

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la**

**Producción.**

“Elaboración de Barras de Aleaciones Especiales por

Centrifugación bajo Norma ASTM”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentado por:

Juan Fernando Villacís Montaña

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2009

## **AGRADECIMIENTO**

A todas las personas que de una u otra manera me ayudaron en la realización de este trabajo y en especial a Dios y al Ing. Ignacio Wiesner Falconí, Director de Tesis, a mis padres y amigos.

## **DEDICATORIA**

A DIOS

A MIS PADRES

A MI HERMANOS

A MIS AMIGOS

## **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

Ing. Francisco Andrade S.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Ignacio Wiesner F.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Javier Bermúdez R.  
VOCAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Juan F. Villacís Montaña

## RESUMEN

Se sigue un proceso de simulación para hacer solidificar bajo presión una aleación de aluminio y establecer un paralelismo en los parámetros de la solidificación por centrifugación, que es un proceso, el mismo que depende de la presión por la cual es comparable para llegar a determinar el número de G con la que debe girar el molde para la creación de muchos centros de nucleación y crecimientos de grano que afinan la estructura y generan una elevada resistencia mecánica.

El trabajo se hizo en una planta artesanal de producción de barras macizas de la aleación ASM A713.0 cuyos productos adolecen de las fallas comunes a las producciones de este tipo.

El uso de la centrifugación mejoró la calidad de los metales a un costo accesible por cambio de tecnología, estimando los costos de producción para los diferentes tipos de molde para centrifugación se establece que se debe trabajar tanto con el moldeo en arena como en molde metálico de manera alternada, para producir barras y piezas respectivamente, brindándole al fundidor la versatilidad que se requiere para producciones de pequeñas series.

Con este método de producción masiva se logrará eliminar las debilidades y falencias que tiene esta empresa y le dará la oportunidad de posesionarse en el mercado puesto que calculando el costo de producción se tiene un amplio margen venderlo a menor precio y con la confiabilidad de una calidad ajustada a norma.

## INDICE GENERAL

RESUMEN.....	III
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPITULO 1

<b>1. DEFINICION DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. Fundamentos del proceso de centrifugación vertical.....	11
1.2. Prototipo de centrifugadora nivel planta tipo piloto.....	16
1.3. Ventajas tecnológicas de la centrifugación para elaboración de barras.....	19
1.4. Ajuste de la máquina por variación de parámetros.....	21

### CAPITULO 2

<b>2. TRABAJO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>37</b>
2.1. Determinación de parámetros G para la centrifugación por medio de ensayos de compresión durante la solidificación.....	37
2.2. Elaboración de molde con barras de diámetros diferentes.....	51
2.3. Efecto de la velocidad lineal sobre el tamaño de grano de	



Solidificación.....	59
2.4. Control de calidad metalúrgico por medio de ensayos de laboratorio ordinarios cambiando el tamaño de grano.....	62
<b>CAPITULO 3</b>	
<b>3. EVALUACION TECNICA - ECONOMICA.....</b>	<b>66</b>
3.1. Evaluación técnica con relación a la calidad normalizada.....	66
3.2. Evaluación económica.....	69
<b>CAPITULO 4</b>	
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>APENDICES</b>	
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	

## ABREVIATURAS

Rpm	Revoluciones por minuto
ASM	American Society for Materials
Min.	Minutos
m	Metros
m/s	Metros por segundo
N	Newton
Kg	Kilogramos
m/s <sup>2</sup>	Metros por segundo al cuadrado.
°C	Grados centígrados
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono.
UNS	Unified Numbering System.
MPa	Mega Pascales
gr/cm <sup>3</sup>	Gramos por centímetros cúbicos.
Al	Aluminio
Cu	Cobre
Zn	Zn
Ti	Titanio
Fe	Hierro
Cr	Cromo
G	Fuerza de Gravedad
Hr	Hora

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1 Fusión en horno de inducción, elaboración de aleaciones ferrosas y aceros.....	4
Figura 1.2 Proceso de elaboración de molde en arena de sílice/silicato de sodio/dióxido de carbono $CO_2$ .....	5
Figura 1.3 Operación de verter metal fundido en molde de arena o colado por gravedad $g=1$ .....	5
Figura 1.4 control de calidad mediante microscopía óptica computarizada.....	6
Figura 1.5 Esquema del proceso de producción que se sigue para aseguramiento de la calidad de los aceros inoxidables fundidos en Intramet.....	7
Figura 1.6 Formas típicas obtenidas por el método de centrifugación vertical.....	9
Figura 1.7 Fundición centrifugada .....	15
Figura 1.8 Fundición centrifugada: (a) la fuerza centrífuga hace que el metal fluya a las cavidades del molde lejos del eje de rotación y (b) pieza fundida.....	16
Figura 1.9 Máquina centrifugadora vertical.....	18
Figura 1.10 Instalación típica de una máquina Centrifugadora Vertical .....	19
Figura 1.11 Componentes del proceso de Centrifugación Vertical .....	21
Figura 1.12 Cabezal de metal fundido vs. velocidad periférica.....	29
Figura 2.1 Ilustración del proceso llamado "Squeeze Casting".....	39
Figura 2.2 Esquema del molde y medidas en milímetros para colado de metal y solidificación bajo presión.....	41
Figura 2.3 Equipo experimental para la simulación de fuerza $g$ durante la solidificación.....	42
Figura 2.4 Operaciones de las pruebas de solidificación bajo Presión .....	44
Figura 2.5 Procedimiento para realizar la preparación superficial y	

	realizar las macrografías.....	46
Figura 2.6	Macrografías de probeta sometida a 87 kgf.....	47
Figura 2.7	Macrografías de probetas sometidas a 131 174 kgf.....	48
Figura 2.8	Macrografías de probetas sometidas a 218 y 392 kgf.....	49
Figura 2.9	Fabricación de molde y moldeo con formas de barras de sección circular.....	54
Figura 2.10	Esquema de molde para la centrifugación de barras de aleaciones especiales .....	57
Figura 2.11	Elaboración de nuevo molde para ensayos de centrifugación....	58
Figura 2.12	nomograma para determinar la velocidad del molde basado en el diámetro interior de la pieza fundida y la requerida fuerza centrífuga .....	61
Figura 2.13	Resultados obtenidos mediante el uso del primer molde .....	64
Figura 2.14	exámenes visuales y metalográficos de la calidad de las barras centrifugadas.....	65
Figura 3.1	máquina de ensayos de tracción Versatester.....	69
Figura 3.1	máquina de ensayos de tracción Versatester.....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1	Comparación entre el método convencional por gravedad y el método por centrifugación sobre las propiedades de los metales fundidos.....10
Tabla 2	Número de entradas según el diámetro de la pieza.....34
Tabla 3	Porcentajes permitidos de los elementos que conforman la aleación UNS A713.0 .....63
Tabla 4	Porcentajes utilizados por Intramet para la elaboración de la aleación UNS A713.0.....63
Tabla 5	Esfuerzo de tracción según norma ASM.....66
Tabla 6	Probetas de Aluminio UNS A713.0 coladas en molde de arena, molde metálico y centrifugados para ensayos de tracción.....68
Tabla 7	Comparación entre esfuerzo de tracción real y esfuerzo de tracción según la norma ASM.....69
Tabla 8	Costo de producción del aluminio UNS A713.0 con molde de arena.....71
Tabla 9	Flujo de caja en el primer año para la fabricación de barras de aluminio en molde de arena.....72
Tabla 10	Flujo de caja en el segundo año para la fabricación de barras de aluminio en molde de arena .....73
Tabla 11	Costo de producción del aluminio UNS A713.0 con molde metálico.....74
Tabla 12	Flujo de caja en el primer año para la fabricación de barras de aluminio en molde metálico .....75
Tabla 13	Flujo de caja en el segundo año para la fabricación de barras de aluminio en molde metálico .....76

## INTRODUCCION

INTRAMET, es una empresa ecuatoriana de servicios de Ingeniería que produce piezas y componentes fundidos con más de 40 aleaciones diferentes con los más altos estándares de fabricación para el mantenimiento de maquinaria industrial, cuyo propietario es el Ing. Ignacio Wiesner F., que trabaja hace 33 años en el campo de la investigación aplicada, la transferencia de tecnología de fabricación de aleaciones y procesos de manufactura, hasta hoy sigue siendo profesor de la FIMCP.

Esta empresa de transformación metalúrgica por largo tiempo ha realizado sus trabajos mediante el método convencional de colado por gravedad, de una forma artesanal y no industrial, lo cual lleva desventajas frente a los productos importados la ha obligado a buscar métodos innovadores de bajo costo, tal como el desarrollado en este trabajo, los cuales le permitan ir a la par e incluso ser líder en el mercado ecuatoriano, ya que cuenta con las herramientas adecuadas para hacer esto posible.

El proceso de centrifugación de piezas no es un método nuevo, aunque sus parámetros actualmente siguen siendo estudiados, ya que algunos de ellos aún son una incógnita en cuanto a su contribución en calidad y resistencia mecánica en la pieza metálica centrifugada, por esto INTRAMET ha optado por investigar algunos de los parámetros del proceso de centrifugación, previo a realizar la inversión económica, y cambiar sus actuales métodos artesanales por la producción en serie. Estos resultados proveerán de una visión más clara de las ventajas del método de

centrifugación aplicado a una empresa en crecimiento y el costo-beneficio de implementar este nuevo método en sus instalaciones y brindar a sus clientes una calidad libre de defectos de fundición.

# CAPITULO 1

## 1.DEFINICION DEL PROBLEMA

INTRAMET, es una empresa que produce piezas y componentes mecánicos en aleaciones no ferrosas como bronce al estaño, bronce al estaño - plomo, bronce al manganeso, bronce al aluminio, aluminio-zinc, aluminio-cobre-silicio, además de hierro gris, hierro dúctil, aceros al carbono y aceros inoxidable. Partiendo desde chatarras seleccionadas se fabrican partes de alta complejidad tecnológica con aleaciones certificadas ASM, UNS ASTM y SAE. Su sistema de producción actual es artesanal por completo.

Realiza servicios de Ingeniería y utiliza los procesos de manufactura para resolver problemas industriales relacionados con partes de maquinaria para las cuales no existen repuestos en el mercado internacional. Para realizar partes de alta complejidad o de considerable peso se cuenta con un horno de inducción de 500



kg., además de un horno basculante de 250 kg y uno de cubilote de 300 mm de diámetro para realizar piezas en hierros fundidos.



**FIGURA 1.1 FUSIÓN EN HORNO DE INDUCCIÓN, ELABORACIÓN DE ALEACIONES FERROSAS Y ACEROS.**

El proceso comienza con la elaboración del molde de arena que puede ser en sílice con silicato de sodio o con arena en verde. Este proceso es uno de los más importantes ya que la forma de la pieza a obtener se basará en las formas dadas al molde de arena de alta resistencia mecánica (ver figura 1.2).

Cuando no se cuenta con un modelo original se elabora un modelo por lo general en madera para realizar el moldeo manual y obtener el molde deseado. Luego de esto se empieza a fundir el metal con el que se va a realizar el trabajo y después de alcanzar la temperatura apropiada se procede a verterlo en tal molde.



**FIGURA 1.2 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MOLDE EN ARENA DE SÍLICE/SILICATO DE SODIO/DÍÓXIDO DE CARBONO CO<sub>2</sub>.**



**FIGURA 1.3 OPERACIÓN DE VERTER METAL FUNDIDO EN MOLDE DE ARENA O COLADO POR GRAVEDAD, G = 1.**

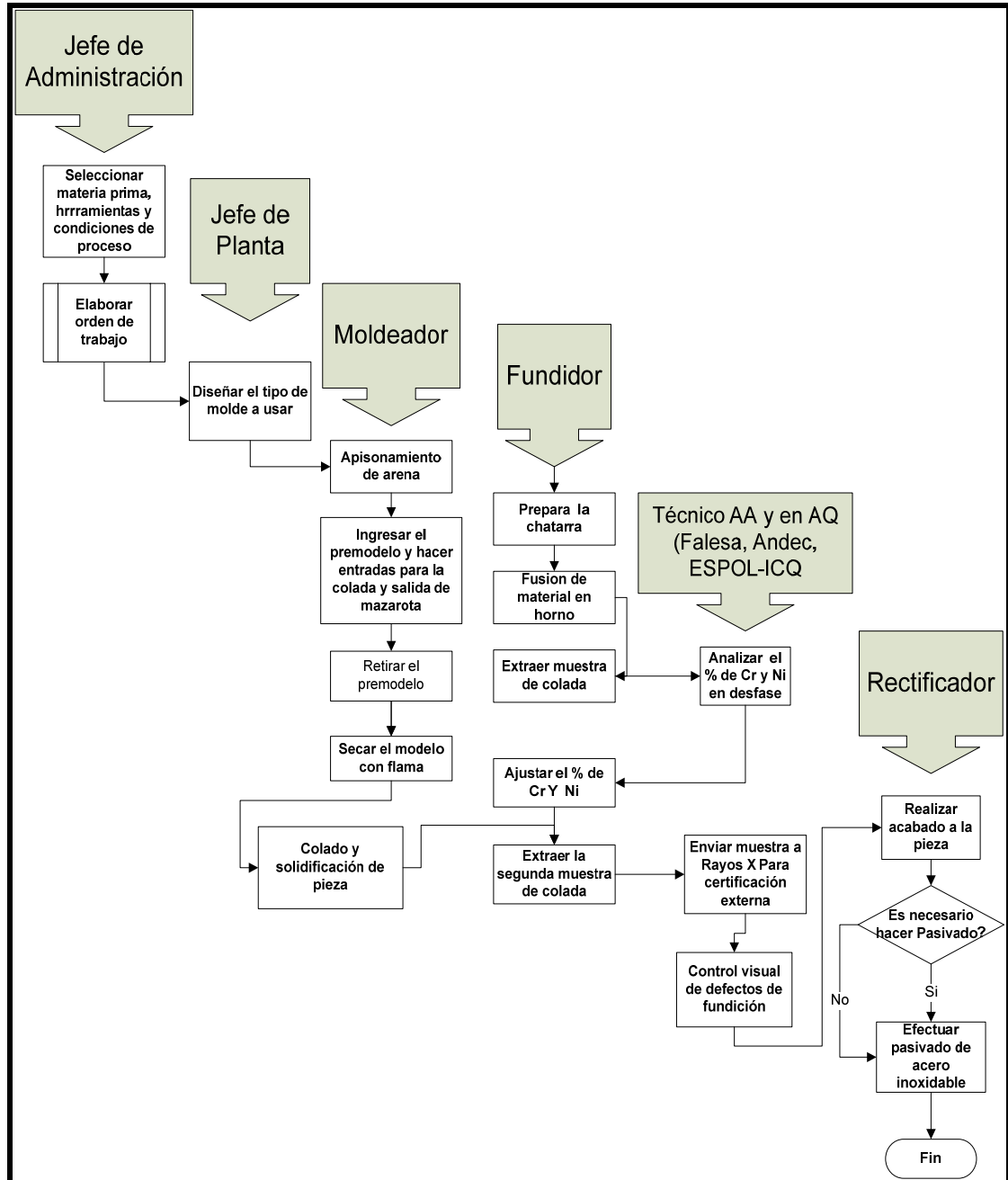


**FIGURA 1.4 CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA COMPUTARIZADA.**

Para el control de calidad se aparta un poco de este metal líquido en lingotillos, cuñas de temple y medallones para realizar los respectivos controles, tales como metalografías, ensayos de tracción y dureza entre otros ensayos normalizados (figura 1.4).

Se efectúan análisis químicos durante la fusión y luego se hacen los ajustes requeridos para tener composición normalizada, luego, si realizando los controles de calidad el metal no pasa por las pruebas, entonces se hacen correcciones en la composición química y nuevamente se aplican los controles de calidad hasta que éste cumpla con la norma establecida por la ASTM, SAE y UNS. Cuando se comprueba la calidad del metal fundido, este es fundido en moldes y luego es

llevado a maquinar para darle el acabado final o el requerido por el cliente. Todo el proceso de producción está explicado en detalle en la figura 1.5.



