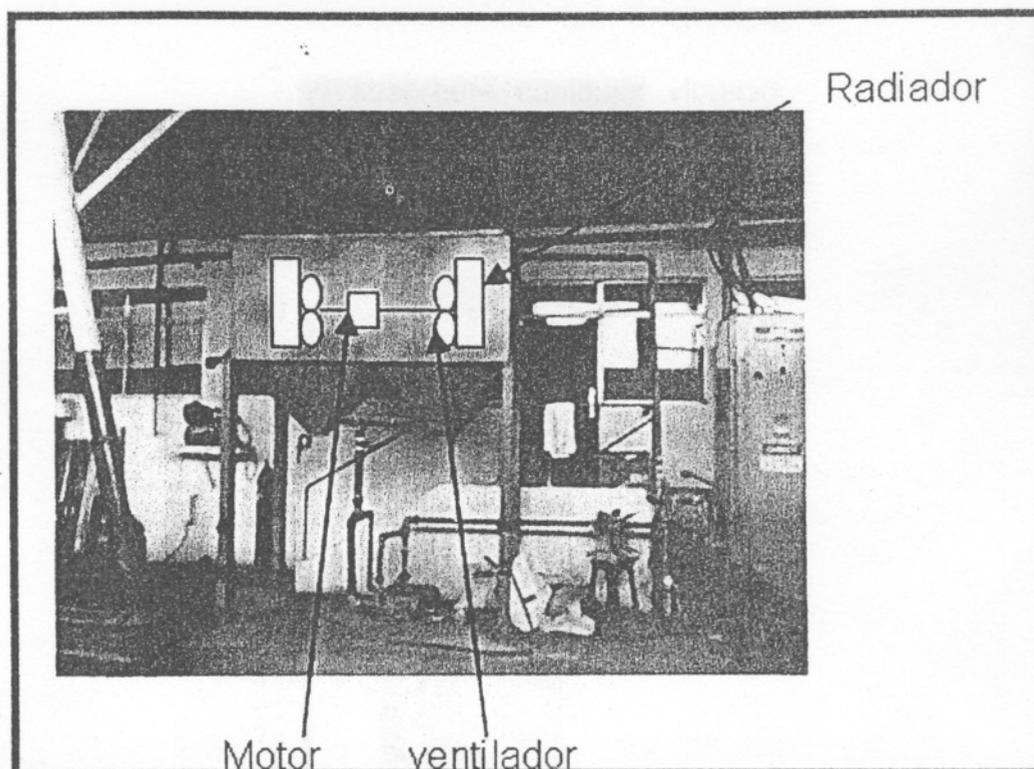


FIGURA 2.16 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR RADIADORES Y VENTILADORES

2.5 Ensayos en equipo piloto para establecer operatividad del equipo.

Antes de llevar a cabo las pruebas de ensayo con hierro dúctil se realizaron pruebas de operatividad de la máquina para determinar fugas de agua en el sistema de enfriamiento, revoluciones del cuerpo centrifugador, vibraciones del sistema. Se hizo funcionar la máquina en vacío para detectar fallas de funcionamiento del sistema y realizar las debidas correcciones.

Se detectó vibraciones y deslizamiento axial del cilindro.

Para amortiguar la vibración , se instaló un sistema compuesto de resorte y rueda que absorberá cualquier vibración generada por la rotación e impedirá el deslizamiento axial del cilindro a través de una ceja de la rueda que estará en contacto con la superficie externa de la brida (ver fig. 2.17) .

Se colocará un sistema de amortiguación en cada extremo del cilindro.

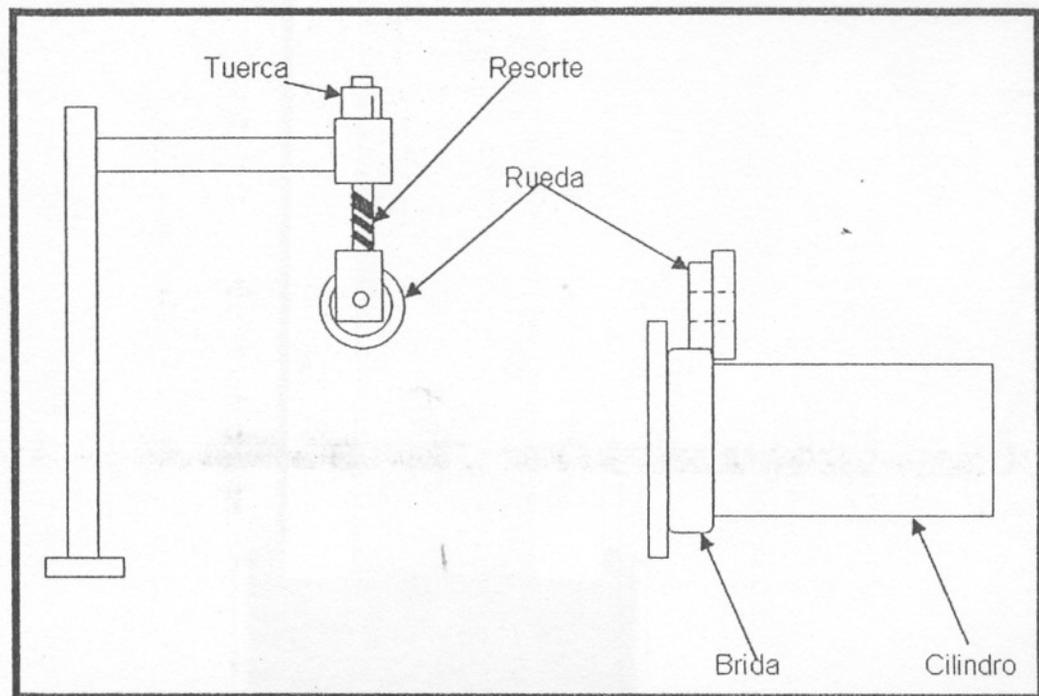


FIGURA 2.17 SISTEMA DE AMORTIGUACIÓN

El sistema de llenado o alimentación de material fundido se hará mediante una tolva que está del lado izquierdo de la centrifugadora horizontal. Por este lado ingresará material fundido a 1500 ° C

