



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TALLER DE FUNDICIÓN DE HIERRO  
FUNDIDO GRIS, EN LAS INSTALACIONES DEL INGENIO SANTA ANA**

**Edson Josué Gómez Silva**

Asesorado por el Ing. Gustavo Adolfo de León Escobar

Guatemala, junio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TALLER DE FUNDICIÓN DE HIERRO  
FUNDIDO GRIS, EN LAS INSTALACIONES DEL INGENIO SANTA ANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDSON JOSUÉ GÓMEZ SILVA**

ASESORADO POR EL ING. GUSTAVO ADOLFO DE LEÓN ESCOBAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Véliz Padilla
EXAMINADOR	Ing. Héctor Alexander Juárez Reyes
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TALLER DE FUNDICIÓN DE HIERRO FUNDIDO GRIS, EN LAS INSTALACIONES DEL INGENIO SANTA ANA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 8 de octubre de 2010.



**Edson Josué Gómez Silva**

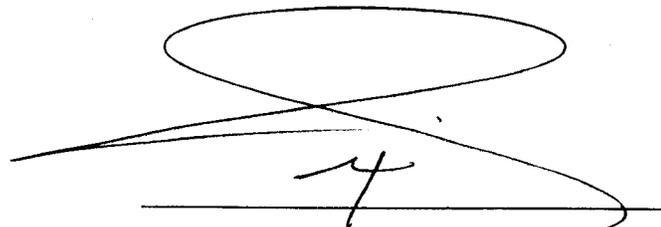
Guatemala, 18 de junio de 2012.

Ingeniero Julio César Campos Paiz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Estimado Ingeniero Campos:

Por este medio le comunico que ha solicitud del estudiante Edson Josué Gómez Silva, quién se identifica con el número de carné 2003-12743, se le dio seguimiento a su trabajo de graduación titulado: **“PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TALLER DE FUNDICIÓN DE HIERRO FUNDIDO GRIS, EN LAS INSTALACIONES DEL INGENIO SANTA ANA”** con lo cual se dio por terminado dicho trabajo en la fecha 18/06/2012, por lo que quedaremos a la espera del proceso de revisión en la escuela de mecánica

Agradeciéndole la atención a la presente se despide de usted, muy atentamente:



Ing. Gustavo Adolfo de León Escobar

Ingeniero Mecánico

Colegiado No. 4613

*Gustavo Adolfo De León*  
INGENIERO MECÁNICO  
Colegiado 4613

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA

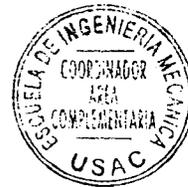


FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TALLER DE FUNDICIÓN DE HIERRO FUNDIDO GRIS, EN LAS INSTALACIONES DEL INGENIO SANTA ANA, del estudiante **Edson Josué Gómez Silva**, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez'.



**Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez**  
Coordinador de Área

Guatemala, julio de 2012

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al Trabajo de Graduación titulado **PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TALLER DE FUNDICIÓN DE HIERRO FUNDIDO GRIS EN LAS INSTALACIONES DEL INGENIO SANTA ANA** del estudiante Edson Josué Gómez Silva, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Julio Campos Paiz', written over a faint grid or lines.

Ing. Julio César Campos Paiz

**DIRECTOR**



Guatemala, junio de 2013

JCCP/bhdei

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 445 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TALLER DE FUNDICIÓN DE HIERRO FUNDIDO GRIS, EN LAS INSTALACIONES DEL INGENIO SANTA ROSA**, presentado por el estudiante universitario: **Edson Josué Gómez Silva**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 24 de junio de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser quien me dio la sabiduría, la fuerza y el entusiasmo para seguir adelante.
<b>Mi padre</b>	Luis Gómez por el apoyo incondicional dado durante todo el tiempo y sobre todo por demostrarme que en esta vida se puede alcanzar todo si uno se lo propone.
<b>Mi madre</b>	Enma Silva de Gómez por su amor incondicional, apoyo, entrega y dedicación, durante toda mi vida.
<b>Mis hermanos</b>	Magnolia y Marlon Gómez Silva, por sus sabios consejos y apoyo en todo momento.
<b>Mis sobrinos</b>	Gabriela Sofía Gómez Silva, María José Gómez Cardoza y Rodrigo Sebastian Gómez Lopez, con todo mi cariño para ellos.
<b>Cristina Recinos</b>	Por ser una persona muy especial para mí.
<b>Mi familia en general</b>	Con mucho cariño y respeto.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Ing. Gustavo de León**      Por su paciencia, experiencia y apoyo brindado en la elaboración de este trabajo.
- Ing. Jaime Rosales**      Quién me brindó su apoyo incondicionalmente, en la elaboración de este trabajo.
- Lic. Mario Sandoval**      Por su valiosa colaboración.
- Ing. Jaime Rosales**      Por la ayuda brindada en la elaboración de este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Reseña histórica.....	1
1.1.2. Visión .....	2
1.1.3. Misión.....	3
1.1.4. Producción y servicios prestados.....	3
1.2. Estructura de la empresa.....	6
1.3. Proceso de producción del azúcar.....	9
1.4. Ubicación .....	10
2. MARCO DE REFERENCIA .....	13
2.1. Hornos de fundición.....	13
2.1.1. Alto horno.....	13
2.1.1.1. Subproductos del alto horno.....	14
2.1.1.1.1. La escoria.....	14
2.1.1.1.2. El gas tragante .....	14
2.1.1.1.3. Arrabio.....	15
2.1.2. Horno cubilote .....	15