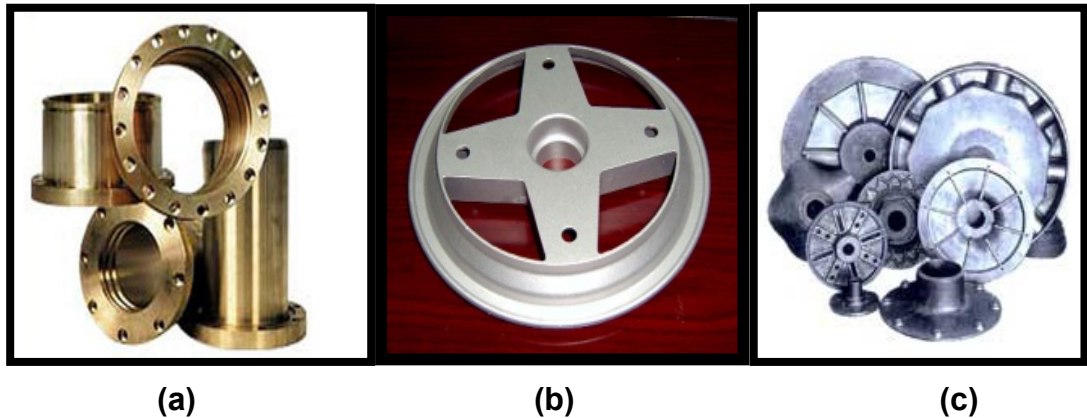
**FIGURA 1.5. ESQUEMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN QUE SE SIGUE PARA ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES FUNDIDOS EN INTRAMET.**

El método utilizado actualmente por INTRAMET es cien por ciento artesanal como ya se había mencionado, lo cual tiene más desventajas que ventajas, las que en muchos casos afectan a la calidad de la pieza metálica ya terminada, esta conlleva en ciertas ocasiones a repetir el trabajo, lo cual es una pérdida de recursos y tiempo, además de crear mucho desperdicio de energía, todo esto es traducido a pérdida de dinero, sin contar con el hecho de que la producción artesanal tiene sus limitaciones cuando se requiere obtener mayor cantidad de piezas en un tiempo determinado.

Conociendo de las limitaciones que tiene el actual método de elaboración de piezas, y sabiendo que la calidad actual puede ser mejorada, INTRAMET, "Industrias de Transformación Metalúrgica", desde el año 2008, ha tomado la decisión de cambiar su método de producción cotidiano, por métodos de producción masiva que le permitan satisfacer los requerimientos actuales del mercado, ya que este ha ido continuamente creciendo, solicitando metales de aleaciones de alta resistencia mecánica para usos especializados y de calidades más exigentes en la industria del medio, lo que lleva a esta empresa a no quedarse atrás en estos requerimientos. Ahora cuenta con dos máquinas para la producción de barras macizas y bocines de bronce en sus instalaciones, una centrifugadora tipo horizontal y otra del tipo vertical,

ambas con tamaño tipo piloto, con las cuales podrá eliminar las fallas intrínsecas del actual método de colado por gravedad, obteniendo piezas con indudable mejor calidad tanto visual como de estar exentas de defectos internos, alta resistencia mecánica y otras exigencias de diseño.

Con el método de centrifugación vertical se pueden elaborar diversas clases de implementos usados en la industria, y de diferentes formas, como bujes y diversas clases de elementos cuya altura sea por lo mínimo la mitad de su diámetro. Los metales más utilizados en el método de centrifugación son prácticamente todos los aceros, las aleaciones de níquel, el cobre, así como el aluminio y sus aleaciones. (Ver figura 1.6)



**FIGURA 1.6. FORMAS TÍPICAS OBTENIDAS POR EL MÉTODO DE CENTRIFUGACIÓN VERTICAL**

Técnicamente hablando acerca de las ventajas que ofrece la centrifugación, estas están orientadas con la capacidad de generar altas presiones durante la solidificación, las que se obtienen mediante la

aplicación de altas velocidades de rotación del molde. La pieza fundida por centrifugación adquiere altas propiedades mecánicas hasta treinta por ciento de incremento en comparación con la obtenida mediante métodos de colado por gravedad, adicionalmente la calidad que se obtiene es muy estable, lo que hace de este un método muy acertado para la obtención de piezas fundidas sin necesidad de recurrir a máquinas de inyección que son de alto costo y consumen mucho más energía para realizar la inyección de los metales en cámara fría o cámara caliente. A continuación se presenta una tabla con las ventajas del método de centrifugación con respecto al método convencional por gravedad, que es el efectuado en INTRAMET actualmente.

**TABLA 1**

**COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO CONVENCIONAL POR GRAVEDAD Y EL MÉTODO POR CENTRIFUGACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS METALES FUNDIDOS.**

<b>MÉTODO POR GRAVEDAD</b>	<b>MÉTODO POR CENTRIFUGACIÓN</b>
Orientación de grano no uniforme y lineal	Orientación de grano uniforme y radial
Esfuerzo de tensión bajo	Esfuerzo de tensión alto
Dureza baja y no uniforme	Dureza más uniforme
No soporta cargas de impacto	Soporta cargas de impacto
Pobre acabado de superficie	Excelente acabado de superficie
Micro y macro porosidad presente	Libre de micro y macro porosidad
Vida corta	Larga vida

Cambiando el actual método de trabajo por los métodos de centrifugación vertical y horizontal que se están implementando en esta empresa fundidora, tendrá mayor oportunidad de posicionarse en el mercado de barras para maquinas y hacer piezas de mantenimiento, mejorará su eficiencia, aumentará la producción y aumentará la productividad. No existe aún empresa nacional que compita en calidad con los productos importados por las características no uniformes de la producción artesanal. El presente proyecto basa el cambio requerido por INTRAMET por el uso de métodos industriales para la producción y particularmente por el uso de la centrifugación vertical.

### **1.1 Fundamentos del proceso de centrifugación vertical.**

#### **Características del proceso:**

- Se caracterizan por su alta densidad, especialmente en las regiones externas de la pieza, donde la fuerza es más grande.
- La alta velocidad de rotación del molde genera fuerzas centrífugas que impulsan al metal a tomar la forma de la cavidad del molde.
- La forma exterior de la fundición puede ser redonda, octagonal, hexagonal o cualquier otra.
- La forma interior de la fundición es perfectamente redonda debido a la simetría radial de las fuerzas en juego.



- La orientación del eje de rotación del molde puede ser horizontal o vertical (la más común).

### **Fundición Centrífuga**

La fundición centrífuga se refiere a varios métodos de fundición caracterizados por utilizar un, molde que gira a alta velocidad para que la fuerza centrífuga distribuya el metal fundido en las regiones exteriores de la cavidad del dado. El grupo incluye:

- Fundición centrífuga real.
- Fundición semicentrífuga.
- Fundición centrifugada o centrifugado.

### **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, camisas y bocines manguitos y anillos. 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 orientación del eje de rotación del molde puede ser horizontal o vertical, pero esta última es la más común. Para que el proceso trabaje satisfactoriamente se calcula la velocidad de rotación del molde en la fundición centrífuga horizontal.

En la fundición centrífuga vertical el efecto de la gravedad que actúa en el metal líquido causa que la pared de la fundición sea más gruesa en la base que en la parte superior. El perfil interior de la fundición tomará una forma parabólica.

En la práctica es conveniente que la longitud de las partes hechas por fundición centrífuga vertical no exceda de dos veces su diámetro. Esto es satisfactorio para bujes y otras partes que tengan diámetros grandes en relación con sus longitudes, especialmente si se va a usar el maquinado para dimensionar con precisión el diámetro interior.

Las fundiciones hechas por fundición centrífuga real se caracterizan por su alta densidad, especialmente en las regiones externas de la pieza, donde la fuerza es más grande. La contracción por solidificación en el exterior del tubo fundido no es de consideración, debido a que la fuerza centrífuga relocaliza continuamente el metal fundido hacia la pared del molde durante la solidificación. Cualquier impureza en la fundición tiende a ubicarse en la pared interna y puede eliminarse mediante maquinado si es necesario.

En la **fundición centrífuga vertical** el efecto de la gravedad que actúa en el metal líquido causa que la pared de la fundición sea más gruesa en la base que en la parte superior. El perfil interior de la fundición tomará una forma parabólica. La diferencia entre el radio de

la parte superior y del fondo se relaciona con la velocidad de rotación como sigue:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gl}{R_i^2 - R_b^2}}$$

Donde:

$L$  = longitud vertical de la fundición (m)

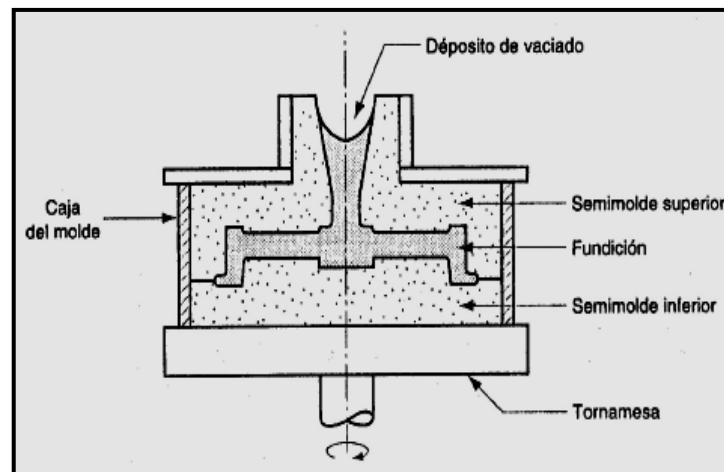
$R_i$  = radio interno de la parte superior de la fundición (m)

$R_b$  = radio interior en el fondo de la fundición (m).

Se puede usar la ecuación anterior para determinar la velocidad rotacional requerida para la fundición centrífuga vertical, dadas las especificaciones de los radios internos en la parte superior y en el fondo. De la fórmula se desprende que para igualar a  $R_i$ , y a  $R_b$ , la velocidad de rotación  $N$  tendría que ser infinita, lo cual desde luego es imposible. En la práctica es conveniente que la longitud de las partes hechas por fundición centrífuga vertical no exceda de dos veces su diámetro. Esto es satisfactorio para bujes y otras partes que tengan diámetros grandes en relación con sus longitudes, especialmente si se va a usar el maquinado para dimensionar con precisión el diámetro interior.

**Fundición semi-centrífuga** En este método se usa la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas en lugar de partes tubulares, como se muestra en la figura. 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, como sugiere nuestra ilustración del proceso. (Ver figura 1.7)

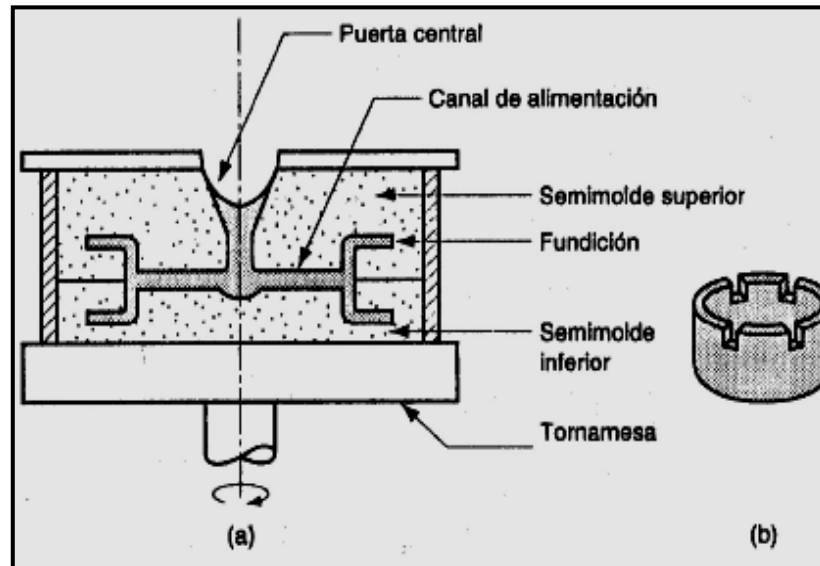


**FIGURA 1.7 FUNDICIÓN SEMICENTRIFUGA**

### **Fundición centrífuga**

Es un sistema donde por medio de un tallo se hace llegar metal fundido a racimos de cavidades colocadas simétricamente en la periferia, 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. (Ver figura 1.8)



**FIGURA 1.8 (A) FUNDICIÓN CENTRIFUGADA: LA FUERZA CENTRÍFUGA HACE QUE EL METAL FLUYA A LAS CAVIDADES DEL MOLDE LEJOS DEL EJE DE ROTACIÓN Y (B) PIEZA FUNDIDA.**

## 1.2 Prototipo de centrifugadora con nivel de planta tipo piloto.

El tipo de centrifugadora a utilizarse en el presente proyecto es del tipo vertical fue diseñada y fabricada por el Ing. Carlos Aranda y se encuentran en las instalaciones de la nave de producción de INTRAMET.

Este sistema se constituye básicamente en un plato de acero que es donde el molde con el metal a fundir es ubicado y gira alrededor de un eje vertical, el cual está impulsado por un motor de corriente directa de 10 HP, estos dos unidos mediante un sistema de

transmisión de movimiento constituido por dos bandas tipo 3V y un par de poleas, una del lado de la chumacera que está hecha de fundición de hierro y que se encuentra en sujeción mecánica al plato y que es de 4 pulgadas con dos canales, y otra con las mismas características pero fabricada de aluminio que va al motor eléctrico.

El motor DC que se encuentra verticalmente colocado está sujeto mediante pernos al armazón de la centrifugadora.

El sistema eléctrico consta de un rectificador que convierte la corriente alterna a corriente continua el cual está conectado a un reóstato que actúa como regulador de velocidad, que sincroniza la velocidad requerida dependiendo de las Gs necesitadas, las cuales son calculadas mediante tablas o fórmulas ya establecidas; este es conectado directamente a un interruptor eléctrico que se encuentra en la caja de alimentación de energía eléctrica. El armazón de la máquina fue hecho básicamente de, platinas ángulos y planchas de distintos espesores, las que fueron cortadas en distintos tamaños y formas, además roladas y luego soldadas.

Esta máquina consta además de un sistema de enfriamiento que se encuentra al interior de la máquina, que es el encargado de llevar el molde que contiene el metal fundido de una temperatura alta hasta una que permita desmontar lo del plato, este es de forma

circunferencial y lleva boquillas ubicadas en columna y que están en diferentes partes alrededor del plato giratorio.

Este sistema está conectado mediante tuberías al sistema de suministro de agua que consta de una bomba que se encuentra a unos 5 metros del lugar, que es la encargada de transportar el agua de enfriamiento al lugar de trabajo, adicionalmente en la centrifugadora hay un sistema de recirculación de agua encargado de retornar el agua caliente al sistema de enfriamiento basado en ventiladores y radiadores ubicado a 3.5 metros sobre la bomba.



**FIGURA1.9 MAQUINA CENTRIFUGADORA VERTICAL**



**FIGURA 1.10 INSTALACIÓN TÍPICA DE UNA MÁQUINA CENTRIFUGADORA VERTICAL**

### **1.3 Ventajas tecnológicas de la centrifugación para elaboración de barras.**

#### **Mejoramiento de las propiedades físicas**

La formación de grano a altas presiones que las gravedades combinan con la solidificación direccional son dos características que son únicas en el proceso de centrifugación, el producto exhibe una estructura granular más fina y compacta además de la alta densidad, sin absolutamente ninguna porosidad.

A causa de la uniformidad del tamaño de grano, las propiedades físicas tales como el esfuerzo a la tensión, el esfuerzo a la fluencia, elongación, reducción del área, y otras propiedades deseables son mejoradas hasta un 30% sobre los métodos convencionales de fundición tanto estática como por gravedad.