(temperatura de fundición del hierro) , material que viene del horno de inducción (fig. 2.8).

Se detectó fugas de agua por las tuberías del sistema de enfriamiento, por tal motivo se las cambió, corrigiéndose dicha falla.

2.6 Ensayos de hierro dúctil

Una vez corregidas las fallas durante su operatividad en vacío, se procedió al ensayo con el material base seleccionado para realizar el presente trabajo (hierro nodular), se siguieron los siguientes pasos.

- a.) Selección de revoluciones a las cuales va a girar el cilindro centrifugador , las cuales dependen del diámetro de tubería a construir,

Para ello se usa la siguiente fórmula :

$$N = \frac{30 \sqrt{2g GF}}{\pi D}$$

N= velocidad de rotación (rev/min)

D = diámetro interior del molde (m.)

GF = relación de fuerza centrífuga dividida por el peso

Para fundición en una centrifugadora horizontal se recomienda utilizar un factor GF entre 60 y 80 . con este valor de GF nos vamos al nomograma de la fig. 5 y seleccionamos las revoluciones de acuerdo al diámetro de la tubería.

- b.) Fundición del hierro dúctil - Se usó material hecho con los métodos de trabajo que ha desarrollado la empresa Intramet. Para este proceso se utiliza material chatarra de acero de bajo S y P. Se introduce este material al horno de inducción hasta llevarlo a la temperatura de fundición de 1500 ° C.

Previamente se coloca en una probeta una muestra del material fundido para ser sometida a ensayo y determinar si el material base está apropiado para ser vertido en el cilindro centrifugador, se hace la modificación de estructura con Mg fuera del horno de inducción en una olla de transferencia hecha para este propósito y con una lanza con la cantidad de Mg equivalente al 0.25% en relación al peso del hierro base fundido.

- c.) Se vierte el material base por medio de la tolva hacia el interior del cilindro centrifugador una vez que llega hasta la

temperatura de fundición del hierro dúctil en el horno de inducción y se hace la modificación de estructura con Mg.

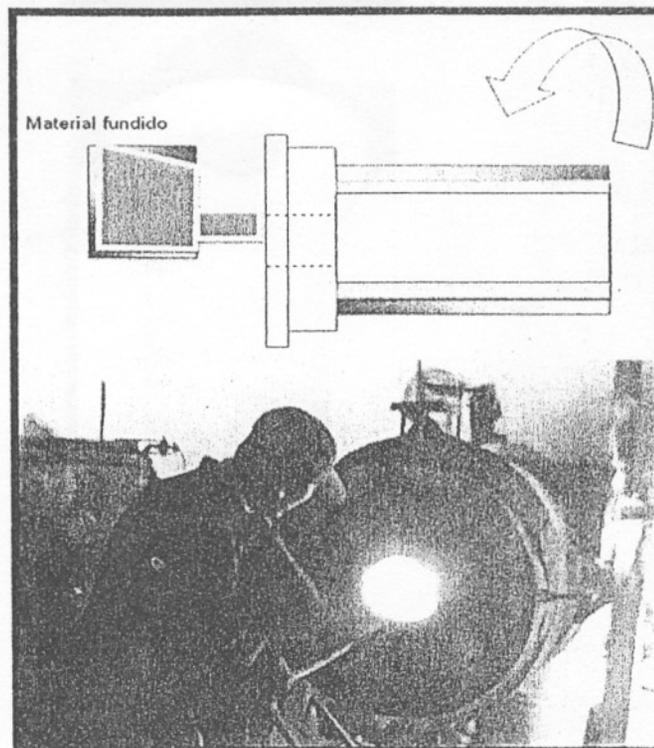


FIGURA 2.18 MATERIAL VERTIDO EN EL MOLDE Y TUBERÍA FORMADA

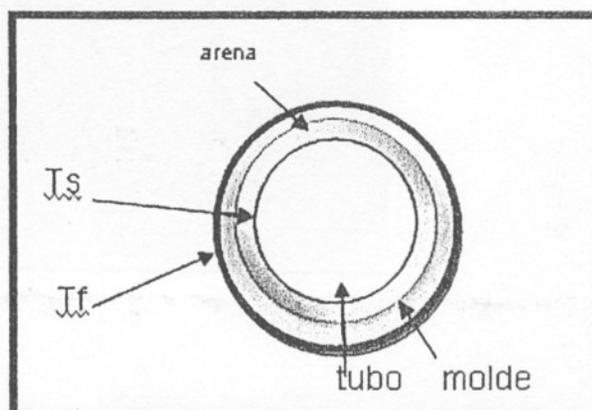


FIGURA 2.19 SECCIONES

El calor extraído por la cantidad de agua requerida para llevarlo a una temperatura de manipulación será:

Calor absorbido por el agua para obtener la temperatura de manipulación.

$$Q = Q_s \cdot C_p \times \Delta T$$

$Q =$ masa del agua \times C_p agua \times variación de temperatura del agua.

$$\text{Masa del agua} = Q / \Delta(C_p \times T)$$

$$C_p = 4.2 \text{ KJ / kg.}$$

TABLA 6

CAPACIDAD DE LA BOMBA DE AGUA

Tf (°C)	Qs (joul / s)	Qa (joul / s)	Q (Joul / s)	M agua (Kg / s)	M ³ / s
500	5x 10 ⁸	2204.28	4.9 x 10 ⁸	23.8	0.0238
350	5x 10 ⁸	1497.78	4.9 x 10 ⁸	23.8	0.0238
200	5x 10 ⁸	791.28	4.9 x 10 ⁸	23.8	0.0238

d.) Extracción de la tubería formada una vez que se llegó a la temperatura de manipulación. Para proceder a extraer el tubo manualmente se utiliza una herramienta como lo muestra la fig.

2.20

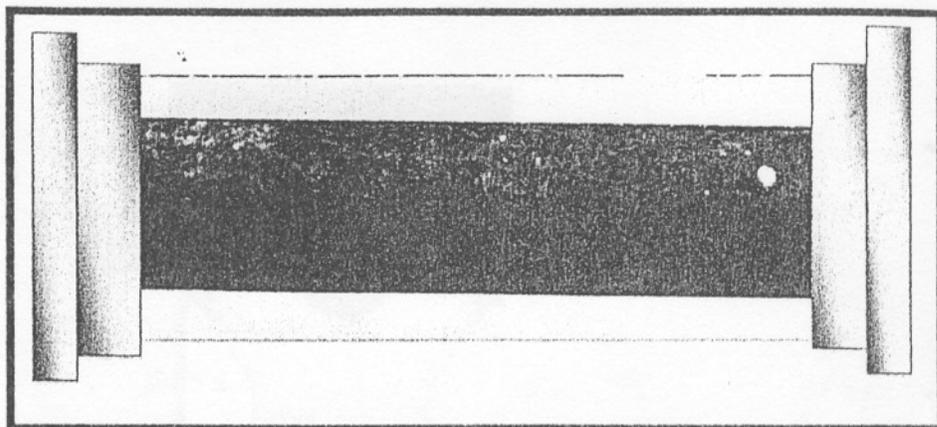


FIGURA 2.20 TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL FORMADA

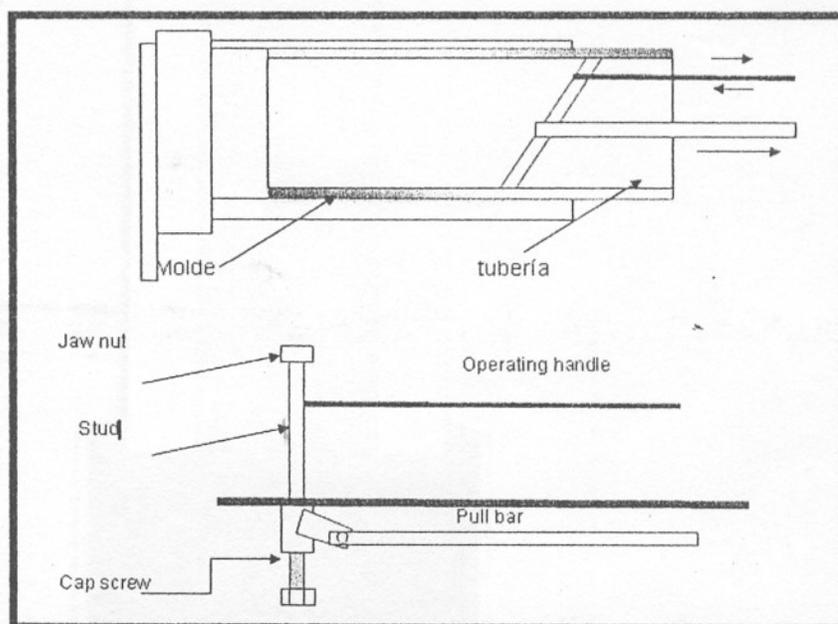


FIGURA 2.21 ESQUEMA DE HERRAMIENTA

- e.) Corte y preparación de probetas para determinar las propiedades físicas del producto obtenido con el sistema de centrifugado horizontal.