2.1.2.1.	Revestimiento del cubilote .....	17
2.1.2.2.	Funcionamiento del cubilote .....	18
2.1.2.3.	Procesos modernos en los cubilotes .....	20
2.1.3.	Horno eléctrico.....	22
2.1.4.	Horno reverbero.....	24
2.1.5.	Horno Siemens – Martin .....	25
2.1.6.	Horno Bessemer y Thomas .....	27
2.2.	Hierro fundido.....	29
2.2.1.	Tipos de hierro fundido .....	30
2.2.2.	Hierro fundido blanco.....	31
2.2.3.	Hierro fundido maleable .....	32
2.2.4.	Hierro perlítico maleable .....	33
2.2.5.	Hierro fundido gris.....	33
2.2.5.1.	Silicio en el hierro fundido .....	36
2.2.5.2.	Azufre en hierro fundido.....	37
2.2.5.3.	Manganeso en el hierro fundido.....	37
2.2.5.4.	Fósforo en el hierro fundido .....	38
2.2.5.5.	Tratamiento térmico del hierro gris .....	39
2.2.5.6.	Tamaño y distribución de las hojuelas de grafito.....	42
2.2.5.7.	Propiedades mecánicas y aplicaciones del hierro gris .....	46
2.2.6.	Hierro fundido moldeado en frío.....	48
2.2.7.	Hierro fundido nodular .....	51
2.2.8.	Hierro fundido aleado.....	53
2.3.	Moldeo .....	53
2.3.1.	Moldes .....	54
2.3.1.1.	Contracción y gases en las piezas moldeadas .....	56

2.3.1.2.	Solidificación del metal .....	58
2.3.1.3.	Diseño de los moldes .....	60
2.3.1.4.	Modelos.....	62
2.3.1.5.	Arenas de moldeo .....	64
2.3.1.6.	Arenas para machos .....	66
2.3.1.7.	Maquinaria para el moldeo con arena .....	67
2.3.1.8.	Moldes de arena.....	69
2.3.1.9.	Llenado del molde .....	71
2.3.1.10.	Moldeo con yeso y con cemento .....	73
2.3.2.	Moldeo de precisión a la cera pérdida.....	74
2.3.2.1.	Moldeo por revestimiento .....	75
2.3.3.	Moldeo en cáscara o casquete .....	75
2.3.4.	Moldeo en coquillas.....	76
2.3.5.	Moldeo a presión o por inyección.....	77
2.3.6.	Moldeo por centrifugación.....	77
2.3.7.	Colada continua .....	78
2.3.8.	Galvanoplastia o electroconformación .....	79
2.3.9.	Nuevas técnicas de moldeo .....	79
2.3.10.	Moldeo de metales amorfos .....	81
2.4.	Combustibles .....	81
2.4.1.	Composición química de los combustibles.....	82
2.4.2.	Reacciones químicas básicas de la combustión .....	82
2.5.	Aire necesario en la combustión .....	83
2.5.1.	Aire teórico.....	84
2.5.2.	Exceso de aire .....	84
2.5.3.	Definición de exceso de aire .....	85
2.6.	Combustibles metalúrgicos .....	85
2.6.1.	Clasificación de los combustibles.....	87
2.6.1.1.	Combustibles sólidos .....	87