### **Vida más larga de los productos centrifugados**

Las partes hechas en el proceso de centrifugación con tamaño de grano fino y estructura más densa, provee a los materiales condiciones de trabajo más confiable y una vida de servicio más prolongada, además que pueden soportar mayores esfuerzos e impactos sin fracturarse.

Debido a la alta confiabilidad y vida de los componentes producidos usando este proceso, el costo total sobre la vida del producto final es mucho más bajo a causa de su vida más extensa, bajas situaciones de falla además de menos mantenimiento.

### **Reducción de rechazos**

Mientras el metal es fundido, las fuerzas centrifugas distribuyen el metal contra las paredes del molde con grandes fuerzas, de ese modo desplaza los óxidos e impurezas más ligeras causándoles que se coloquen en la superficie interior del cilindro que está siendo fundido. Los óxidos e impurezas son fácilmente removidos en el proceso de maquinado.

### **Flexibilidad en la producción**

El proceso de centrifugación permite una producción económica con diversidad de rangos tanto en volúmenes como en formas y cantidades. Esto convierte a este método en uno ampliamente usado para crear distintas formas, con propiedades mecánicas elevadas y costos de producción relativamente bajos.

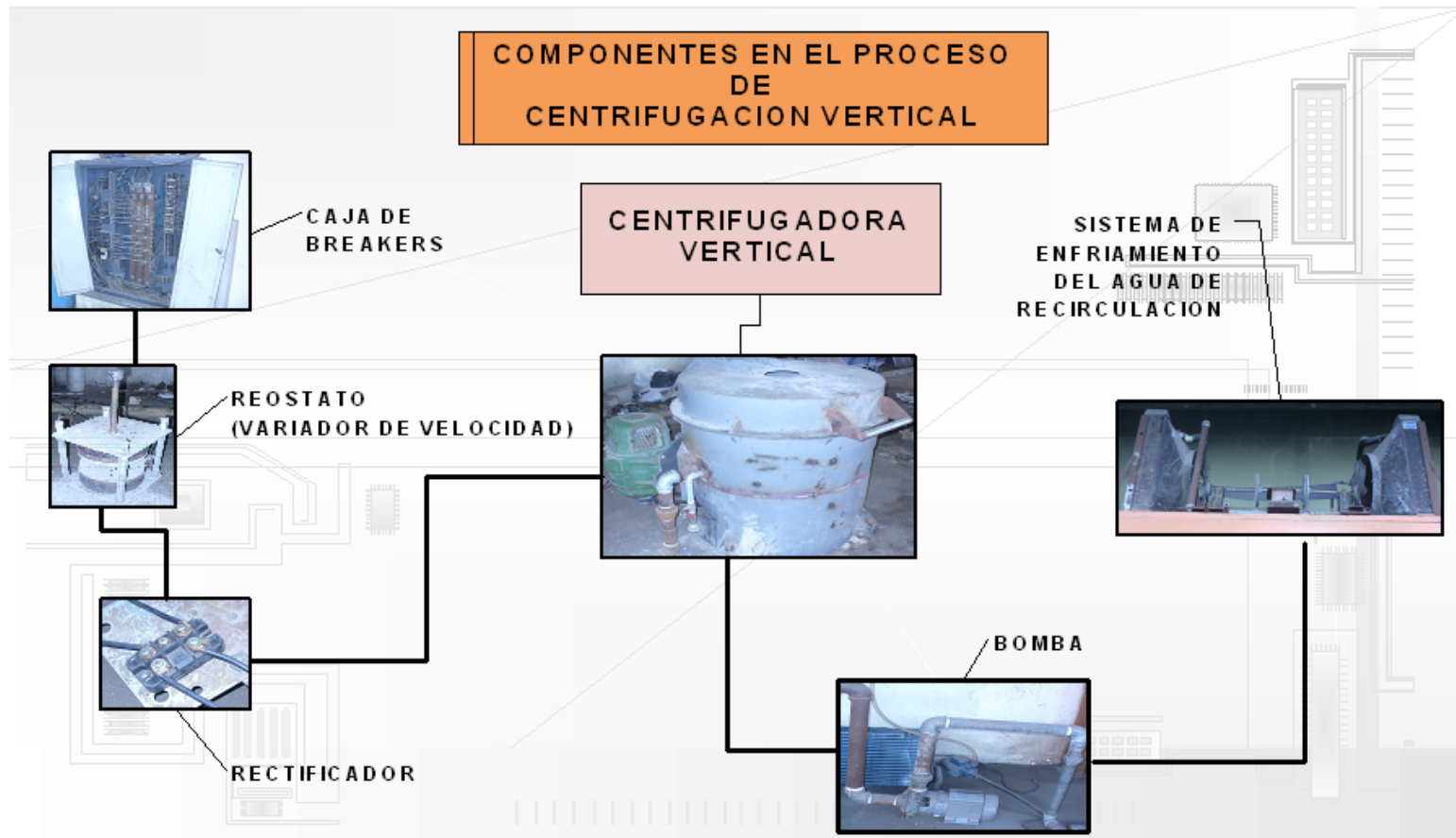


FIGURA 1.11 COMPONENTES EN EL PROCESO DE CENTRIFUGACIÓN VERTICAL

#### **1.4 Ajustes de la máquina para variación de parámetro.**

Aunque los efectos de la centrifugación sobre las piezas fundidas no son enteramente conocidos, se puede asumir que los efectos en la pieza fundida podrían ser divididos mediante ciertos parámetros como:

- Presión centrífuga
- Vibración intrínseca del proceso
- Dinámica de los fluidos

##### **Presión y fuerza centrífuga**

El efecto centrífugo no es tan elevado para causar un cambio en la solidificación debido a la alta presión como en otros procesos de fundición por presión. Cuando el efecto de diferentes densidades de una aleación existe es esperado que haya una composición química diferente o por lo menos diferente concentración de fases a lo largo de una dirección de la pieza fundida y las resultantes propiedades mecánicas como el esfuerzo de tensión

##### **Vibración**

Aunque la vibración no está directamente asociada con el proceso de centrifugación de piezas fundidas, es siempre asociado con el proceso de centrifugación debido a la inherente vibración de los

equipos. Así, es importante tener en consideración que esto podría tener repercusión en las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la pieza fundida. El efecto eventual de la vibración tendría un incremento en el acrecentamiento del conjunto de propiedades mecánicas de la pieza fundida debido al refinado tamaño de grano.

### **Dinámica de fluidos**

Se espera que la dinámica de fluidos sea muy diferente bajo la fundición colada a presión por gravedad y el proceso de centrifugación de piezas fundidas más la fundición colada a presión por gravedad.

Se espera que la turbulencia de la colada en el proceso de centrifugación sea mucho más alta dentro del molde. Basados en resultados obtenidos en estudios, explicados en términos de los efectos como presión vibración y dinámica de fluidos, se observa en las piezas fundidas mediante centrifugación un incremento en propiedades tales como fuerza de ruptura y esfuerzo en la dirección de centrifugación, lo que podría explicarse basado en el efecto de la presión. Sin embargo sería de esperarse basado solo en el efecto de la presión de centrifugación que las propiedades mecánicas tendrían un decremento en otro sitio, pero esto no sucede, una explicación

podría ser si considera que uno de los otros dos efectos está también presente. Este efecto promovería un incremento en el conjunto de propiedades de la pieza fundida.

Existen varias variables por mencionar en adición a las citadas anteriormente, las que juegan un papel preponderante en la centrifugación, por el aporte que brinda cada una de estas en las características finales de la pieza fundida, tales como:

- Temperatura de vaciado del metal
- Velocidad de vaciado del metal
- Tipo de molde a utilizar
- Desgasificación del metal fundido
- Características del flujo, laminar o turbulento
- Velocidad de rotación
- Temperatura del molde

Velocidad de rotación

La velocidad de rotación es un parámetro muy importante en cuanto a centrifugación se refiere, debido a la relación directa con la fuerza centrífuga por medio de la siguiente ecuación:

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2$$

Gracias a la variación de la velocidad se puede controlar el rango de valores de fuerzas G, que permiten que la pieza fundida centrifugada

adquiera las propiedades de alta calidad y resistencia que caracterizan a este proceso.

Por la gran importancia que tiene este parámetro en lo referente a centrifugación será mencionada más a fondo en el capítulo siguiente.

### **Temperatura de vaciado del material**

Cuando se vierte material fundido en un molde permanente ya sea estáticamente o mediante centrifugación, en la mayoría de los casos las temperaturas de vaciado son exactamente las mismas. Sin embargo, en algunos casos es necesario verter la pieza a centrifugar a una más alta o más baja temperatura que la usada en fundición estática. A causa de que el molde está rotando durante el proceso de centrifugación, al metal fundido se le es proporcionado con adicional velocidad sobre la que existe durante el proceso estático. El resultado es que el metal tiene más movilidad y adicional energía cinética. Este es el hecho por el cual el proceso de centrifugación de piezas fundidas, en muchos casos, es vaciado a más bajas temperaturas de metal que en el estático.

### **Tipos de molde usados en el proceso de centrifugación vertical**

#### **Moldes de arena**

Cuando moldes de arena son usados, particularmente arena en verde, es usualmente necesario empezar vertiendo el metal fundido a

una baja rotación de molde. Cuando el molde es parcial o totalmente vertido, la velocidad de rotación se incrementa a la velocidad que se nominal de trabajo para prevenir o reducir la erosión de las cavidades del molde por el metal fundido.

El metal por lo general debe ser vertido mientras el molde se encuentra rotando, incluso si la velocidad es de solamente 5 rpm. Esto asegura la distribución apropiada del metal caliente y frío en el molde para una óptima acción de alimentación.

**Moldes de arena en verde.** Los moldes para la fundición centrífuga pueden ser elaborados en arena verde o en molde de arena seca. Cuando los moldes en arena en verde son usados cajas de moldeo (preferiblemente cilíndricos) son requeridas. Tres métodos pueden ser usados para asegurar el arena en verde a la mesa de la máquina centrifugadora vertical.

En el primer método, dos pasadores son asegurados a la mesa sobre la cual se coloca la caja de moldeo. En el segundo método, un dispositivo similar a un mándril de torno se asegura a la mesa.

**Moldes con capa seca.** Caja de moldeo no es requerida cuando es usado molde seco de arena. Dos métodos se utilizan para manejar moldes con capa seca en la máquina centrifugadora.

En el primer método, los moldes de arena seca son colocados en una chaqueta formando un molde encamisado que es trasladado a la máquina centrifugadora y ubicado en la mesa. Las abrazaderas son usadas para mantener la cubierta sobre el molde y para mantenerla firmemente a la tabla.

En el segundo método, el molde en arena seca es trasladado por rodillos transportadores dentro de la máquina centrifugadora, en el que los rodillos son incorporados. Usando el cuerpo de una caja de moldeo de este tipo, moldes en arena seca y arena en verde pueden ser usados e intercambiados en la misma máquina centrifugadora.

### **Moldes permanentes**

Dos tipos básicos de molde permanente son usados: molde metálico, de grafito o de carbón. A causa de la más rápida extracción de calor del molde permanente, hay usualmente un incremento en la calidad (especialmente en las propiedades) de piezas fundidas producidas en este tipo de molde.

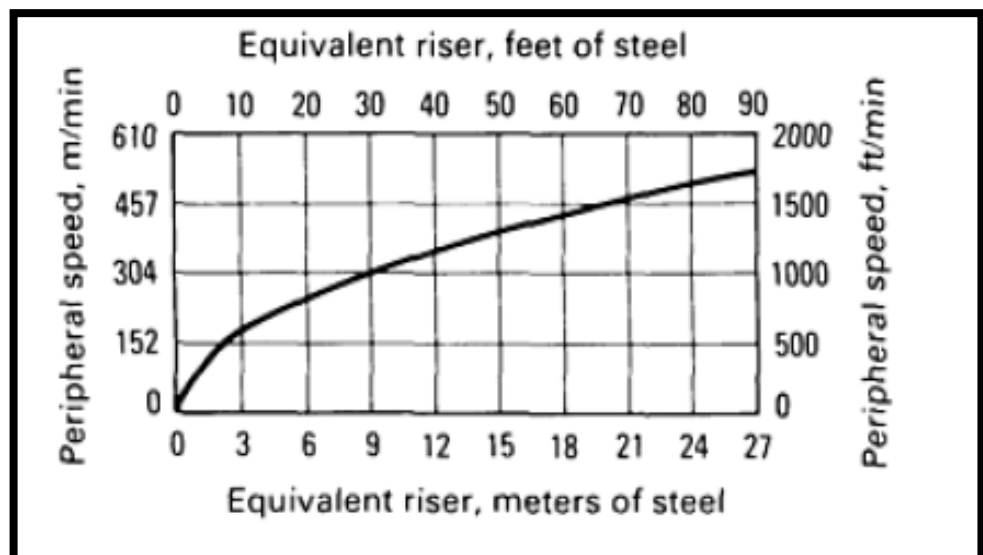


**Moldes de metal.** Un largo número de moldes de hierro fundido son usados para el método de centrifugación. Sin embargo, moldes de acero son más comunes y mucho más seguros. Los moldes de hierro fundido pueden ser peligrosos los defectos que podrían ocurrir durante el proceso y el hecho de que el hierro fundido tiene relativamente bajo esfuerzo de tensión. En adición, cuando los moldes de hierro fundido son enfriados por agua, hay siempre el peligro de agrietamiento o ruptura. Muchos moldes metálicos usados en fundición centrífuga son enfriados con agua en el diámetro exterior usando chorros de agua de alta velocidad para incrementar la tasa de solidificación.

### **Sistema de llenado para la fundición centrífuga**

La viabilidad de la pieza fundida como parte de usar los procesos de centrifugación o semicentrifugación, es determinada por el uso de configuraciones para la pieza fundida. El sistema de llenado de las fundiciones centrífugas emplean un simple bebedero, el cual combina la función de bebedero y mazarota. La fuerza centrífuga magnifica en gran proporción la acción de la mazarota y produce una gran densidad del metal que por otro lado resultaría en la pieza fundida. La figura 1.12 muestra que un molde de fundición centrífuga girando a una velocidad periférica de 305 m/min en el diámetro exterior de la pieza fundida tendrá un cabezal de 9 metros. Esto es equivalente a

una presión de 703 KPa (102 psi). La fundición estática típica tiene un cabezal de menos de 0.3 metros de altura. La fuerza centrífuga actuando en el metal fundido proveerá mejor alimentación que en el cabezal de llenado estático; por lo tanto, es posible alimentar al metal fundido en y a través de ligeras y delgadas secciones de molde dentro de más gruesas secciones de molde mucho más fácil que en la fundición estática.



**FIGURA 1.12 CABEZAL DE METAL FUNDIDO VS. VELOCIDAD PERIFERICA**

### **Técnicas de vaciado**

Para moldes permanentes la temperatura de vaciado del metal es aproximadamente 40<sup>o</sup> C más alta que la temperatura usada para la misma pieza fundida si esta fuera vaciada en un molde de arena de

manera estática. Esto es a causa del más rápido efecto de enfriamiento de los moldes metálicos.

La tasa de vaciado requerida para el llenado de un molde permanente en fundición centrífuga es considerablemente alta en comparación al molde de arena en el caso estático. Es particularmente importante que la tasa inicial de vaciado al principio sea muy alta para prevenir discontinuidad en el metal fundido. Para la mayoría de las piezas en fundición centrífuga pesando menos de 45 kg, la tasa de vaciado inicial recomendada es cerca de 9 kg/s, para piezas fundidas pesando hasta 450 kg un vaciado de 9 a 23 kg/s es recomendado. Cuando se verte en un molde vertical girando, es importante introducir el metal fundido dentro del molde en forma tal que se que se prevenga o minimice la turbulencia del metal fundido, el cual puede causar salpicaduras, rociado o goteos y pueden resultar en indeseables defectos de la pieza.