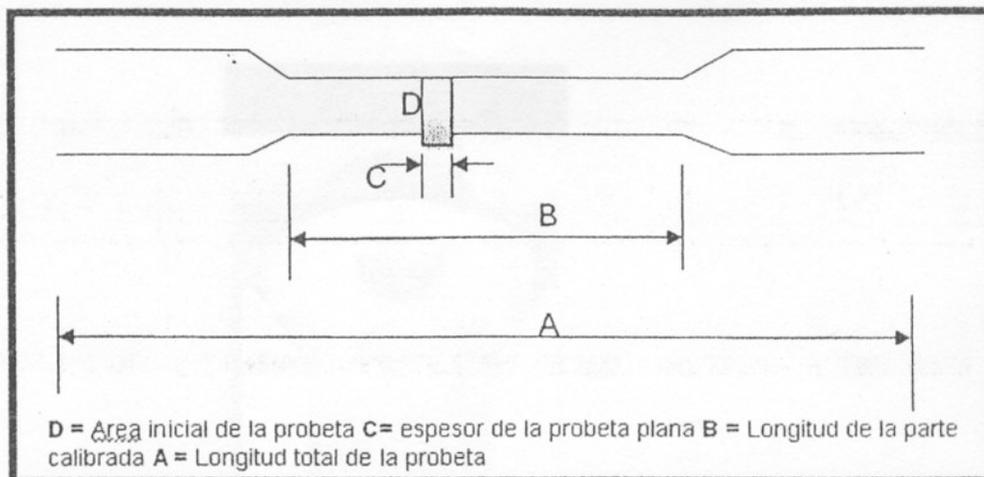


FIGURA 2.22 PROBETA DE ENSAYO

CAPITULO 3

3. ANALISIS DE LA PRODUCCION

3.1 Análisis de la calidad del producto con ajuste a la norma EN 124.



FIGURA 3.1 PRODUCTO TERMINADO

Con las probetas elaboradas se realizaron los ensayos obteniéndose los siguientes resultados:

ANALISIS QUIMICO:

Se procedió a realizar los análisis químicos por medio del método de espectrómetro de Rayos X, para lo cual fue necesario preparar una probeta de hierro blanco fundiendo metal producido por centrifugación en horno de laboratorio y colando en molde de medallones, el resultado promedio de 2 quemas es el siguiente:

TABLA 7

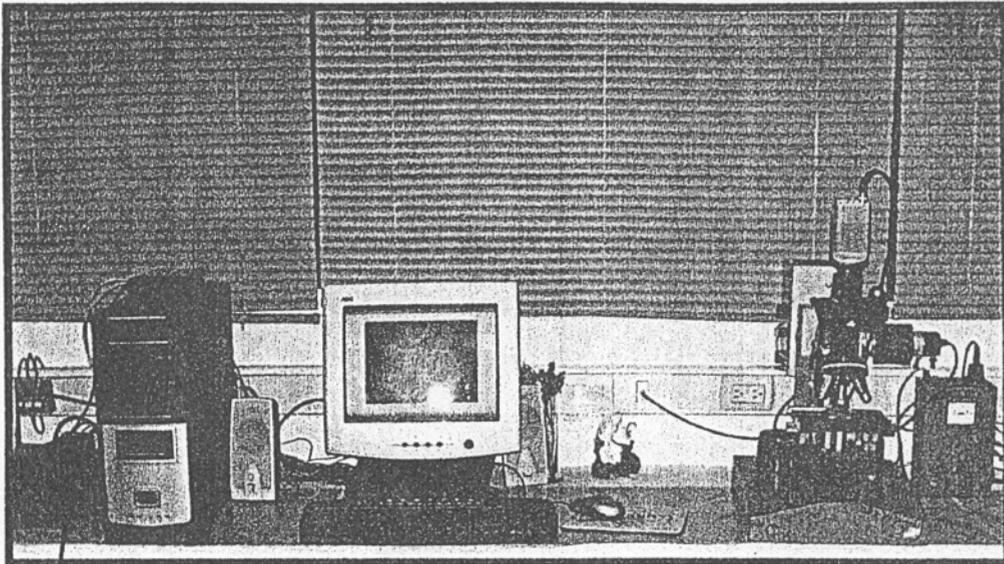
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL HIERRO DÚCTIL

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni
3.51	2.40	0.08	0.020	0.0099	0.015	0.0061

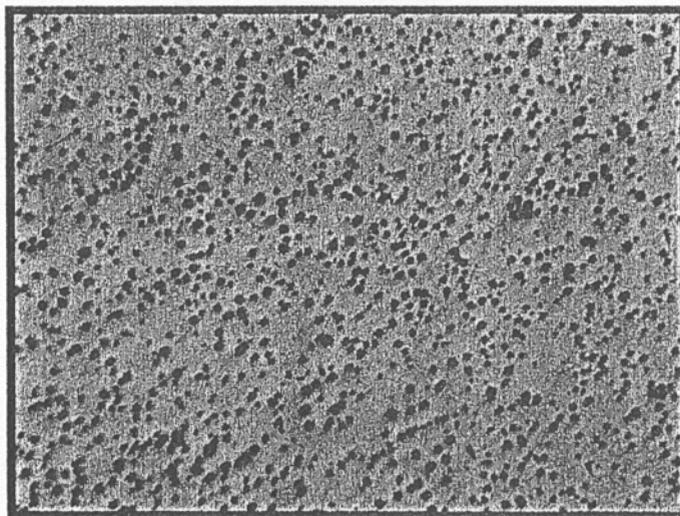
Es de notar que el % de manganeso se mantiene bajo, porque se trata de llegar a una matriz ferrítica y el Mn es un elemento formado de carburos, lo cual es contrario al objetivo de tener alta ductilidad.

METALOGRAFIA:

Se analizó la morfología del grafito solidificado, la distribución y la matriz para los dos primeros casos, se hace el estudio microscopico con probeta sin ataque y en cambio para observar la matriz se lo hace con ataque químico de Nital al 2%.