2.6.1.2.	Combustibles líquidos.....	88
2.6.1.3.	Combustibles gaseosos.....	88
2.7.	Materiales refractarios.....	89
2.7.1.	De acuerdo a su comportamiento químico.....	89
2.7.1.1.	Refractarios ácidos.....	89
2.7.1.2.	Refractarios básicos.....	90
2.7.1.3.	Refractarios neutros.....	90
2.7.1.4.	Refractarios especiales.....	90
2.7.2.	De acuerdo a su origen y/o constitución mineralógica....	90
2.7.2.1.	Refractarios de sílice.....	91
2.7.2.2.	Refractarios de arcilla.....	91
2.7.2.3.	Refractarios de alta alúmina.....	92
2.7.2.4.	Refractarios básicos.....	92
2.7.2.5.	Refractarios de carbón.....	92
2.7.2.6.	Refractarios aislantes.....	93
3.	SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA.....	95
3.1.	Proceso de producción de azúcar.....	95
3.1.1.	Diagrama del proceso.....	95
3.2.	Cantidad de molinos instalados.....	97
3.3.	Cantidad de piezas instaladas de hierro fundido.....	97
3.3.1.	Peines superiores.....	98
3.3.2.	Peines bagaceros.....	98
3.3.3.	Cuchillas centrales.....	98
3.3.4.	Cuchillas de cuarta maza.....	99
3.3.5.	Acoplamientos.....	99
3.4.	Existencia mínima en tiempo de zafra.....	99

4.	PROPUESTA PARA EL TALLER DE FUNDICIÓN .....	101
4.1.	Ubicación .....	101
4.2.	Propuesta del plano del taller .....	101
4.3.	Flujograma del proceso .....	102
4.4.	Selección del horno a utilizar .....	103
4.4.1.	Dimensiones del horno.....	103
4.4.2.	Material del horno.....	104
4.4.3.	Accesorios.....	104
4.5.	Selección del material refractario.....	104
4.5.1.	Dimensiones del refractario.....	105
4.6.	Selección del combustible .....	105
4.7.	Selección del tipo de arena para moldeo.....	105
4.8.	Materia prima.....	105
5.	ANÁLISIS TÉCNICO PARA EVALUACIÓN DE COSTOS.....	107
5.1.	Análisis técnico-económico del proyecto .....	107
5.1.1.	Costo de implementación del taller .....	110
5.1.2.	Costo de elaboración de las piezas.....	111
5.2.	Análisis de costo beneficio del proyecto .....	113
5.2.1.	Valor Presente Neto (VPN) .....	114
5.2.2.	Tasa Interna de Retorno (TIR) .....	117
	CONCLUSIONES .....	119
	RECOMENDACIONES .....	121
	BIBLIOGRAFÍA.....	123



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Organigrama funcional del proceso industrial.....	8
2.	Mapa de la empresa.....	11
3.	Alto horno .....	14
4.	Horno cubilote .....	16
5.	Horno eléctrico .....	24
6.	Horno reverbero .....	25
7.	Horno Siemens - Martin.....	27
8.	Horno Bessemer y Thomas .....	28
9.	Microestructura del hierro fundido gris con la matriz por entero perlítica .	35
10.	Tamaño de las hojuelas de grafito.....	43
11.	Longitudes de las hojuelas de grafito .....	43
12.	Tipos de hojuelas de grafito.....	45
13.	Propiedades típicas de las barras de hierro gris.....	48
14.	Fractura de una pieza fundida de hierro moldeada en frío .....	51
15.	Hierro nodular, sin estar atacado químicamente .....	52
16.	Esquema de las partes principales de un molde .....	55
17.	Cucharas de colada.....	58
18.	Influencia de la sección en la formación de grietas .....	61
19.	Coladas de un perfil en L.....	62
20.	Efecto de la humedad sobre la resistencia a la compresión y permeabilidad de la arena de moldeo .....	69
21.	Molde para un engranaje.....	73

22.	Características relativas de algunos metales de moldeo, numerados por orden de preferencia .....	80
23.	Posibilidades industriales de procedimientos de moldeo .....	80
24.	Clasificación de los combustibles.....	86
25.	Diagrama del proceso de fabricación de azúcar .....	96
26.	Distribución del taller de fundición.....	101
27.	Flujograma del proceso de fundición .....	102
28.	Dimensiones del horno de fundición .....	103
29.	Circuito del taller de fundición .....	107
30.	Diagrama de flujo de efectivo.....	115
31.	Diagrama de flujo de efectivo del proyecto .....	116

## TABLAS

I.	Costo de repuestos .....	109
II.	Costo de materiales para la implementación del taller .....	110
III.	Costo de producción de 16,5 toneladas .....	111

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetros
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kJ</b>	Kilojoules
<b>km</b>	Kilómetro
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>lb</b>	Libra
<b>MW</b>	Megawatt
<b>mm</b>	Milímetros
<b>%</b>	Porcentaje
<b>pulg</b>	Pulgadas
<b>ton</b>	Toneladas



## GLOSARIO

<b>Bagazo</b>	Desecho fibroso de la caña de azúcar.
<b>Grafitación</b>	Un procedimiento continuado de grafitación de productos carbonados largos y recocidos.
<b>Maza</b>	Elementos cilíndricos con ranura que se utilizan para extracción de jugo de la caña de azúcar.
<b>Molino</b>	Es una máquina para moler o triturar.
<b>Permeabilidad</b>	Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un líquido que lo atraviese sin alterar su estructura interna.
<b>Potencia</b>	Capacidad que tiene un cuerpo de efectuar un trabajo en un tiempo determinado.
<b>ppm</b>	Partículas por millón.
<b>Pulvimetalurgia</b>	Consiste en la obtención de piezas por medio del prensado de polvo metálico muy fino en moldes adecuados.