### **Entradas y alimentadores**

En su usual y más simple forma, la entrada de los moldes en la fundición centrífuga involucra un bebedero simple que funciona como mazarota y bebedero. La última parte del metal a solidificar en la cavidad del molde debería ser el bebedero. Así el principio de solidificación direccional es usado eficientemente, en el cual la

solidificación del metal en la cavidad del molde empieza en la localización más lejana al bebedero, y progresivamente procede hacia el bebedero o hacia la fuente de metal fundido. Este fluido de metal “alimenta” las partes de la pieza fundida progresivamente mientras el metal se solidifica y enfría, produciendo una sólida y densa pieza fundida. La fuerza centrífuga magnifica en gran magnitud esta acción de alimentación y produce una mayor densidad de metal en la pieza fundida.

Para calcular el tamaño de los bebederos y entradas de alimentación de metal se toma en cuenta algunas asunciones preliminares. Se asume que todo el metal colado llega a la misma temperatura y que la temperatura de las superficies del molde es la misma en todo punto del molde. Naturalmente se asume que el molde es todo de la misma composición. Estas condiciones son más cercanamente obtenidas en centrifugación cuando la entrada actúa como un alimentador. Realmente, la temperatura no es la misma. Inmediatamente después de colar, el metal más lejos a la entrada es el más bajo en temperatura. La temperatura se incrementa progresivamente hacia la entrada.

### **Factor de enfriamiento**

El factor de enfriamiento es una medida relativa del tiempo requerido para que la pieza fundida pierda calor hacia los alrededores, o cuán rápido el metal se solidifica. Durante el periodo de solidificación, el metal líquido dentro de la pieza fundida decrecerá en volumen y metal adicional será requerido, para que un bebedero o alimentador suministre este metal alimentador, es necesario que el bebedero enfríe más lentamente que la pieza fundida misma, por lo tanto el factor de enfriamiento de la entrada debe ser mayor que el de la pieza fundida.

Así por definición se tiene una medida de la variación a la cual la pieza fundida solidificará. Mientras mayor es el factor de enfriamiento, mayor es el tiempo para que la pieza fundida solidifique.

El factor de enfriamiento puede ser simplemente definido como:

$$F.E = \frac{\text{AREA DE LA SECCION DE LA PIEZA FUNDIDA}[\text{mm}^2]}{\text{PERIMETRO DE LA SECCION DE LA PIEZA FUNDIDA}[\text{mm}]}$$

De la definición de factor de enfriamiento (y por experiencia), la sección geométrica que enfriará de manera más lenta es la de sección circular, sin embargo esta geometría no es siempre práctica, luego la entrada más usada es generalmente la de sección

cuadrada o rectangular. Siempre que sea posible, es preferible redondear las esquinas de las entradas para mejorar el ingreso del material fundido a las cavidades internas del molde, facilitando el flujo de metal, esto resultará en un favorable patrón de enfriamiento para la entrada.

El factor de enfriamiento también se lo puede definir como:

$$F.E = \frac{A}{4}$$

Donde A es denominada la longitud del lado del cuadrado. Esta ecuación será usada para calcular la sección de los canales que sirven como alimentadores de la pieza en el molde, permitiendo controlar el tiempo de solidificación del metal.

### **Número de entradas**

Aún no ha sido posible encontrar un método exacto para calcular el número de entradas requeridas para una pieza fundida dada, pero una serie de datos experimentales se han utilizado satisfactoriamente. Ver tabla 2.

**TABLA 2**  
**NÚMERO DE ENTRADA SEGÚN EL DIÁMETRO DE LA PIEZA**

Diámetros de la pieza	Número de entradas requeridas
hasta 12 in (305 mm)	2
12 a 18 in (305 a 457 mm)	3
18 a 24 in (457 a 610 mm)	4
24 a 30 in (610 a 762 mm)	5
30 a 40 in (762 a 1016 mm)	6

El número real de entradas requeridas usualmente será algo menor que el mostrado en la tabla 2. Esto debido a que cada entrada alimenta una extensión de aproximadamente 9 in (229 mm).

#### **Parámetros a ser ajustados en el proceso de centrifugación**

Para encontrar los parámetros de la máquina a variar para hacer posible la presente investigación se deben tomar en cuenta los parámetros antes mencionados además de la parte económica la cual tiene una gran importancia.

Uno de los parámetros a ser ajustados es la velocidad de rotación ya que se presentan ciertas restricciones originadas por el molde y por ende estas impiden alcanzar las velocidades requeridas. La velocidad vincula los Gs a los que será sometido el molde que contendrá el metal centrifugado.

Por motivos económicos e investigativos el molde que en este proceso de centrifugación usualmente es metálico o también llamado permanente será hecho en arena de sílice con silicato. La unión del silicato con la sílice el silicato y el CO<sub>2</sub>, provoca que el molde tome una consistencia rocosa la que es utilizada en los procesos típicos de fundición de piezas y en adición cumple también para ser usado en el método de centrifugación. Este tipo de molde en arena de sílice por ser de una densidad y resistencia menor que el metálico ocasiona que los parámetros regulares en la centrifugación sean cambiados para adaptarse de la mejor forma a este.

### **Consideraciones del moldeo en arena para la centrifugación**

Los requerimientos para un molde de arena para fundición centrífuga o caja de moldeo son más exigentes que los requerimientos usados para los moldes en la fundición estática porque la concentricidad con el eje de rotación debe ser más exacto para prevenir la vibración. Sin embargo la mayoría de velocidades requieren que el moldeo en arena para la centrifugación sean relativamente bajos comparados con la centrifugación verdadera en moldes permanentes. de secciones usando arena seca Los moldes se fabrican de machos de arena seca que son usados para la centrifugación. La arena usada puede ser silicato de sodio, arena seca o cualquier material de



moldeo con suficiente esfuerzo que soporte las fuerzas impuestas por la velocidad de rotación.

Es conveniente usar una pintura refractaria apropiada con los moldes de arena para reducir o minimizar la penetración de metal en el molde o la erosión del mismo.

# CAPITULO 2

## 2. TRABAJO EXPERIMENTAL

### 2.1 Determinación del parámetro G con simulación por medio de ensayos de compresión durante la solidificación.

El parámetro G o fuerza centrífuga generada por la rotación es de mucha importancia en lo que a centrifugación se refiere, a ésta fuerza se le asocia con la medida del tamaño de grano del metal fundido, ya que como se sabe la centrifugación permite obtener un tamaños de grano más fino que los obtenidos mediante los métodos convencionales de colado por gravedad.

Aunque la centrifugación no es un método moderno sino de casi más de 100 años de aplicación industrial no intensivamente, los parámetros aún son estudiados, y no se cuenta con el conocimiento total y cabal sobre los parámetros de la centrifugación, y como ejercen acción sobre la pieza fundida centrifugada, por esta razón en

este trabajo experimental se ha realizado un estudio minucioso sobre la presión, que es un parámetro considerado de gran relevancia en este método.

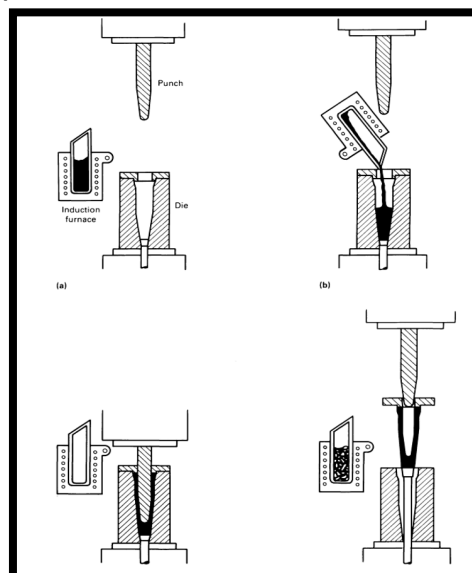
La velocidad de rotación juega un papel muy importante en la centrifugación, gracias a esta se pueden obtener fuerzas centrífugas elevadas del orden de 80 – 200 G las que a su vez permiten obtener piezas de gran resistencia y calidad.

Antes de desarrollar la parte experimental de centrifugación se ha tomado en cuenta solo la fuerza ejercida durante la solidificación durante las etapas de nucleación y crecimiento de grano como parámetro de estudio ya que se quiere llegar a tener un conocimiento más amplio del aporte que brinda en el proceso de centrifugación en general, sea este vertical u horizontal.

El método de fabricación de piezas denominado “squeeze casting”, o también conocido como “forja líquida” que es un método por el cual el metal fundido solidifica bajo presiones dentro de una matriz cerrada posicionada entre una especie de punzón sujeto a una prensa hidráulica, la aplicación de presión y el instante de contacto con la superficie produce una rápida transferencia de calor, lo que contribuye a obtener una pieza fundida de grano fino y libre de poros y por ende con altas propiedades mecánicas. Este proceso se ve

claramente ilustrado en la figura 2.1. A diferencia del “squeeze casting”, en la fundición centrífugada las presiones son significativamente más bajas, por cuestiones de erosión de molde, seguridad por las altas velocidades y fuerzas que se requerirían, lo que haría a este proceso peligroso para trabajar.

Por lo mencionado anteriormente, el estudio de la aplicación de presión sobre una matriz que contiene metal fundido es de gran importancia ya que gracias a los resultados obtenidos se podrá divisar un panorama más claro en el proceso de centrifugación, ya que conociendo la presión a la cual la pieza fundida obtiene altas propiedades, se podrán calibrar parámetros tales como la velocidad de rotación la cual se relaciona estrechamente con el valor de G y esta última con la presión.

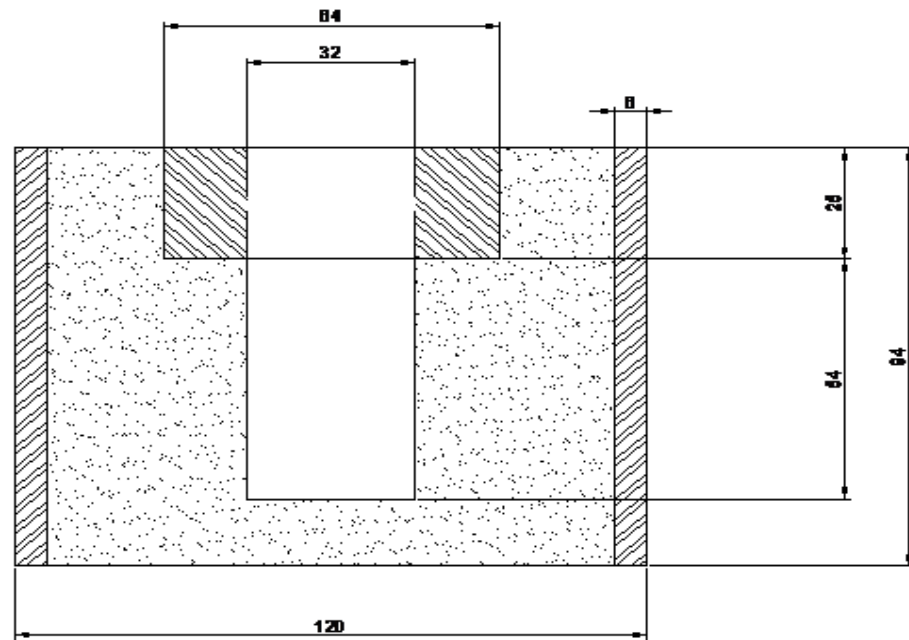


**FIGURA 2.1 ILUSTRACIÓN DEL PROCESO LLAMADO “SQUEEZE CASTING”.**

Como se mencionó, en el método de “squeeze casting” las presiones son del orden de 20 a 30 veces las obtenidas por centrifugación, lo que hace innecesario además de poco práctico seguir este proceso para despejar la incógnita mencionada, por esto en el actual experimento se efectúa una variación, tal que satisfaga los requerimientos de centrifugación, tal como son las presiones acordes a este método, además de una matriz más sencilla pero que cumpla con los propósitos requeridos para la obtención de datos. La matriz consta de un recipiente metálico en el cual se coloca interiormente arena de sílice con silicato de sodio endurecida con CO<sub>2</sub>, en la cual se hará un orificio a manera de cilindro en el cual será vertido metal fundido, para luego ser comprimido a fuerzas preestablecidas que permitan luego ser tomadas como punto de partida para la centrifugación; en referencia al tamaño ideal de grano obtenido con este procedimiento se establecerán los parámetros en la centrifugación que permitan obtener resultados similares. (Ver figura 2.2)

Para esto se aplicará presión con un pequeño pistón fabricado de acero común y que será acoplado a la máquina de ensayos de tracción que se encuentra en la empresa INTRAMET, la que brindara la fuerza requerida. La máquina de ensayos de tracción

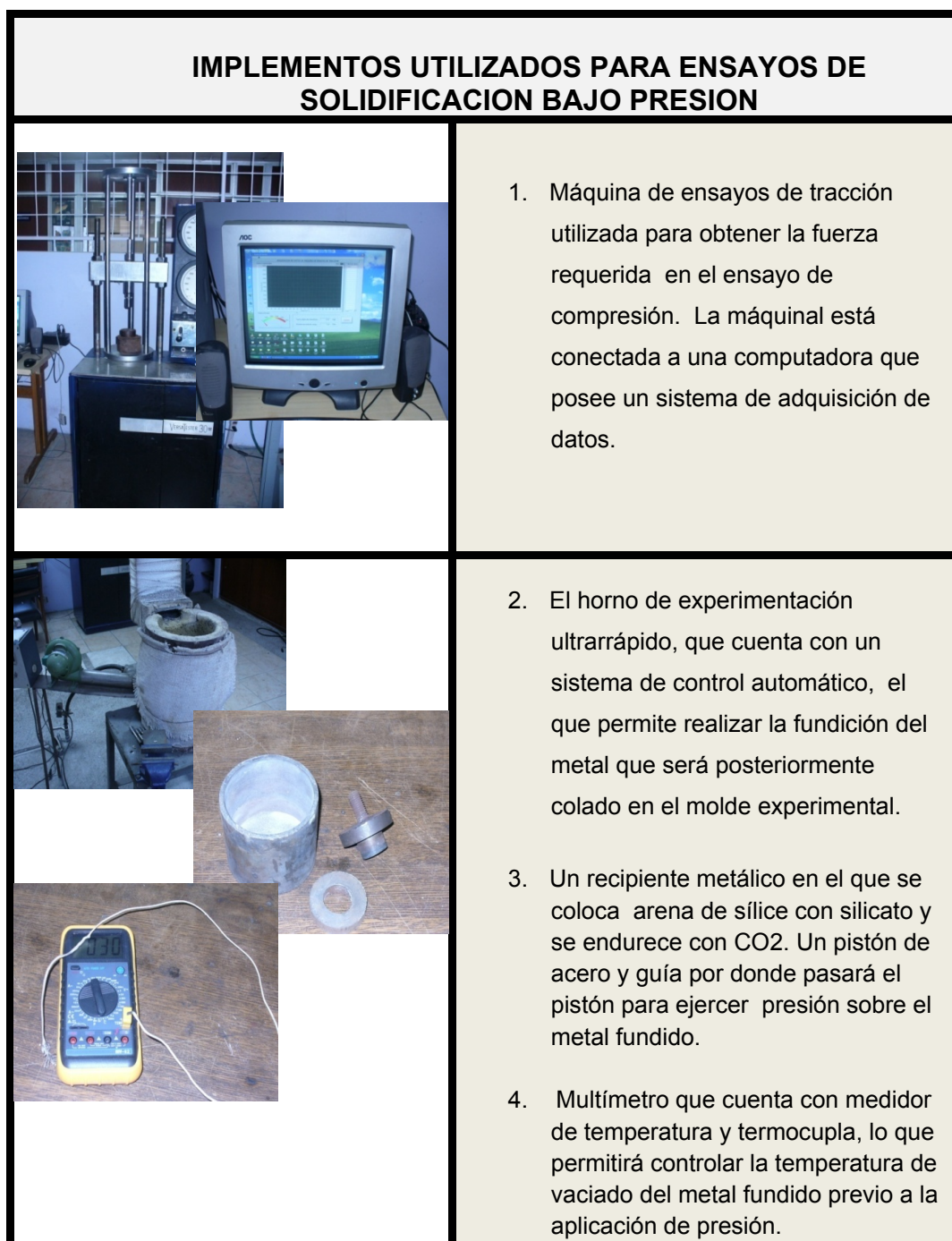
cuenta con un sistema de adquisición de datos el que está adaptado a una computadora con el programa LAB – VIEW, que muestra la variación de la fuerza aplicada con respecto al tiempo.