**FIGURA 3.2 EQUIPO DE MICROSCOPIO ASISTIDO POR
COMPUTADORA**



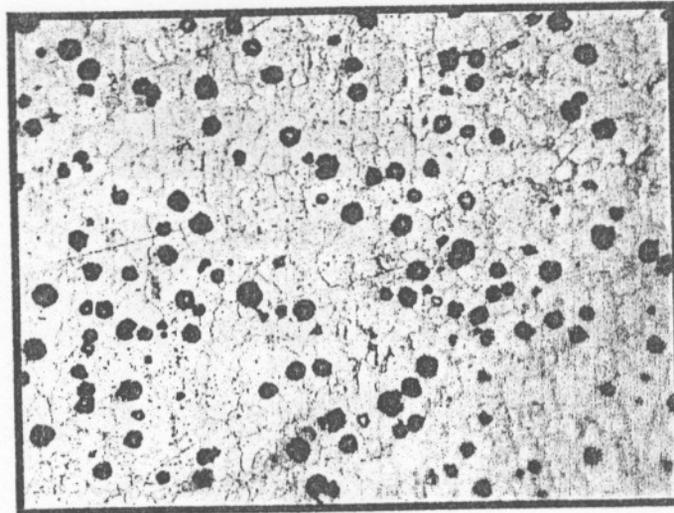
Sin Ataque

80X

Micrografía 1

Se observó a diferentes aumentos para diferenciar el % de nodularización, es del 95% y la distribución es uniforme y alrededor de 250 nódulo por mm^2 .

**FIGURA 3.3 MICROGRAFIA DE TUBERIA DE HIERRO DUCTIL SIN
ATAQUE**



320X

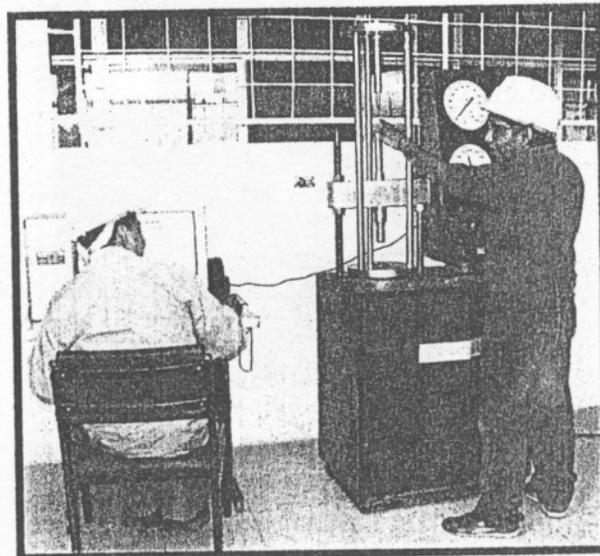
Nital al 2%

Micrografia 1

Correspondiente a una sección transversal de la tubería de Hierro Dúctil, el resultado de la observación es que el material posee una matriz de ferrita.

FIGURA 3.4 MICROGRAFIA DE TUBERIA DE HIERRO DUCTIL CON ATAQUE**DUREZA**

Dureza Rocckwell B : 81 (promedio) transformada a escala Brinell es de 160BHN.

**FIGURA 3.5 MÁQUINA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN**

ENSAYO DE TRACCION

Los resultados encontrados califica el material dentro de la norma EN124 ya que no existen inconformidades en los ensayos realizados.

Material: Tubo de hierro dúctil

Equipo utilizado : Vesastester asistida por computadora

Temperatura de ensayo : 23° C

Velocidad de ensayo : 5 mm/min

TABLA 8

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HIERO DÚCTIL

Ensayos	Espesor de tubería	Limite de fluencia	Esfuerzo máximo	elongación
1er ensayo	8 mm	37.87 kg/mm ²	59.70 Kg/mm ²	12.24 %
2do ensayo	8 mm	41.78 kg/mm ²	56.67 Kg/mm ²	12.68 %
3er ensayo	8 mm	41.40 kg/mm ²	56.29 Kg/mm ²	12.08 %

3.2 Análisis de costo de producción

Costo de elaboración del sistema

Comprende todos los componentes del equipo de centrifugación y el ensamble de los mismos, incluida la obra civil llevada a cabo.

Todo esto tiene un costo de \$ 10000.00 dólares americanos.

COSTO DE PRODUCCIÓN DE TUBO FUNDIDO PARA 1 TON/ DÍA

MATERIA PRIMA Y MATERIALES

-Chatarra de acero SAE A-36	\$ 200.00
- Desperdicios de electrodos de grafito 2 %	\$ 20.00
- Fe- Si 5% en peso (50 Kg) Con relación al hierro base en horno).....	\$ 150.00
- Fe – Mn , 0.5% Con relación al hierro en horno en peso (5 kg)....	\$ 30.00
-Mg-Fe-Si 0.25% Con relación en peso de hierro base en horno(250g).	\$ 30.00

Costo total de materiales.....\$ 430.00

OTROS COSTOS DE PRODUCCIÓN:

Energía .

2.0 Kw-hr por Kg. de hierro base producido a un costo
\$ 0.10/Kw-h

Produciendo 1 ton/ día.....	\$ 200.00
Carga fábril.....	\$ 60.00
Personal (5 personas)/ día.....	\$ 200.00
Administración.....	\$ 100.00
Jefe de Planta.....	\$ 50.00
Gerencia	\$ 50.00
Acabado galvanizado	
Y pintura (\$2.0/Kg.).....	\$ 600.00
Revestimiento interior.....	\$ 220.00

(\$ 8.0/ Kg.)