<b>Recocido</b>	Es un tratamiento térmico cuya finalidad es el ablandamiento y la reducción de tensiones internas.
<b>Revenido</b>	Es un tratamiento complementario y similar al temple, del que se diferencia en la velocidad de enfriamiento.
<b>Tandem</b>	Una batería de molinos.
<b>TIR</b>	Tasa Interna de Retorno.
<b>Tobera</b>	Es un dispositivo que convierte la energía potencial de un fluido en energía cinética.
<b>VPN</b>	Valor Presente Neto.
<b>Zafra</b>	Época en la cual se puede cosechar la caña de azúcar.

## RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación fue desarrollado en el Ingenio Santa Ana, con el fin de buscar una disminución en los costos, estos costos fueron enfocados básicamente en los repuestos de los molinos de los Tandem A y Tandem B.

Los repuestos que se tomaron en cuenta en dicho proyecto fueron únicamente los peines bagaceros, las cuchillas centrales, los peines superiores y los acoplamientos (dados). Fueron únicamente tomados estos repuestos ya que todos están fabricados en fundición de hierro gris y el presupuesto que se tiene destinado para estos, año con año, es bastante elevado, por lo que se procedió a investigar el beneficio de montar una planta para fundir dentro del ingenio sus propios repuestos. Para dicha fundición podremos utilizar una mezcla de chatarra de hierro fundido gris con bloques de hierro colado. Esto nos permitirá mantener la dureza necesaria en nuestro repuestos.

En el resultado del estudio económico, se logró concluir que dicho proyecto es factible, ya que los cálculos realizados nos lo confirman, la inversión realizada, tendrá una recuperación en los primeros nueve años de operación, por lo cual podemos decir que el invertir en dicho proyecto, reducirá en gran medida los costos que se tienen actualmente, en la fabricación de los repuestos ya mencionados.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Proponer la implementación de un taller de fundición de hierro fundido gris dentro de las instalaciones del Ingenio Santa Ana.

### **Específicos**

1. Evaluar el costo-beneficio que implica la implementación del taller de fundición.
2. Reducir considerablemente el gasto anual que conlleva la fabricación de estos, por medio de la tercerización.
3. Ser una guía práctica de inducción y fácil comprensión para el personal encargado de montar dicho taller.
4. Realizar un manual práctico de fundición para dicho taller.



## INTRODUCCIÓN

La fundición es el proceso de producción de un objeto metálico por vaciado de un metal fundido dentro de un molde que luego es enfriado y solidificado. La necesidad de la fundición de metales ha sido muy importante debido a la gran variedad de aplicaciones que estos materiales tienen actualmente. Una de las mayores razones del uso de la fundición es que puede ser producida económicamente en cualquier forma y tamaño, el tipo más común de molde de fundición es hecho de arena y arcilla, en donde el diseño forma una cavidad en la cual se vaciará el material fundido para su posterior enfriado y solidificación.

En un proceso de fundición, los moldes forman parte importante durante el desarrollo, por lo cual es necesario que dichos moldes sean lo suficientemente fuertes, resistentes a la presión del material derretido y suficientemente permeable para permitir el escape de aire y otros gases desde la cavidad de los moldes, así mismo es importante remarcar que el material del molde también debe de resistir la fusión con el metal.

La producción de diseños para ser usados en fundición requieren de mucho cuidado, precisión y técnica durante su elaboración, tomando en cuenta que el molde a elaborar debe ser hecho a tamaño natural de madera, plásticos o metales que definen la forma externa de la pieza que se pretende reproducir y que formará la cavidad interna en el molde.

En la mayoría de las ocasiones, la precisión de las piezas se ve limitada por el tipo de material utilizado en el moldeo, así como el proceso mismo del moldeo, sin embargo cabe mencionar, que el moldeo con arena permite producir piezas con superficies mas lisas, que las que se pudieran conseguir utilizando otro tipo de materiales.

# **1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA**

## **1.1. Antecedentes**

En los últimos años, la producción azucarera de Guatemala ha tomado más importancia, debido a que en las cosechas recientes se han alcanzado niveles récord de producción, ocupando en el último año el tercer lugar como exportador más grande de Latinoamérica y el Caribe, y el sexto en importancia a nivel mundial. Este hecho representa significativos beneficios económicos para el país, sobre todo, por la generación de divisas y por el empleo que la industria azucarera provee.