**FIGURA 2.2 ESQUEMA DEL MOLDE Y MEDIDAS EN MILÍMETROS PARA COLADO DE METAL Y SOLIDIFICACION BAJO PRESION.**

Todo lo mencionado permitirá tener un proceso experimental bien controlado, lo que en este caso es de suma importancia, ya que como se mencionó, este es el punto de partida para los ensayos de centrifugación.

A continuación se muestran los implementos utilizados para la experimentación:



**FIGURA 2.3 EQUIPO EXPERIMENTAL PARA LA SIMULACIÓN DE FUERZA G DURANTE LA SOLIDIFICACIÓN.**

Los estudios realizados sugieren que para molde metálico el factor G se encuentre dentro del rango de 50 – 100, por seguridad se probará también la centrifugación tomando como base 80 G en casos generales. En el caso particular en el que se utilizará un molde de arena, se debe mantener un rango de entre 25 – 50 G. Por lo establecido anteriormente se trabajará con un factor G de 45 lo que equivale a una fuerza de aproximadamente 392 Kgf, que se aplicará y deberá ser controlada en la máquina de ensayos de tracción.

Para la prueba de presión se trabajó con aluminio UNS A713.0, que fue fundido en el horno del laboratorio de experimentación de INTRAMET, que cuenta con un sistema de control automático, el cual permite controlar la temperatura con que se está trabajando, además de brindarle seguridad al proceso ya que cuenta con una electroválvula que se cierra al llegar a un tope de temperatura preestablecido dependiendo del metal a ser fundido.

Cuando el metal está fundido, se lo retira del horno a una temperatura cercana a los 800°C, la cual es una medida precautelada que evitará que la temperatura decaiga a menos de 750°C, que es la temperatura óptima de vaciado, para evitar una rápida solidificación y alcanzar el tiempo para someter el metal fundido a la presión requerida en condición líquida. Con el uso de un multímetro que cuenta con una termocupla se lee la temperatura de vaciado del metal fundido. Al instante de aplicar presión al metal fundido se corre el programa que permite llevar un control de la fuerza que está siendo aplicada, mediante una curva en tiempo real, esto ayudará a establecer la presión óptima que será utilizada en el proceso de centrifugación. A continuación se muestra el procedimiento:











**FIGURA 2.4 OPERACIONES DE LAS PRUEBAS DE SOLIDIFICACION BAJO PRESION.**

### **Macrografía e inspección visual de probetas obtenidas mediante ensayos de compresión.**

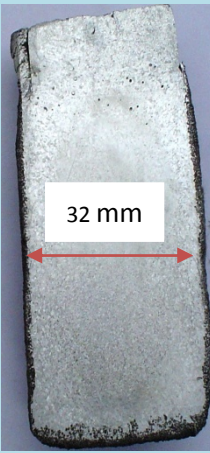
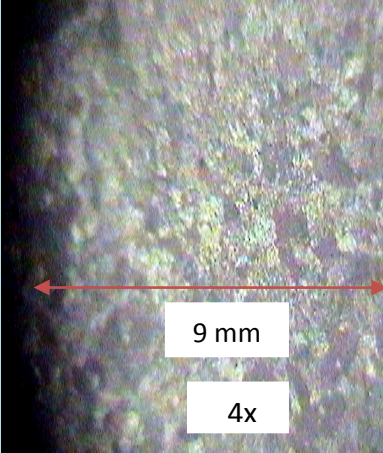
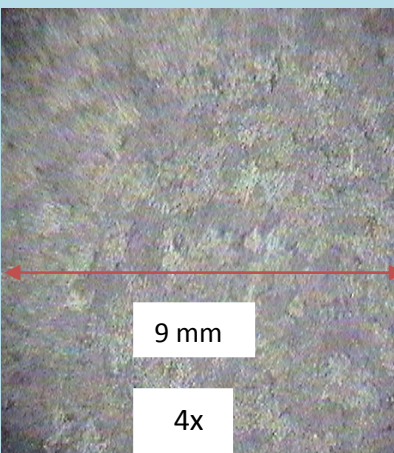
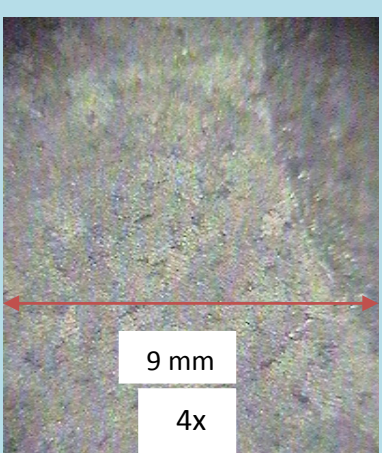
Luego de realizar el procedimiento experimental, se efectúa el respectivo análisis de laboratorio, en este caso una macrografía a cada probeta obtenida mediante el procedimiento anteriormente descrito. La macrografía se la hizo siguiendo la norma ASM volumen 9 de metalografías y microestructuras que proporciona procedimiento a seguir además de los químicos a utilizar para atacar la probeta de estudio. El material usado para la experimentación bajo presión fue un aluminio puro o aluminio ASM 6063 ya que tiene un amplio rango de solidificación lo que permite tener un amplio rango de tiempo para realizar la experimentación, evitando así una solidificación prematura del metal.

La norma recomienda usar un reactivo constituido por una concentración de 10 gramos de hidróxido de sodio por cada 90 mililitros de agua. El procedimiento consiste en sumergir la superficie del metal en esta solución de 5 a 15 minutos, luego se limpia la superficie con abundante agua para entonces sumergir por intervalos de tiempo cortos a la superficie en ácido clorhídrico al 50%, para luego lavar con abundante agua por segunda vez y obtener una superficie con granos visibles con facilidad, previo al ataque químico la superficie del metal fue pulida con distinta clase de lijas y con alúmina. A continuación se muestra la secuencia de pasos del procedimiento mencionado para realizar el macroataque.

	<p>Se realizaron cortes longitudinales de las probetas, dejando una cara con superficie casi plana para ser pulida</p>
	<p>Se pule la superficie plana de la probeta con lijas de agua de diferente tipo de tamaño de grano y hasta dejar una superficie plana tipo espejo</p>
	<p>Luego se lava bien la probeta para que después sea pulida con alúmina.</p>
	<p>Se coloca la probeta en un recipiente que contenga la concentración de hidróxido de sodio y agua y se deja la superficie pulida dentro de esta entre 5 a 15 minutos.</p>
	<p>Se espera un intervalo de tiempo adecuado se retira la probeta y se la lava con agua para proceder a darle pequeñas sumergidas en una concentración de ácido sulfúrico al 50 %</p>
	<p>Después de sumergir varias veces la probeta en el ácido, se la limpia con abundante agua, para obtener una superficie con evidentes bordes de grano.</p>

**FIGURA 2.5 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PREPARACION SUPERFICIAL Y REALIZAR LAS MACROGRAFIAS.**

Este procedimiento ayuda a valorar de manera visual y sin el uso de microscopia el tamaño de grano que se obtiene de la probeta estudiada, y así juzgar de manera más sencilla el mejoramiento de las propiedades según se varíen los parámetros, con solo observar el tamaño de grano que ya es visible fácilmente. Después de haber efectuado el procedimiento descrito en la figura 2.5 obtienen los siguientes datos:

<b>PROBETAS</b>		<b>INSPECCION VISUAL DE TAMAÑO DE GRANO POR MEDIO DE MACROGRAFIAS EN DIFERENTES PUNTOS DE LA PROBETA</b>		
		<b>Parte superior</b>	<b>Mitad</b>	<b>Parte inferior</b>
<b>87 Kgf</b>				

**FIGURA 2.6 MACROGRAFIAS DE PROBETA SOMETIDA A 87 Kgf**

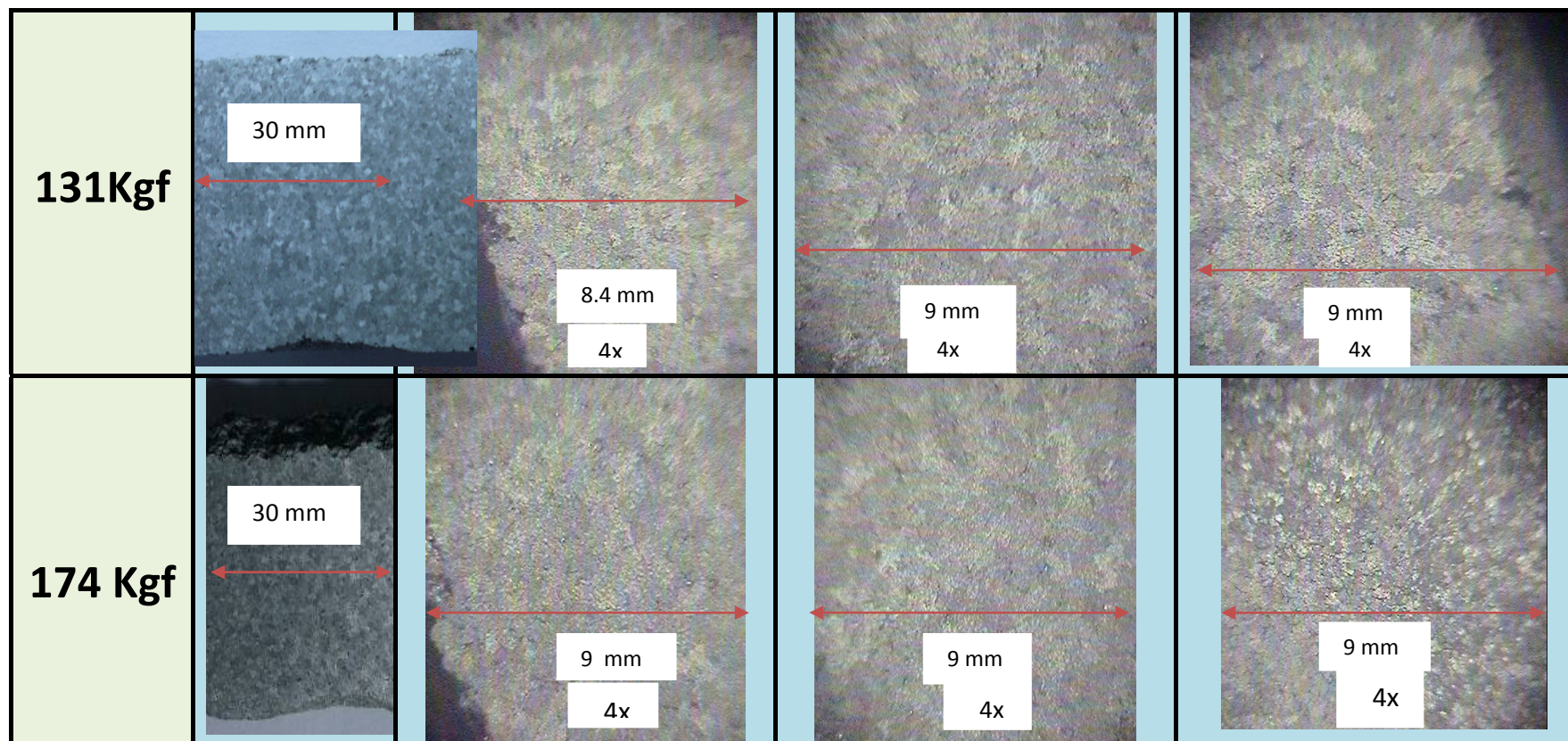


FIGURA 2.7 MACROGRAFÍAS DE PROBETAS SOMETIDAS A 131 Y 174 Kgf

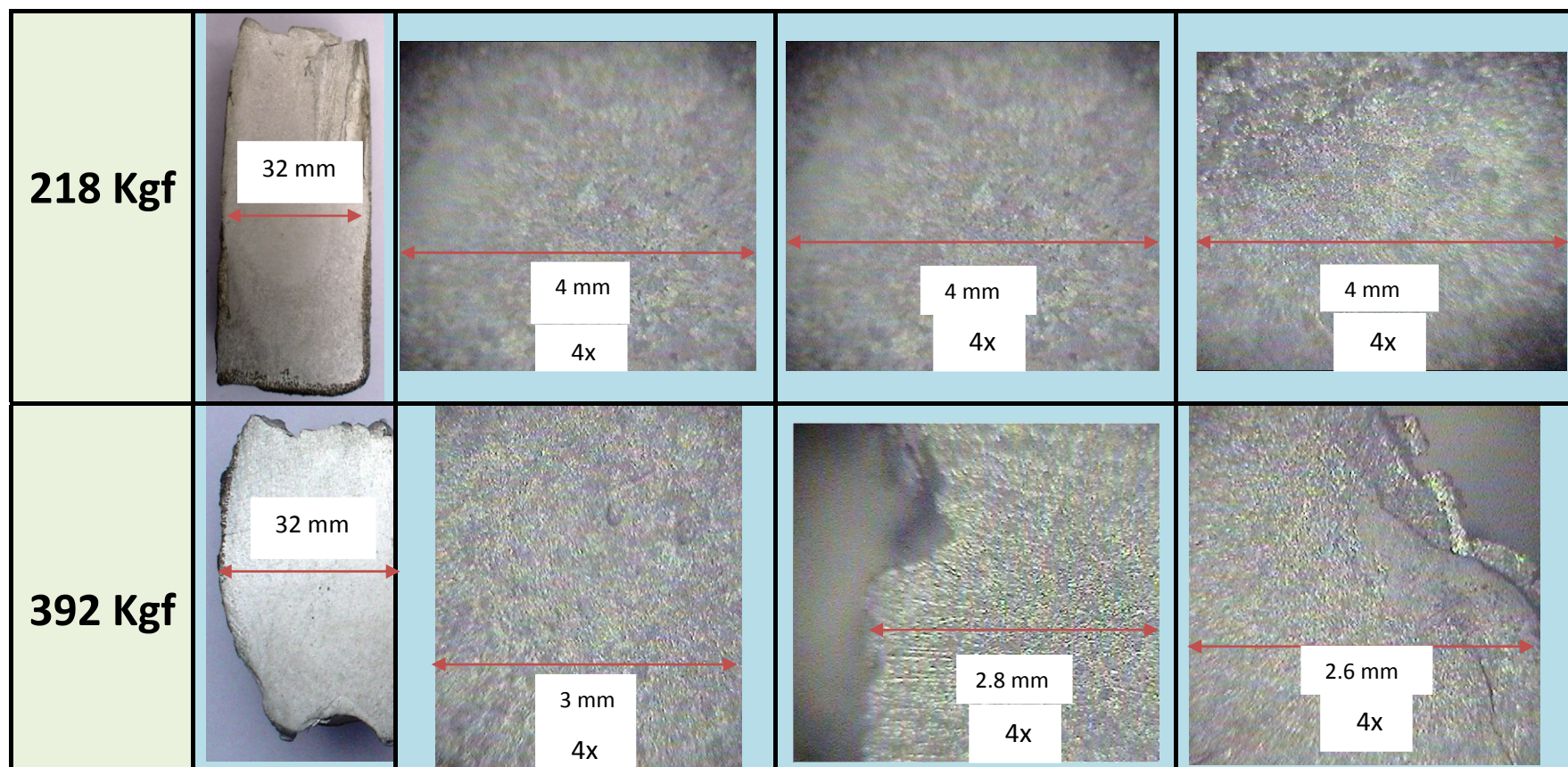


FIGURA 2.8 MACROGRAFÍAS DE PROBETAS SOMETIDAS A 218 Y 392 Kgf

Las figuras 2.6, 2.7 y 2.8 muestran las macrográficas de las probetas obtenidas mediante ensayos de compresión a diferentes presiones y en diferentes puntos de las mismas.