Total de Otros costos de producción.....\$1,480.00

Total de Costos\$1,910.00

Sumando los costos de materiales y los demás costos de producción se tiene un costo de \$ 1,91 USD/Kg para la producción

El costo de la tubería de hierro dúctil importada es de 2.00 USD/ Kg por lo tanto no existe suficiente margen de ganancial.

Es más, en este caso no existe carga financiera porque el horno es propio y se da una producción en serie para compensar las ineficiencias de la producción artesanal.

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Después de haber realizado pruebas con equipo piloto para la producción de hierro dúctil en forma de tubos y haber controlado la calidad por medio de ensayos de laboratorio podemos concluir lo siguiente:

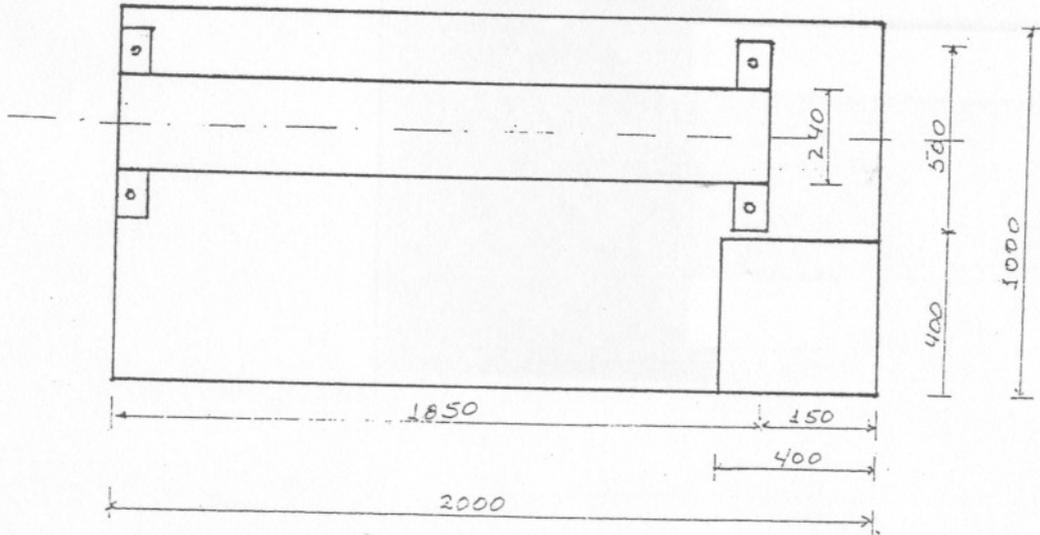
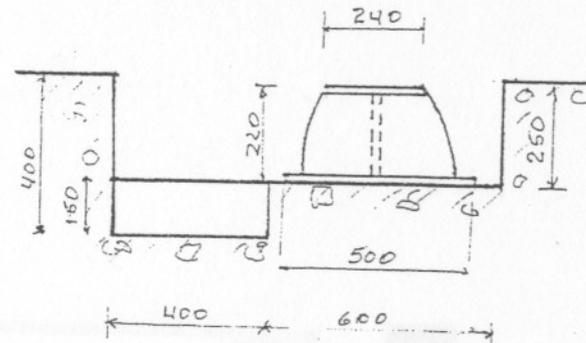
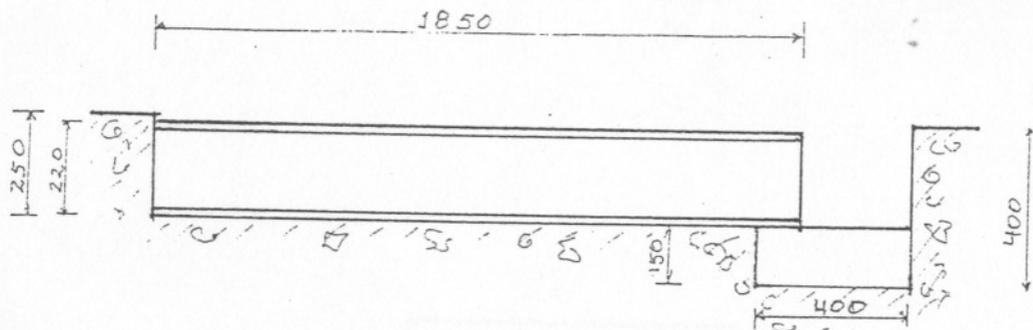
- Técnicamente es posible hacer tubos centrifugados de la calidad requerida por la empresa de agua potable.
- Calculado el costo de producción para 1 tonelada de producto/día se pierde la expectativa de tener un precio competitivo.
- Para hacer tubería de 250mm de diámetro y 6m de longitud se requiere de una extrapolación que no demanda de otra tecnología, pero la inversión en un horno de inducción y

centrifugadora hacen una carga financiera que no compite con los precios internacionales.