### **1.1.1. Reseña histórica**

En 1968 un grupo de empresarios adquirió parte de los equipos de los Ingenios Santa Juana y Canóvanas de Puerto Rico, iniciándose así la construcción del Ingenio Santa Ana, en la Finca Cerritos, ubicada a 65 kilómetros al sur de la ciudad de Guatemala, en el departamento de Escuintla, a 220 metros sobre el nivel del mar. La primera zafra prueba se hizo en 1969/70, moliéndose 154 973,75 toneladas de caña y produciendo 239 525 quintales de azúcar en 136 días; la capacidad instalada en esa época era de 3 500 toneladas por día. En 1 993 comenzó a operar la refinería, diseñada para elaborar azúcar refinada de alta calidad, partiendo de la azúcar blanca sulfitada, con capacidad de 500 toneladas de azúcar por día.

Cuenta con 3 tachos, 7 filtros, 6 centrifugas automáticas, una secadora y una enfriadora; años más adelante, se instaló un clarificador de azúcar disuelta, para poder trabajar con azúcares afinadas.

En el área de Cogeneración, el Ingenio Santa Ana produjo su propia energía eléctrica desde el comienzo de sus operaciones. En efecto, desde 1969 contó con una potencia instalada de 3 500 kW, actualmente la capacidad instalada es de 53 MW. Las operaciones de corte de caña, se iniciaron en el período 1977/78. Se empleaban 1 200 cortadores para cortar 1 000 toneladas de caña diarias, con machete convencional. Hace seis años, se inició el programa de capacitación permanente para el corte de caña con machete australiano, habiéndose incrementado la eficiencia en el corte, la calidad de producto final, y los ingresos de los cortadores.

Así también, se construyeron módulos habitacionales con todas las comodidades, para albergar a los cortadores de cuadrilla, procedentes del altiplano guatemalteco, a los cuales se proporciona alimentación abundante en proteínas, completada con sales de rehidratación oral. En 1996, Santa Ana avanzó significativamente en sus planes estratégicos, al desarrollar una de las fábricas más eficientes, lo cual logró colocar mayor capacidad instalada, con equipo de alta tecnología, ello apoyado por un proyecto de automatización industrial único en Centro América, alcanzando en la zafra 2009/10 una producción récord de 6 000 000 de quintales de azúcar.

### **1.1.2. Visión**

“Ser un grupo corporativo visionario, comprometido con el progreso y bienestar de Guatemala, dedicado a producir eficientemente bienes y servicios de óptima calidad, derivados de la caña de azúcar, por medio del desarrollo de

los recursos humanos y tecnológicos para satisfacer las necesidades de nuestros clientes nacionales e internacionales.”

### **1.1.3. Misión**

“Ser el equipo líder por excelencia en la administración estratégica de la agroindustria azucarera, competitivo en el contexto empresarial que demanda el siglo XXI, a través de un alto grado de tecnificación en todas sus áreas y un equipo humano motivado, desarrollado y visionario que se consolide como un grupo de clase mundial; superándose permanentemente por medio del mejoramiento continuo, con participación activa a todo nivel, sirviendo de modelo a otras empresas de Guatemala y Centro América para proyectarse al mundo.”

### **1.1.4. Producción y servicios prestados**

Como muchas de las empresas, Ingenio Santa Ana tiene dos mercados hacia los cuales comercializa los diversos productos que son aceptados por su calidad.

- Mercado de exportación
  - Azúcar refinada tipo “A”

Es el azúcar de mayor calidad. Sus especificaciones técnicas son: color 0 -45 grados ICUMSA (constituye el factor más importante para este tipo de azúcar), Pol 99,85 por ciento mínima; humedad 0,04 por ciento.

- Azúcar cruda

Constituye el azúcar con una Pol mínima de 97,9 por ciento.

- Mercado Interno

- Azúcar blanca estándar (sulfitada)

Es el azúcar de mayor venta para consumo local. Sus características son Pol 99,4 – 99,6 por ciento, color 180 – 400 ICUMSA, Humedad 0,20 por ciento contiene vitamina A en una concentración de 12 a 20 partículas por millón.

- Azúcar refinada local

Es un azúcar con 0 – 80 grados ICUMSA, Pol 99,6 – 99,8 por ciento, humedad 0,04 por ciento. Este tipo de azúcar es igual que la anterior, también esta vitaminada.

- Azúcar superior

Es un azúcar con 99,6 – 99,79 por ciento de Pol, humedad 0,10 por ciento, Color 80 – 200 ICUMSA.