Este proceso experimental permite relacionar el tamaño de grano con la presión aplicada, adicionalmente es el punto de partida para la homologación con los ensayos de centrifugación posteriores.

Se efectuaron pruebas a 87, 131, 174, 218 y 392 Kgf. Como se puede observar en las figuras 2.6, 2.7 y 2.8 el tamaño de grano se relaciona directamente con la presión aplicada, de la misma manera la resistencia mecánica está relacionada directamente con el tamaño de grano.

El resultado obtenido mediante el ensayo de compresión aplicando 392 kgf (45 G) muestra una significativa mejoría del tamaño de grano y por ende de la resistencia mecánica en comparación con las demás pruebas efectuadas, esto sirve como punto de partida para efectuar los ensayos de centrifugación, en los que se variarán los parámetros de forma, peso, vaciado y velocidad para obtener resultados similares.

## **2.2 Elaboración de moldes para experimentación en la centrifugación.**

Como se vio anteriormente existen diferentes tipos de moldes utilizados en la fundición centrífuga. Del tipo de molde descrito en el capítulo 1, el utilizado para la fabricación de barras macizas será el elaborado en arena de sílice con silicato de sodio, esto debido a su bajo costo inicial, además de no requerir mantenimiento ni cuidados especiales a más de las restricciones de resistencia que presentan con respecto a las fuerzas  $G$  aplicadas y tal como se encontró anteriormente están en el rango de 25 y 50.

El molde de arena para centrifugación es básicamente el mismo que se utiliza en los métodos convencionales como el de gravedad, el cual consiste en una caja de moldeo de forma redonda en la que se coloca la arena para darle la geometría que requiere la pieza fundida final.

La única diferencia a tomar en cuenta como precaución, es que, debido a que el molde está sometido a fuerzas centrífugas intrínsecas al proceso, el centro del molde debe ser fabricado lo más concéntrico posible para evitar alguna desproporción que conlleve a excesivas vibración.



Para poder realizar los experimentos de centrifugación vertical se fabricaron dos clases de molde, uno con arena en verde y otro con arena silicato de sodio o lo que es lo mismo un molde de baja y otro de alta resistencia a la compresión.

Estas cajas fueron elaboradas con flejes redondos y se les soldó ángulos rolados, los que se utilizan como rigidizadores de las cajas de moldeo. Adicionalmente los ángulos poseen orificios guías que sirven para sujetar el molde a la mesa rotatoria de la máquina centrifugadora.

Luego de fabricar la caja de moldeo se procede a preparar la arena de sílice con silicato de sodio. Se coloca la caja de moldeo en una tabla donde se echará la arena mezclada para pisonear y luego gasear con CO<sub>2</sub>, lo que la endurecerá.

Se hizo mención en el capítulo 1 que el factor de enfriamiento viene dado por la relación entre área de la sección de la pieza dividida para el perímetro de la pieza fundida. Por lo cual para este caso, sabiendo que la sección de la pieza fundida es de 38 mm de diámetro, se puede calcular el factor de enfriamiento C.F como sigue:

$$C.F = \frac{\frac{\pi \varphi^2}{4}}{\pi \varphi} = \frac{\varphi}{4}$$

$$C.F = 9.5$$

Para calcular la dimensión del canal de debe calcular la longitud del lado de cuadrado:

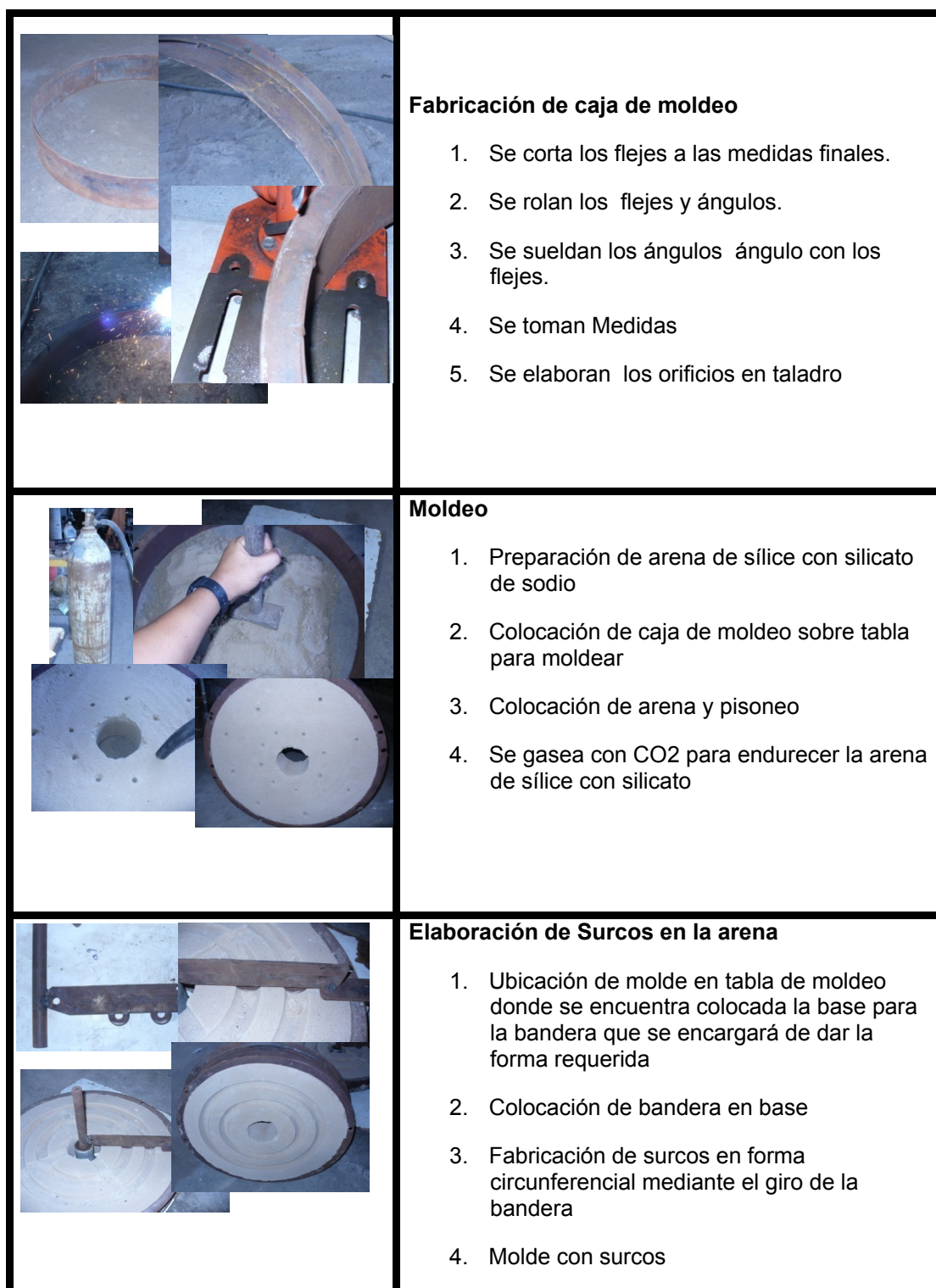
$$A = C.F \times 4 = 38 \text{ mm}$$

Para el diámetro del bebedero o alimentador se debe tomar en cuenta que el factor de enfriamiento del bebedero es ligeramente mayor a 9.5 ya que este debe enfriar mucho después que la pieza fundida.

$$\varphi = C.F \times 4 = 11 \times 4 = 44 \text{ mm}$$

La tabla 2 proporciona el número de canales requeridos en función del diámetro de la pieza fundida. Acorde al diámetro del molde, 4 serán los canales.

A continuación se presenta la secuencia de fabricación del primer molde utilizado en el proceso experimental de la centrifugación con las medidas obtenidas del cálculo anterior:



**FIGURA 2.9 FABRICACIÓN DE MOLDE Y MOLDEO CON FORMAS DE BARRAS DE SECCION CIRCULAR.**

Luego de hacer los surcos que corresponden a las barras redondas, se hacen los canales que sirven para transportar el metal fundido y así formar las barras.

Debido al gran peso del molde, la máquina centrifugadora no logró alcanzar la velocidad deseada en el tiempo requerido, además se obtuvo una baja calidad en las barras, debido a que en éste proceso se cuenta con un período de solidificación de barras relativamente corto.

Como ya se había mencionado, el tiempo entre verter y aumentar la velocidad de rotación es crucial en la centrifugación, ya que ciertos metales tienen un rango de solidificación corto, lo que convierte a este proceso en uno donde el tiempo para colar y el de aumentar la velocidad de rotación deben ser controlados, en caso contrario el metal no adquirirá las altas propiedades que caracterizan a la centrifugación; por esto se procedió a cambiar el molde a uno más liviano y de menores dimensiones que el hecho en primera instancia. Este nuevo molde tiene un espesor de 6 mm por lo que no es necesario ningún otro elemento rigidizador, el diámetro interior es de 450 mm, la altura de la tapa superior es de 70 mm y la inferior es de 60 mm.

Ahora se procede a calcular el factor de enfriamiento para este nuevo molde:

$$C.F = \frac{\frac{\pi \varphi^2}{4}}{\pi \varphi} = \frac{\varphi}{4} = \frac{35}{4} = 8.75$$

$$A = C.F \times 4 = 35 \text{ mm}$$

Para calcular el diámetro de la mazarota se selecciona un valor referencial más alto que el factor de enfriamiento de la pieza a fundir, ya que la mazarota debe ser la última en alcanzar la solidificación, por esto se tomo un C.F. de 16

$$\varphi = 16 \times 4 = 64 \text{ mm}$$

Los valores obtenidos brindan la configuración geométrica de las cavidades internas del molde así como de la mazarota. Para fines prácticos el diámetro de la mazarota será incrementado a un valor de 80 mm para lograr así un mejor tiempo de colado, el cual es otro de los parámetros de gran importancia en lo que a centrifugación se refiere; el largo apropiado para la mazarota debe ser de más de dos pulgadas.

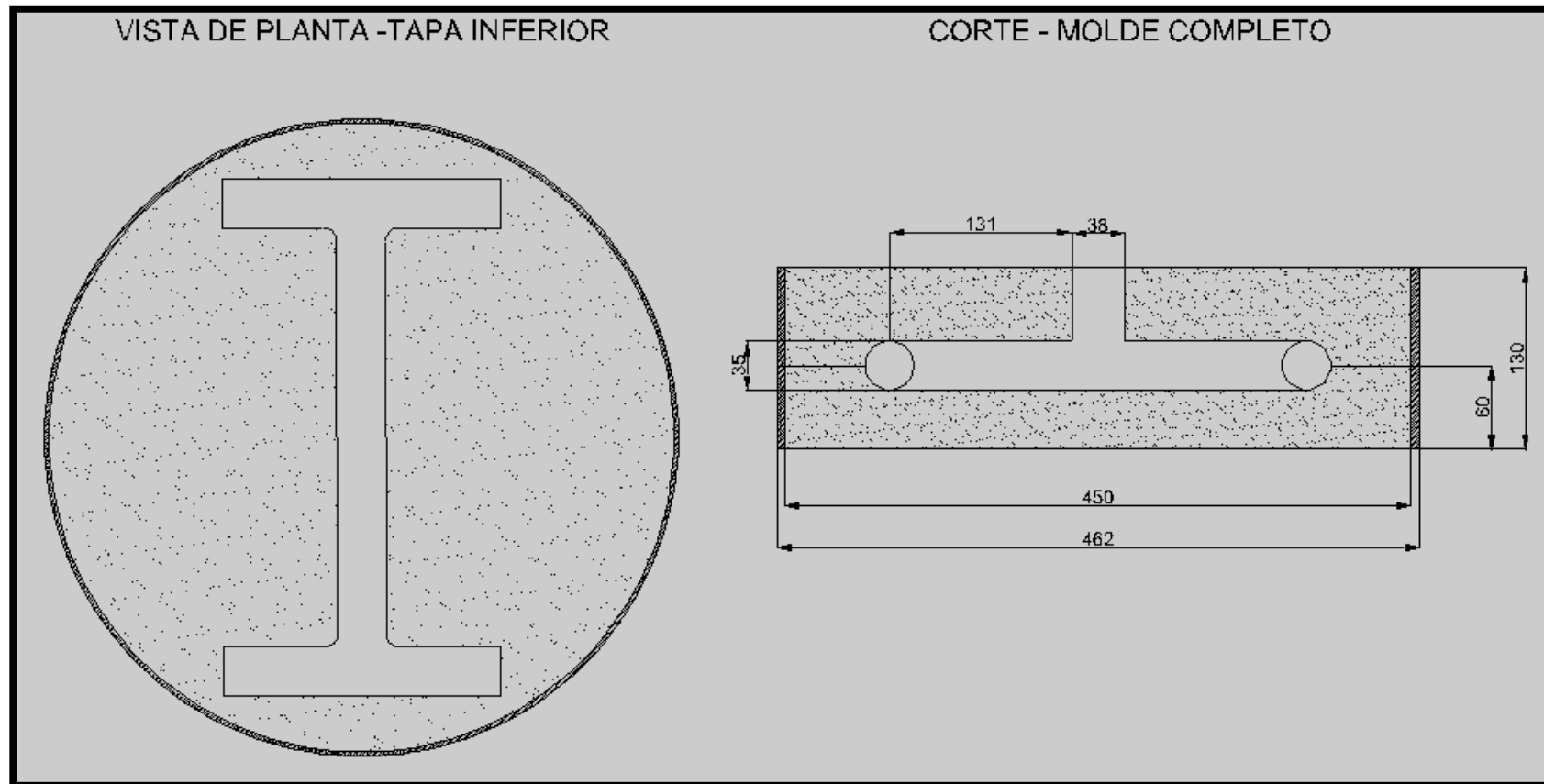


FIGURA 2.10 ESQUEMA DE MOLDE PARA LA CENTRIFUGACIÓN DE BARRAS DE ALEACIONES ESPECIALES.

A continuación se presenta el procedimiento para la elaboración del molde:



**FIGURA 2.11 ELABORACIÓN DEL NUEVO MOLDE PARA ENSAYOS DE CENTRIFUGACIÓN.**

### **2.3 Efecto de la velocidad lineal sobre el tamaño de grano de solidificación.**

Como se dijo anteriormente la velocidad de rotación es un parámetro de gran importancia en la fundición centrífuga ya que gracias a la aplicación y variación de esta se pueden obtener las presiones requeridas. Estas presiones aplicadas permiten obtener un tamaño de grano acorde a lo que la teoría menciona sobre este proceso de fundición de piezas, y con la resistencia mecánica y calidad que caracterizan a este proceso. Por ello el total dominio sobre conocimiento de los parámetros y su cálculo es de imperioso para establecer la relación que existe entre las fuerzas  $G$  y la velocidad de rotación.

La velocidad de rotación es la misma en todos los puntos de una masa que gira alrededor de un eje. Pero la velocidad lineal o tangencial, será diferente para cada punto con radios diferentes uno del otro, lo cual es de tomar en consideración cuando se elaboran moldes de formas complicadas o que se caractericen por estar alejados de manera diferente al eje de rotación. Esta permitirá establecer un trato e interpretación diferente al realizar el proceso de centrifugación centrífuga, ya que las propiedades varían de acuerdo a cuan alejadas se encuentran del centro de rotación; mientras más



alejada se encuentre una partícula del eje de rotación, esta adquiere mayores características, puesto que las fuerzas G son más altas para estas.