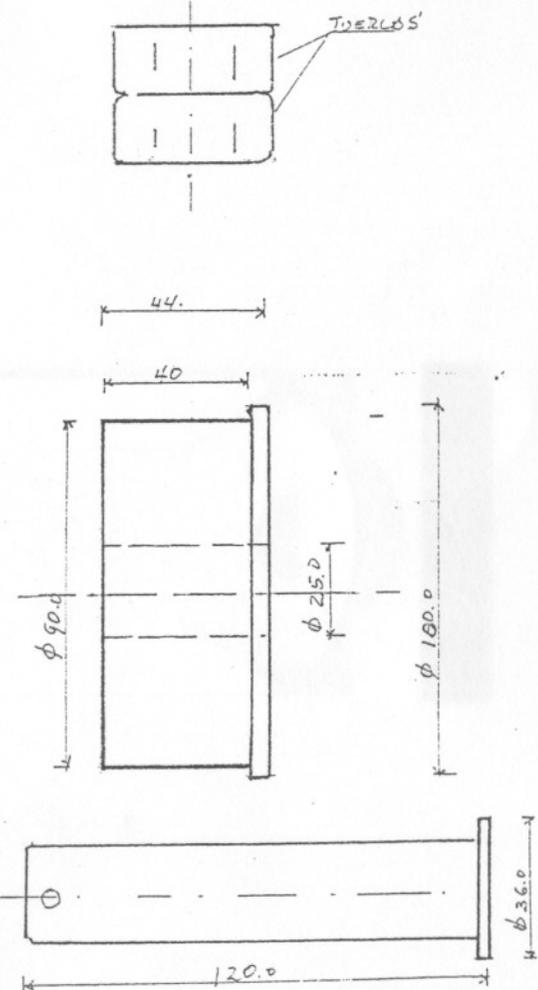
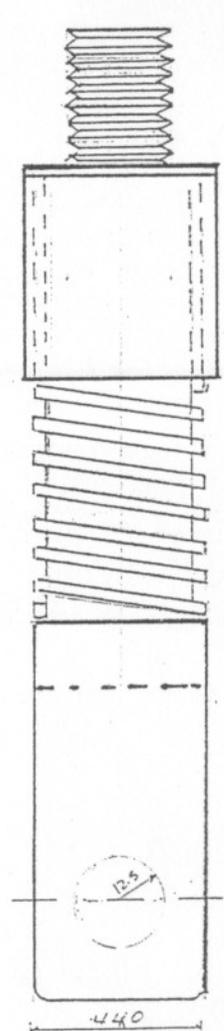
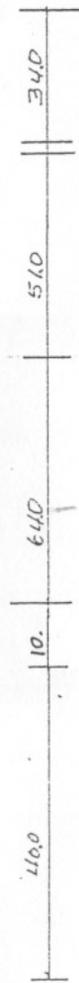
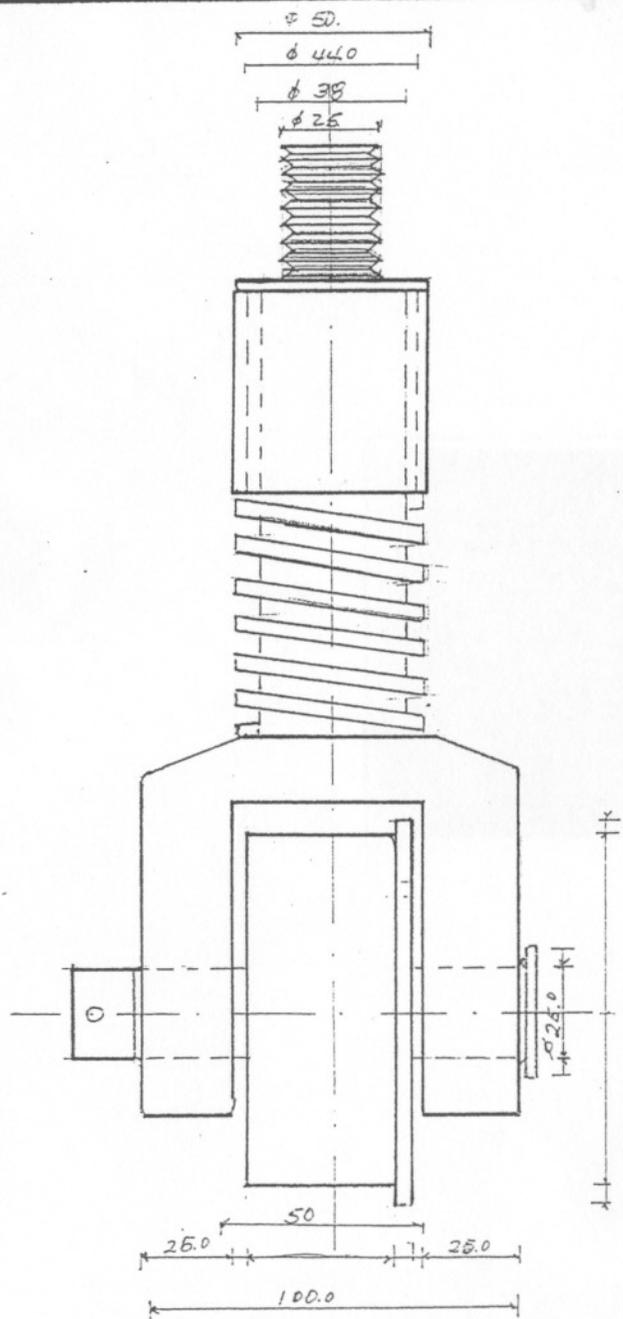
4.2 Recomendaciones

- El resultado de este estudio nos orienta a pensar que dentro del mismo mercado del agua potable existen otras oportunidades con la fabricación de accesorios de hierro dúctil que tienen mejor precio internacional, por lo que se recomienda al sector de la fundición a que participen de los proyectos de fabricación de este tipo de productos en vez de tubería