- Azúcar morena

Es un azúcar con 98 – 99,4 Pol, 0,40 por ciento, humedad y Color 400 – 800.

- Melaza

Se le denomina así a la miel final que se obtiene en el último agotamiento en el ciclo de masas. Sus especificaciones técnicas son: Brix 85 por ciento y pureza entre 30 y 35. Constituye la materia prima para hacer alcohol y rones;

además se usa para alimento de ganado. Este producto se distribuye tanto para mercado nacional como para el internacional.

- Torta de cachaza

Constituye el lodo filtrado y lavado, producido por la precipitación en el proceso de clarificación de jugo mezclado. Sirve como fuente primaria para abonos orgánicos en la producción agrícola.

- Energía eléctrica

Las especificaciones de este servicio es que la empresa cumpla con la cantidad de MW que se proyecte generar o cogenerar. Para tal efecto, Santa Ana cuenta con 6 calderas, una que se alimenta con bunker y bagazo, y otras cinco que trabajan utilizando solo bagazo. Se cuenta además con dos tipos de turbogeneradores:

- Turbos de escape: que se alimentan de vapor del ingenio y devuelven vapor al proceso.
- Turbos de condensación: trabajan con el ciclo cerrado Rankine.

Dicha generación se efectúa a 69, 000 voltios, 60 Hz, trifásica y un factor de potencia de 0,85. Actualmente, durante la época de zafra, se generan 40 MW. de los cuales se venden 32 MW. a la Empresa Eléctrica de Guatemala; durante la época de reparación, se mantienen disponibles con una capacidad de 25 MW.

## 1.2. Estructura de la empresa

Como empresa, Santa Ana está dirigida por una Junta Directiva, se estructura en siete divisiones y el *staff* de la Gerencia General. Está representada por un organigrama tipo vertical dado que tiene una mejor representación administrativa.

- Gerencia General

El gerente general es responsable de dirigir, planificar, coordinar, supervisar, controlar y evaluar las actividades de la gestión técnica y administrativa de las gerencias de división e impartir las instrucciones para la ejecución de las funciones correspondientes.

Además de definir e interpretar las políticas establecidas por la dirección. El correcto desempeño de estas obligaciones, requiere de un conocimiento funcional de todas las fases de la operación de la empresa, y una buena comunicación con sus subordinados.

- División de recursos humanos

Su misión es satisfacer en forma eficaz los requerimientos del Recurso Humano adecuado mediante técnicas y procedimientos actualizados, propiciando las condiciones óptimas para su desarrollo personal y dentro de la Empresa, con el propósito de lograr la mayor eficiencia del Grupo Corporativo.

- División agrícola y servicios

Es un equipo multidisciplinario, cuyo compromiso fundamental es el aprovechamiento integral sostenible de los recursos naturales, para producir caña de azúcar, otros productos agrícolas, servicios de cosecha, taller y transporte.