La fuerza centrífuga se relaciona estrechamente a la velocidad lineal mediante la ecuación:

$$CF = \frac{mV^2}{r}$$

Donde m es la masa, r es el radio, y V es la velocidad tangencial.

A su vez la fuerza de gravedad está dada por:

$$GF = mg$$

Donde el Factor G es igual a:

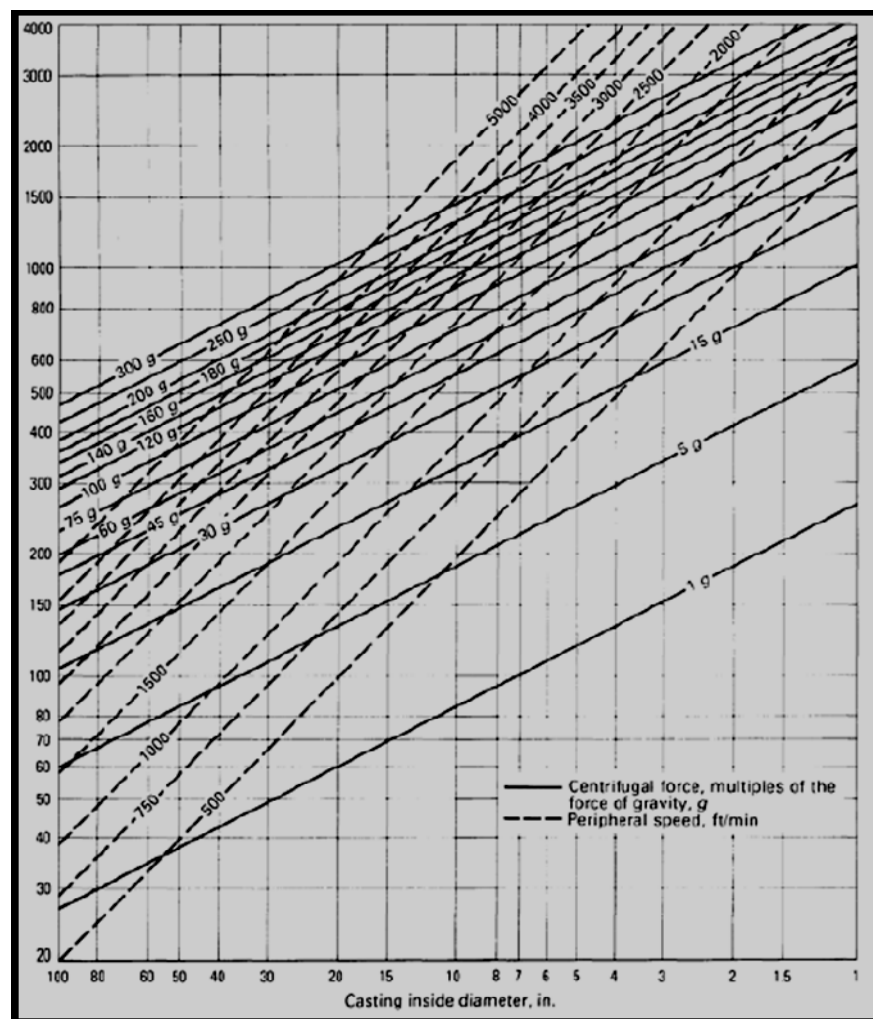
$$G \text{ factor} = \frac{CF}{GF} = \frac{mV^2}{rmg} = \frac{V^2}{rg}$$

Esta ecuación sugiere que para llegar al parámetro G establecido, se puede variar tanto la velocidad como la distancia al eje de rotación. La ecuación anterior permite despejar la velocidad lineal en función del factor G el cual ya es conocido con antelación.

$$V = \sqrt{G \text{ factor}(rg)}$$

Como se aprecia en esta ecuación, la velocidad lineal como ya se dijo, es proporcional a la distancia al eje de rotación. Ya que la máquina de centrifugación vertical es del tipo rotatoria es más conveniente trabajar con velocidades de rotación en R.P.M. por esto

existen tablas que establecen una relación entre los parámetros mostrados en las formulas anteriores, que facilitan el cálculo, además de hacerlo mucho más práctico. El nomograma muestra cómo obtener la velocidad de rotación de trabajo, con parámetros conocidos, tales como el diámetro interior de la pieza a centrifugar y el factor G.



**FIGURA 2.12 NOMOGRAMA PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DEL MOLDE BASADO EN EL DIÁMETRO INTERIOR DE LA PIEZA FUNDIDA Y LA REQUERIDA FUERZA CENTRIFUGA**

Con el resultado obtenido en el ensayo de compresión realizado y el diámetro del molde se hace uso de la gráfica y se obtiene una velocidad de 600 R.P.M aproximadamente, que es la velocidad a la cual se trabajará en la experimentación. Esta velocidad obtenida es la velocidad de centrifugación la cual permite a la pieza fundida adquirir propiedades de alta calidad y resistencia mecánica, lo que será comparado con lo obtenido mediante las pruebas experimentales de presión vistas en la primera parte de este capítulo. Como ya se menciona existen otros parámetros además de la velocidad de rotación que cumplen un papel tan importante como esta, tales como la velocidad de llenado y la geometría de la mazarota y canales interiores del molde.

#### **2.4 Control de calidad metalúrgica para centrifugación del material.**

Para realizar los experimentos de centrifugación de barras se selecciono la aleación de aluminio UNS A713.0 la cual es ampliamente usada en matricería , elaboración de ciertos implementos y partes con alta resistencia mecánica, por todo esto se necesita un material de alta calidad el cual esté libre de cualquier porosidad intrínseca del método convencional de colada por gravedad, por esto la centrifugación es el camino adecuado para obtener un resultado favorable a lo que corresponde a estos campos

antes mencionados. A continuación se muestra la composición química de la aleación UNS A713.0 según el Volumen 2 de la norma ASM:

**TABLA 3**  
**PORCENTAJES PERMITIDOS DE LOS ELEMENTOS QUE**  
**CONFORMAN LA ALEACIÓN UNS A713.0 NORMA ASM**

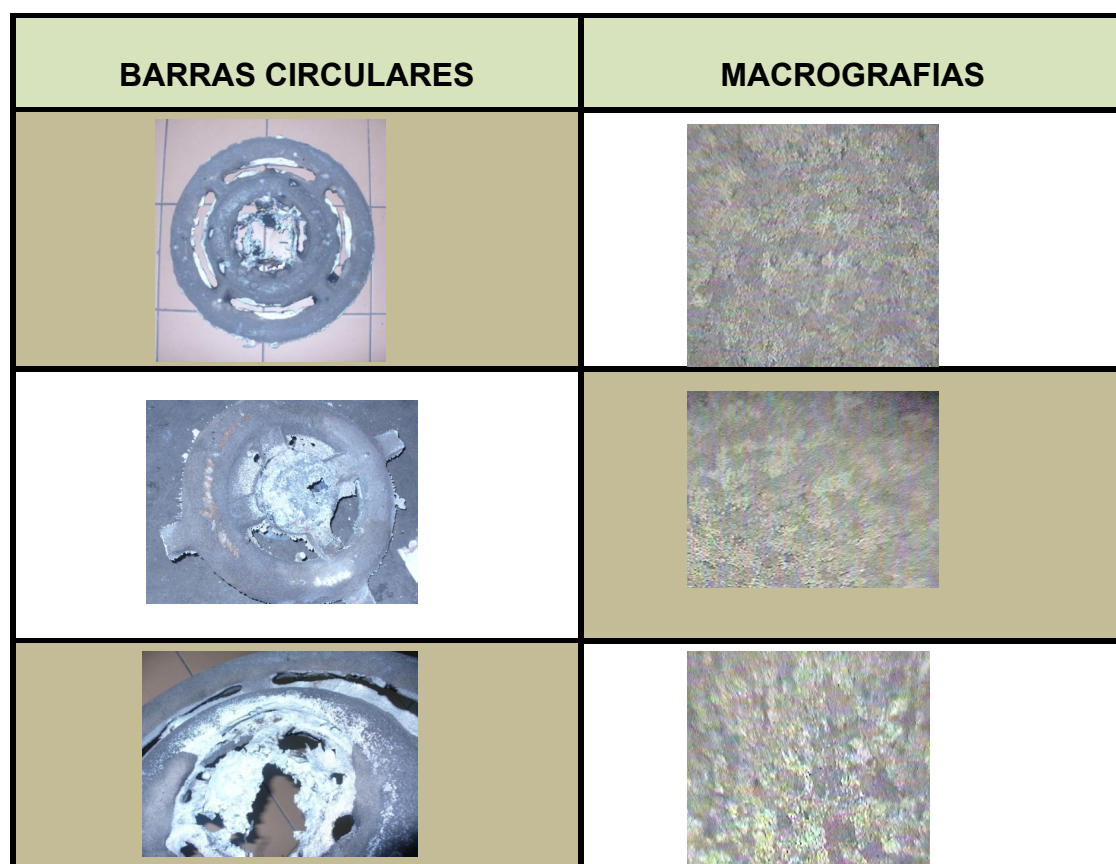
ELEMENTOS	PORCENTAJES PERMITIDOS SEGÚN NORMA ASM
Cu	0.4 - 1
Mg	0.2 - 0.5
Mn	0.6 Max
Si	0.25 Max
Fe	1.1 Max
Cr	0.35 Max
Ni	0.15 Max
Zn	7 - 8
Ti	0.25 Max
Al	El resto

Los porcentajes utilizados por INTRAMET en la fabricación de la aleación UNS A713.0 es la presentada a continuación:

**TABLA 4**  
**PORCENTAJES UTILIZADOS POR INTRAMET PARA LA**  
**ELABORACIÓN DE LA ALEACIÓN UNS A713.0**

ELEMENTOS	PORCENTAJES UTILIZADOS POR INTRAMET
Cu	0.7
Mg	0.5
Mn	0.1
Si	0.25
Fe	1
Cr	0.25
Ni	0.1
Zn	7.5
Ti	0.1
Al	El resto

Como se había mencionado anteriormente, para esta experimentación se procedieron a fabricar dos clases de moldes, el primero era muy pesado y no permitía el incremento de velocidad de manera instantánea. A continuación se muestran las pruebas realizadas en este molde y las macrografías obtenidas.



**FIGURA 2.13 RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL USO DEL PRIMER MOLDE.**

Como se puede observar en la figura 2.11, el tamaño de grano de las pruebas realizadas no es homólogo al obtenido en las pruebas de presión, ya que este tamaño de grano muestra ser más grueso, lo

que conduce a fabricar otro tipo de molde, el cual permita obtener un tamaño de grano cercano al obtenido en el laboratorio.

Con el cambio de dimensiones y peso del molde se lograron superar los inconvenientes del anterior, ya que en este se puede conseguir cambios de velocidad en intervalos más cortos, además de que su ligereza permite que el motor deje de trabajar sobrecargado alargando su vida útil. A continuación se esquematiza los procedimientos de control visual y de calidad de las barras centrifugadas.

	<p>Se parte una muestra mediante la aplicación de golpes que la fracturen y mediante el examen visual analizar el borde de grano.</p>
	<p>Luego de haber centrifugado se lleva la pieza fundida al torno para realizarle un ligero cilindrado y mediante la inspección visual ver la calidad del producto terminado.</p>
	<p>Luego de verificar visualmente la calidad de la barra se procede a corroborar mediante macro y micrografías, para comprobar que el tamaño de grano está relacionado con la calidad visual que se observo.</p>

**FIGURA 2.14 EXÁMENES VISUALES Y METALOGRAFÍAS DE LA CALIDAD DE LAS BARRAS CENTRIFUGADAS**

## CAPÍTULO 3

### 3.EVALUACION TECNICO - ECONOMICA

#### 3.1 Evaluación técnica con relación a la calidad normalizada.

A fin de certificar el material obtenido por medio del método de centrifugación vertical, se realizaron los respectivos ensayos de tracción basados en el Volumen No.2 de la norma ASM para el aluminio UNS A0713.0:

**TABLA 5**







**ESFUERZOS DE TRACCIÓN SEGÚN NORMA ASM**

<b>Método de colado</b>	<b>Propiedades mecánicas según norma ASM (esfuerzo de tracción)</b>
Molde de arena	205 MPa
Molde permanente (metálico)	220 Mpa

Adicional a los ensayos de centrifugación vertical se realizaron ensayos de colado por gravedad en molde de arena y molde metálico, esto ayudará a obtener datos del aumento de las propiedades que sufren los materiales al ser centrifugados, en comparación con los métodos convencionales aplicados en nuestro medio.

**TABLA 6**

**PROBETAS DE ALUMINIO UNS0713.0 COLADAS EN MOLDE DE ARENA, MOLDE METÁLICO Y CENTRIFUGADOS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN.**

<p><b>ENSAYO 1 (MOLDE DE ARENA)</b></p>	<p>ENSAYO 1</p> 	
<p><b>ENSAYO 2 (MOLDE METÁLICO)</b></p>	<p>ENSAYO 2</p> 	
<p><b>ENSAYO 3 (PIEZA CENTRIFUGADA)</b></p>	<p>ENSAYO 3</p> 	



Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de fundición y tratamientos térmicos de INTRAMET en la máquina de ensayos de tracción VersaTester.



**FIGURA 3.1 MÁQUINA DE ENSAYOS DE TRACCIÓN VERSATESTER**

Los resultados de los ensayos efectuados a los diferentes materiales arrojaron los siguientes valores:

**TABLA 7**

**COMPARACIÓN ENTRE ESFUERZO DE TRACCIÓN REAL Y ESFUERZO DE TRACCIÓN SEGÚN LA NORMA ASM.**

TIPO DE ENSAYO		ESFUERZO DE TRACCIÓN EN MÁQUINA VERSATESTER (MPa)	ESFUERZO DE TRACCIÓN NORMA ASM (MPa)
MOLDE EN ARENA	1.1	201	205
	1.2	197	
	1.3	203	
MOLDE METÁLICO	2.1	221	220
	2.2	117	
	2.3	220	
CENTRIFUGADO	3.1	265	
	3.2	277	
	3.3	260	

Según los resultados obtenidos mediante la tracción de las probetas, el método de centrifugación vertical presenta un considerable aumento en esta propiedad mecánicas en comparación con los otros dos métodos.

### **3.2 Evaluación económica.**

En el presente capítulo se realizó una evaluación económica para la fabricación de barras de aluminio, para ello se requirió una estimación de costos para la fabricación y un flujo de caja para los dos años en los que se planea pagar un préstamo de \$70.000 a la Corporación Financiera Nacional. La evaluación consiste básicamente en una comparación entre la fabricación de barras usando molde de arena o molde metálico, y cuál de estos dos métodos es más conveniente a largo plazo. Como proyecto piloto se producirán 2.000 kg/mes con una producción inicial del 50% y un incremento mensual del 10% mientras el producto se inicia en el mercado, con un 60% de ventas al inicio y un incremento del 5%. El método de elaboración de barras por medio de molde permanente presenta un costo inicial igual al costo del molde metálico de \$ 6,650.00 que serán recuperados en el transcurso de los dos primeros años de producción, esperando tener un incremento significativo en el tercer año de producción.