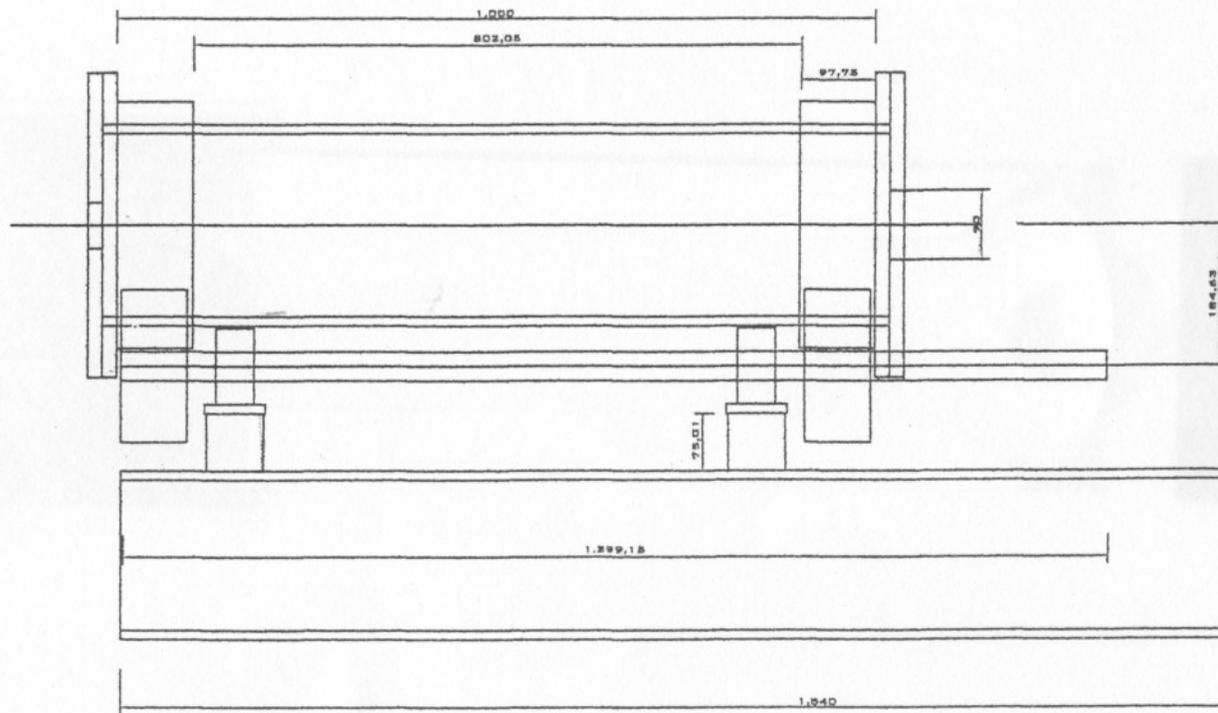
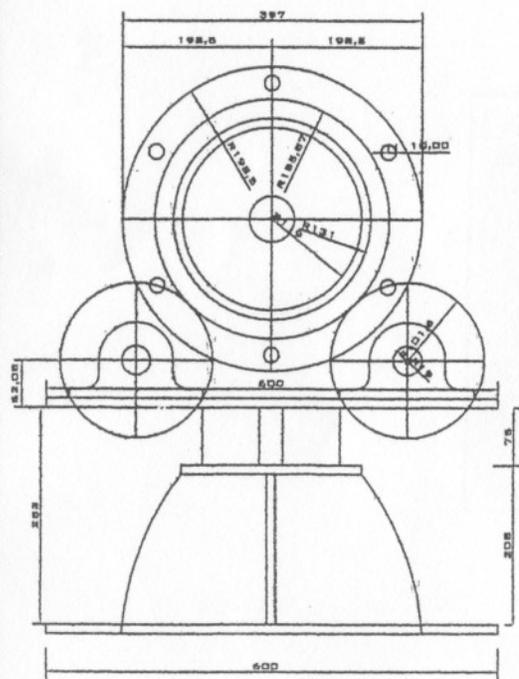
PLANO 1 DETALLE DE MEDIDAS DE
FOSO PARA LA MÁQUINA



Escala 1:10	DETALLE DE FOSO PARA LA MAQUINA	Dibujo	Plano # 1
		Fecha	11/11/2008
		Aprobado	
		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	



Escala 1:10	DETALLE DEL SISTEMA DE AMORTIGUACION	Dibujo	Plano # 2
		Fecha	11/11/2008
		Aprobado	
		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	



Escala 1:10	DETALLE DEL SISTEMA CILINDRO CENTRIFUGADOR	Dibujo	Plano # 3
		Fecha	11/11/2008
		Aprobado	
		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	

BIBLIOGRAFIA

1. CENTRIFUGAL CASTING, Janco, Nathan, Illinois, 1988
2. FABRICACIÓN DE VÁLVULAS DE HIERRO DÚCTIL PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL. Ing. Javier Flor, ESPOL, 2005
3. METAL HANDBOOK, Ninth Edition tomos 1, 2 y 3
4. SAE Handbook, Part 1 , 1979
5. FABRICACIÓN DE HIERRO DÚCTIL EN HORNO DE CRISOL, F. Espinoza, 1982
6. Wiesner Inox , INFORME TÉCNICO
7. FABRICACIÓN DE HIERRO DÚCTIL EN HORNO DE CUBILOTE , J. Flor Diaz, 1978
8. EQUIPO DUPLEX PARA FABRICACIÓN DE HIERRO DÚCTIL. I. Wiesner, México 1975
9. ASM VOL. 14
10. ASM VOL 1