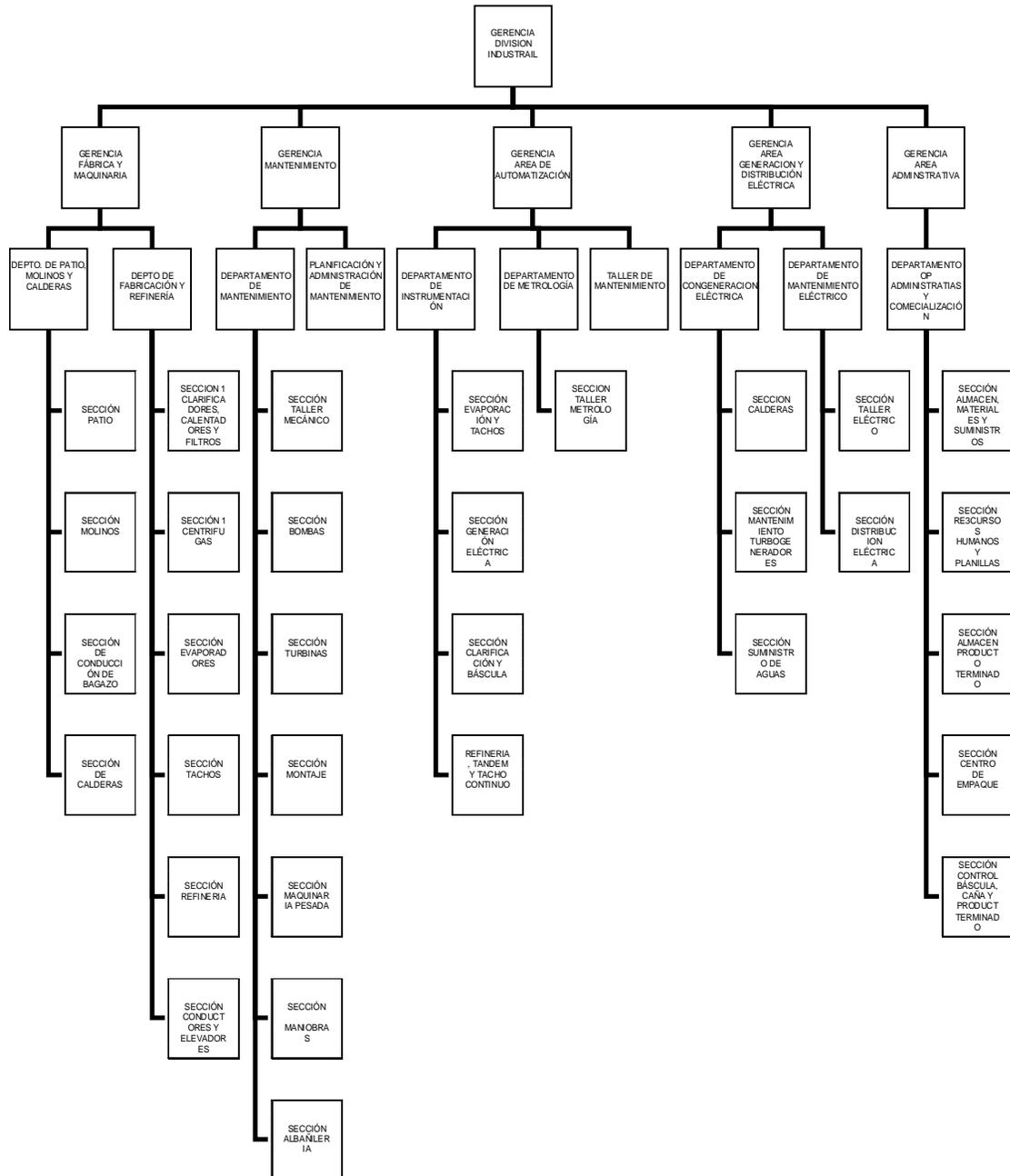
- División administrativa

Es una División completamente de servicio, comprometida con todas las divisiones de la Corporación, a quienes asiste en sus necesidades en forma eficiente y oportuna, a través de una organización adecuada, utilizando recurso humano capacitado y tecnología para satisfacer a sus clientes.

- División industrial

Se ocupa de la administración de los recursos humanos, físicos y tecnológicos para satisfacer las necesidades de los clientes nacionales e internacionales.

Figura 1. Organigrama funcional del proceso industrial



Fuente: organigrama funcional división industrial.

### **1.3. Proceso de producción del azúcar**

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una planta perenne que pertenece a la familia de las gramíneas, que tiene la ventaja de ser la más eficiente por transformar la energía solar en azúcares y biomasa. También, genera igual cantidad de oxígeno que cualquier bosque tropical. La caña cuando se planta, produce de 4 a 7 cortes anuales (retoños), sin necesidad de plantarla cada año.

De toda la caña se corta, el 33 por ciento es mecanizada y el 67 por ciento se corta manualmente, hay siete frentes de corte que suministran entre 7 500 y 8 000 toneladas de caña diarias. Aproximadamente existen más de 2 000 hombres dedicados al corte de caña, además de los que se dedican a las otras labores de la cosecha, como maquinaria, apuntadores, recogedores de caña, etc.

La caña llega al patio de dos formas: mecanizada y caña larga, en su mayoría es verde, sin quemar; que viene en contenedores, llamados jaulas, para que puedan ser fácilmente descargados. En el patio, la caña es pesada en las básculas y luego se descarga en las mesas de caña, donde es lavada. Después, la caña pasa por los conductores donde es transportada y preparada para que en el sistema de molienda la extracción del jugo sea efectivo.

El sistema de molienda consiste de 2 tandem de molinos compuestos de cuatro rodillos conocidos con el nombre de masas. Se agrega agua de imbibición para hacer más eficiente la extracción de sacarosa.

La finalidad principal de los molinos es conseguir la mayor separación posible de los dos elementos de la caña: fibra y jugo. El jugo extraído es

bombeado a fábrica y el bagazo es conducido a calderas para utilizarse como combustible.