TABLA 8

## COSTO DE PRODUCCIÓN DEL ALUMINIO 713 CON MOLDE DE ARENA

MATERIA PRIMA Y MATERIALES	Costo unit.	Cantidad	Costo diario	Costo semanal	Costo mensual	
<b>MATERIA PRIMA DIRECTA</b>						
Aluminio perfil (kg.)	\$ 2.20	13.62	\$ 179.78	\$ 1,078.70	\$ 4,314.82	
Ace Inox (kg.)	\$ 2.20	0.15	\$ 1.98	\$ 11.88	\$ 47.52	
Zinc (kg.)	\$ 3.00	0.105	\$ 1.89	\$ 11.34	\$ 45.36	
Cobre (kg.)	\$ 4.40	1.125	\$ 29.70	\$ 178.20	\$ 712.80	
					<b>\$ 5,120.50</b>	
<b>MATERIALES DIRECTOS</b>						
Arena (50 kg/saco)	\$ 8.00	1	\$ 8.00	\$ 48.00	\$ 192.00	
Silicato de sodio (300 kg.)	\$ 168.00				\$ 168.00	
recarga CO2	\$ 17.92				\$ 17.92	
					<b>\$ 377.92</b>	
<b>Costo Total Materia Prima y Mat.</b>					<b>\$ 5,498.42</b>	
<b>Mano de obra directa</b>				<b>Remuneración</b>	<b>Cantidad de personal</b>	<b>Total mensual</b>
Obreros				\$320	3	\$960
<b>Total MOD</b>						\$960
<b>Costos fijos</b>						<b>Total mensual</b>
Laboratorio						\$2.000
Refractario y crisol						\$100
<b>Total costos fijos</b>						\$2.100
<b>Gastos</b>	<b>Valor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total mensual</b>			
Sueños						
Vendedor y suministro	\$320	1	\$320			
Secretaria - contadora	\$320	1	\$320			
Ingeniero	\$600	1	\$600			
Alimentación (6 personas)	\$12	24	\$288			
Arriendo			1.000			
<b>Total gastos</b>						\$2.528
<b>TOTAL DE EGRESOS</b>						\$11.086,42
<b>Costo total de producción</b>			\$11.086			
<b>Producción total en kg.</b>			2000			
<b>Costo de producción por kg.</b>			\$5.54			

TABLA 9

## FLUJO DE CAJA EN EL PRIMER AÑO PARA LA FABRICACION DE BARRAS DE ALUMINIO EN MOLDE DE ARENA

	ene-09	feb-09	mar-09	abr-09	may-09	jun-09	jul-09	ago-09	sep-09	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10
PRODUCCION Kg	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
VENTAS (Kg)	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800
SALDO INICIAL EN CAJA	(Préstamo) 70,000.00	73,416.47	78,783.10	86,099.88	95,366.83	106,583.93	119,751.19	135,418.45	153,585.71	174,252.97	197,420.23	223,087.50	251,254.76
INGRESOS POR VENTAS	15,000.00	17,500.00	20,000.00	22,500.00	25,000.00	27,500.00	30,000.00	32,500.00	35,000.00	37,500.00	40,000.00	42,500.00	45,000.00
COSTOS VARIABLES Y FIJOS	5,809.21	6,359.05	6,908.89	7,458.73	8,008.57	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42
Materia Prima Directa	2,560.25	3,072.30	3,584.35	4,096.40	4,608.45	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50
Materiales Directos	188.96	226.75	264.54	302.34	340.13	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92
Mano de Obra Directa	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00
Laboratorio	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00
Refractario y Crisol	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
GASTOS	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00
Sueldos	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00
Alimentación	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288
Arriendo	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
COSTO TOTAL DE FABRICAC.	8,337.21	8,887.05	9,436.89	9,986.73	10,536.57	11,086.42	11,086.42	11,086.42	11,086.42	11,086.42	11,086.42	11,086.42	11,086.42
Pago Préstamo CFN	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32
EGRESOS TOTALES	11,583.53	12,133.37	12,683.21	13,233.06	13,782.90	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74
FLUJO DE CAJA DEL PERIODO	3,416.47	5,366.63	7,316.79	9,266.94	11,217.10	13,167.26	15,667.26	18,167.26	20,667.26	23,167.26	25,667.26	28,167.26	30,667.26
DISPONIBLE EN CAJA	73,416.47	78,783.10	86,099.88	95,366.83	106,583.93	119,751.19	135,418.45	153,585.71	174,252.97	197,420.23	223,087.50	251,254.76	281,922.02

**TABLA 10**  
**FLUJO DE CAJA EN EL SEGUNDO AÑO PARA LA FABRICACION DE BARRAS DE ALUMINIO EN**  
**MOLDE DE ARENA**

	feb-10	mar-10	abr-10	may-10	jun-10	jul-10	ago-10	sep-10	oct-10	nov-10	dic-10	ene-11	feb-11
<b>PRODUCCION Kg</b>	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
<b>VENTAS (Kg)</b>	1,900	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
<b>SALDO INICIAL EN CAJA</b>	281,922.02	315089.28	350756.54	386423.80	422091.06	457758.32	493425.58	529092.85	564760.11	600427.37	636094.63	671761.89	707429.15
<b>INGRESOS POR VENTAS</b>	47,500.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00
<b>COSTOS VARIABLES Y FIJOS</b>	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42	8,558.42
Materia Prima Directa	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50
Materiales Directos	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92	377.92
Mano de Obra Directa	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00
Laboratorio	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00
Refractario y Crisol	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>GASTOS</b>	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00	2528.00
Sueldos	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00
Alimentación	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00
Arriendo	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
<b>COSTO TOTAL DE FABRICAC.</b>	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42	11086.42
Pago Préstamo CFN	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32
<b>EGRESOS TOTALES</b>	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74	14,332.74
<b>FLUJO DE CAJA DEL PERIODO</b>	33167.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26	35667.26
<b>DISPONIBLE EN CAJA</b>	315089.28	350756.54	386423.80	422091.06	457758.32	493425.58	529092.85	564760.11	600427.37	636094.63	671761.89	707429.15	743096.41

**TABLA 11**  
**COSTO DE PRODUCCIÓN DEL ALUMINIO UNS713.0 CON**  
**MOLDE METÁLICO**

MATERIA PRIMA Y MATERIALES	Costo unit.	Cantidad	Costo diario	Costo semanal	Costo mensual
<b>MATERIA PRIMA DIRECTA</b>					
Aluminio perfil (kg.)	\$ 2.20	13.62	\$ 179.78	\$ 1,078.70	\$ 4,314.82
AceInox (kg.)	\$ 2.20	0.15	\$ 1.98	\$ 11.88	\$ 47.52
Zinc (kg.)	\$ 3.00	0.105	\$ 1.89	\$ 11.34	\$ 45.36
Cobre (kg.)	\$ 4.40	1.125	\$ 29.70	\$ 178.20	\$ 712.80
					<b>\$ 5,120.50</b>
<b>MATERIALES DIRECTOS</b>					
Molde metálico	\$ 6,650.00				\$ 6,650.00
<b>Costo Total Materia Prima y Mat.</b>					<b>\$ 11,770.50</b>
<b>Mano de obra directa</b>					
	<b>Remuneración</b>	<b>Cantidad de personal</b>	<b>Total mensual</b>		
Obreros	\$320	3	\$960		
<b>Total MOD</b>			<b>\$960</b>		
<b>Costos fijos</b>					<b>Total mensual</b>
Laboratorio					\$2.000
Refractario y crisol					\$100
<b>Total costos fijos</b>					<b>\$2.100</b>
<b>Gastos</b>	<b>Valor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total mensual</b>		
<b>Sueldos</b>					
Vendedor y suministro	\$320	1	\$320		
Secretaria - contadora	\$320	1	\$320		
Ingeniero	\$600	1	\$600		
Alimentación (6 personas)	\$12	24	\$288		
Arriendo			\$1.000		
<b>Total gastos</b>					<b>\$2.528</b>
<b>Total de Egresos</b>					<b>\$11.086,42</b>
<b>Costo total de producción</b>			<b>\$17.358</b>		
<b>Producción total en kg.</b>			<b>2000</b>		
<b>Costo de producción por kg.</b>			<b>\$8.68</b>		

**TABLA 12**  
**FLUJO DE CAJA EN EL PRIMER AÑO PARA LA FABRICACION DE BARRAS DE ALUMINIO EN MOLDE**  
**METALICO**

	ene-09	feb-09	mar-09	abr-09	may-09	jun-09	jul-09	ago-09	sep-09	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10
<b>PRODUCCION Kg</b>	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
<b>VENTAS (Kg)</b>	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800
<b>SALDO INICIAL EN CAJA</b>	70,000.00	66,955.43	72,548.81	80,130.14	89,699.42	101,256.65	114,801.83	130,847.01	149,392.19	170,437.37	193,982.55	220,027.74	248,572.92
<b>INGRESOS POR VENTAS</b>	15,000.00	17,500.00	20,000.00	22,500.00	25,000.00	27,500.00	30,000.00	32,500.00	35,000.00	37,500.00	40,000.00	42,500.00	45,000.00
<b>COSTOS VARIABLES Y FIJOS</b>	12,270.25	6,132.30	6,644.35	7,156.40	7,668.45	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50
Materia Prima Directa	2,560.25	3,072.30	3,584.35	4,096.40	4,608.45	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50
Materiales Directos	6,650.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mano de Obra Directa	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00
Laboratorio	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00
Refractario y Crisol	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>GASTOS</b>	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00	2,528.00
Sueldos	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00	1,240.00
Alimentación	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288
Arriendo	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<b>COSTO TOTAL DE FABRICAC.</b>	14,798.25	8,660.30	9,172.35	9,684.40	10,196.45	10,708.50	10,708.50	10,708.50	10,708.50	10,708.50	10,708.50	10,708.50	10,708.50
Pago Préstamo CFN	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32
<b>EGRESOS TOTALES</b>	18,044.57	11,906.62	12,418.67	12,930.72	13,442.77	13,954.82	13,954.82	13,954.82	13,954.82	13,954.82	13,954.82	13,954.82	13,954.82
<b>FLUJO DE CAJA DEL PERIODO</b>	-3,044.57	5,593.38	7,581.33	9,569.28	11,557.23	13,545.18	16,045.18	18,545.18	21,045.18	23,545.18	26,045.18	28,545.18	31,045.18
<b>DISPONIBLE EN CAJA</b>	66,955.43	72,548.81	80,130.14	89,699.42	101,256.65	114,801.83	130,847.01	149,392.19	170,437.37	193,982.55	220,027.74	248,572.92	279,618.10

**TABLA 13**  
**FLUJO DE CAJA EN EL SEGUNDO AÑO PARA LA FABRICACION DE BARRAS DE ALUMINIO EN MOLDE**  
**METALICO**

	feb-10	mar-10	abr-10	may-10	jun-10	jul-10	ago-10	sep-10	oct-10	nov-10	dic-10	ene-11	feb-11
<b>PRODUCCION Kg</b>	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
<b>VENTAS (Kg)</b>	1,900	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
<b>SALDO INICIAL EN CAJA</b>	279,618.10	313163.28	349208.46	385253.64	421298.82	457344.00	493389.18	529434.37	565479.55	601524.73	637569.91	673615.09	709660.27
<b>INGRESOS POR VENTAS</b>	47,500.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00	50,000.00
<b>COSTOS VARIABLES Y FIJOS</b>	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50	8,180.50
Materia Prima Directa	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50	5,120.50
Materiales Directos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mano de Obra Directa	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00	960.00
Laboratorio	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00	2000.00
Refractario y Crisol	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>GASTOS</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>	<b>2528.00</b>
Sueldos	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00	1240.00
Alimentación	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00	288.00
Arriendo	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
<b>COSTO TOTAL DE FABRICAC.</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>	<b>10708.50</b>
Pago Préstamo CFN	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32	3246.32
<b>EGRESOS TOTALES</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>	<b>13,954.82</b>
<b>FLUJO DE CAJA DEL PERIODO</b>	<b>33545.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>	<b>36045.18</b>
<b>DISPONIBLE EN CAJA</b>	<b>313163.28</b>	<b>349208.46</b>	<b>385253.64</b>	<b>421298.82</b>	<b>457344.00</b>	<b>493389.18</b>	<b>529434.37</b>	<b>565479.55</b>	<b>601524.73</b>	<b>637569.91</b>	<b>673615.09</b>	<b>709660.27</b>	<b>745705.45</b>



Según el análisis económico efectuado a los dos métodos utilizados para la elaboración de barras de aleaciones especiales, cada uno de ellos presenta un alto ingreso económico a largo y corto plazo. Se realizó un flujo de caja a dos años utilizando moldeo en arena y por medio de molde permanente, el primero muestra \$ 281.922 disponibles en caja para el primer año de producción y para el segundo año \$743.096, el segundo \$ 279.618 para el primer año y para el segundo año \$745.705. Los resultados a dos años muestran una mínima diferencia entre los dos métodos, siendo el método de moldeo en arena el que más ingresos presenta, esto debido al alto costo inicial del molde metálico, sin embargo se espera que en el tercer año se recupere esta inversión inicial y el método por molde permanente presente ingresos más elevados. El método de elaboración de barras por medio del moldeo en arena genera más desperdicios que el molde permanente además limita las velocidades de trabajo, pero permite la elaboración de una amplia gama de formas y tamaños, lo que no se logra con el otro método. Los resultados obtenidos muestran que se puede llevar paralelamente la producción de barras macizas utilizando ambos métodos y obteniendo ingresos elevados, siempre y cuando se tenga la infraestructura adecuada para llevarlo a cabo. Cada uno de estos métodos muestra ventajas con respecto al otro, por esto es

conveniente la implementación de líneas de producción que permitan satisfacer los requerimientos que el mercado exige.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Con relación a los objetivos establecidos en la introducción de esta tesis y comparándolos con los resultados encontrados durante la experimentación y análisis de inversión se tienen las siguientes conclusiones:

- Mediante el estudio realizado y los resultados obtenidos experimentalmente es factible la fabricación de barras de aleaciones especiales, sin defectos artesanales y de más alta resistencia mecánica con la misma aleación.
- El tamaño de grano característico de este método de fundición para hacer barras y piezas, es el parámetro de más importancia para encontrar resistencias mecánicas elevadas.

- Se utilizó simulación en el laboratorio de las fuerzas centrífugas por medio de una prensa de compresión como punto de partida para la obtención de los parámetros para la centrifugación, lo que permitió conocer los resultados con anticipación a la experimentación mediante la centrifugación.
- Los materiales necesarios para la elaboración de los moldes para centrifugación no son muy diferentes a los de métodos convencionales hechos por gravedad y por ende el costo de elaboración sigue siendo relativamente bajo.
- La elaboración de barras macizas por medio de centrifugación vertical es un método económicamente factible, debido a su relativo bajo costo inicial en el caso del moldeo en arena, en el que se obtienen altos ingresos a partir del primer año de producción.

### **Recomendaciones**

- Aunque la fundición centrífuga es conocida y utilizada hace mucho tiempo los parámetros que intervienen en ella y su aporte en la calidad de la pieza fundida no es aún conocido en su totalidad, por ello es necesario llevar a cabo minuciosos experimentos para despejar estas incógnitas.
- Los cambios entre velocidad de llenado y velocidad de trabajo deben ser lo más cortos posibles para evitar una solidificación prematura de la pieza fundida dentro del molde.

- Elaborar moldes que sean concéntricos y compactados de tal manera que se evita excesiva vibración y salida de material en el caso del moldeo en arena.
- Mantener un control más preciso de la velocidad mediante dispositivos que muestren su valor en tiempo real, adicionalmente contar con un sistema de frenado para hacer el proceso más continuo y controlado.
- Llevar producciones paralelas, tanto en molde permanente como en arena, a fin de ampliar la gama de productos ofrecidos por medio de la centrifugación vertical.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. INVESTIGATION OF CENTRIFUGAL CASTING CONDITIONS INFLUENCE ON PART QUALITY, Department of marine and manufacturing Technology, national Technical university of Athens, Greece.
2. INFLUENCE OF THE ROTATIONAL SPEED IN CENTRIFUGAL CASTING, International conference on advanced materials and composites (ICAMC – 2007), Oct 24 – 26, 2007
3. Metal handbook, Ninth Edition, Tomos 2 y 15.
4. Fundición Centrifuga, UMSS – Facultad de Ciencias y tecnología, Capitulo II.
5. SAE HANDBOOK, Part 1, 1979.
6. CENTRIFUGAL CASTING, Janco, Nathan, Illinois, 1988