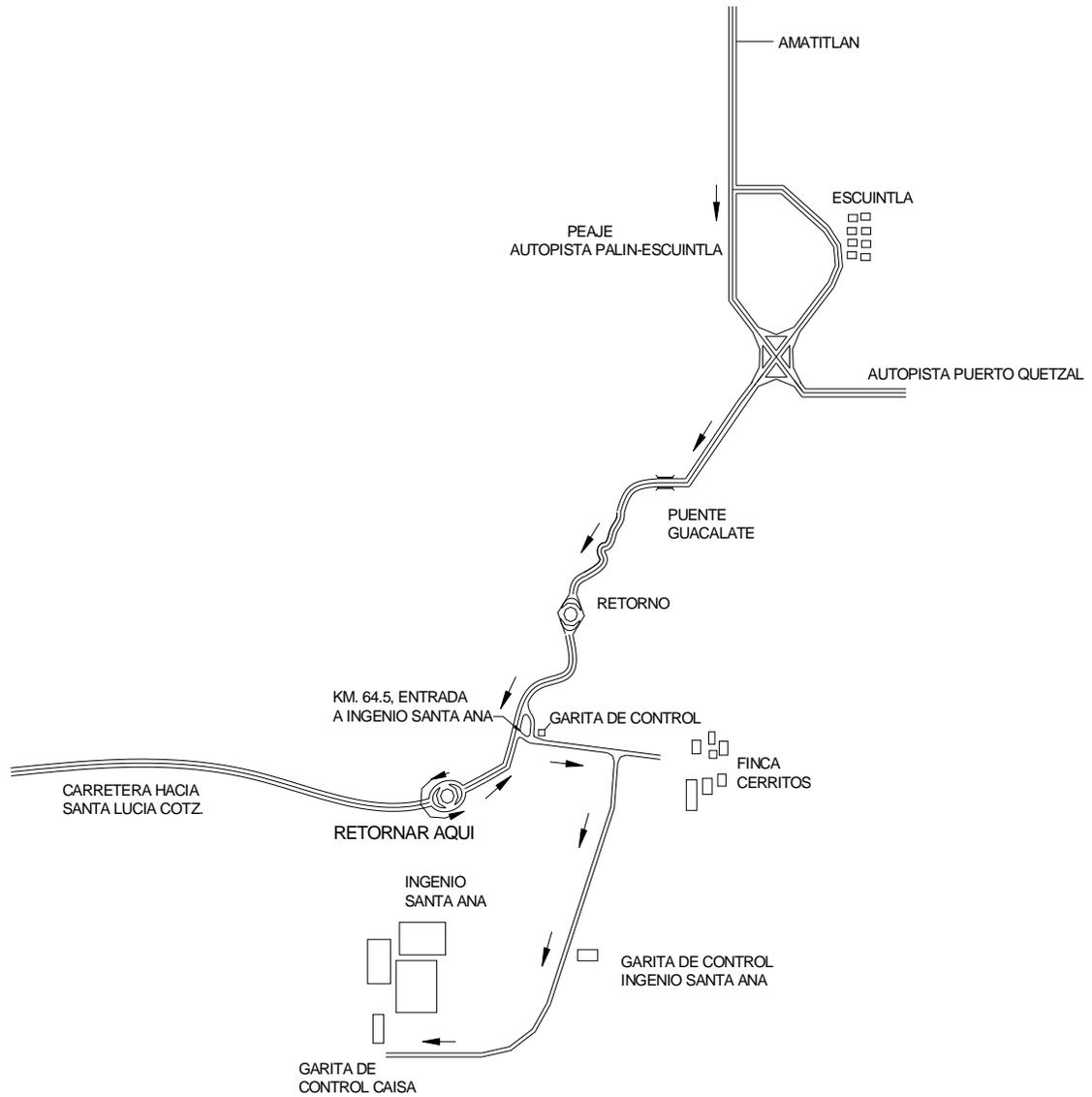
Luego del molino el jugo se pasa por calentadores para subirle la temperatura, luego pasa a clarificación para sacarle los lodos en los clarificadores que trabajan por medio de decantación; el lodo es enviado a los filtros de cachaza para extraer parte del jugo. El jugo del clarificador es enviado a los evaporadores, y luego a los tachos donde se concentra la miel para formar el grano de azúcar.

En las centrifugas se recibe la maza de los tachos; aquí se separa el grano de la miel. El azúcar es enviada a una secadora y enfriadora, luego es transportada al envasado o a bodegas a granel para su distribución. En las calderas se genera todo el vapor necesario para el funcionamiento de las turbinas, turbogeneradores y cocimientos en el proceso de fabricación. Los hornos de las calderas son alimentados con bagazo, que es transportado por conductores de tablillas o bandas transportadoras.

#### **1.4. Ubicación**

El Ingenio Santa Ana tiene ubicada su planta productora de azúcar en el departamento de Escuintla en el kilómetro 64,5 carretera a Santa Lucía Cotzumalguapa, interior de la finca cerritos, como a continuación se muestra en el plano.

Figura 2 Mapa de la empresa



### RUTA A INGENIO SANTA ANA

Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.



## **2. MARCO DE REFERENCIA**

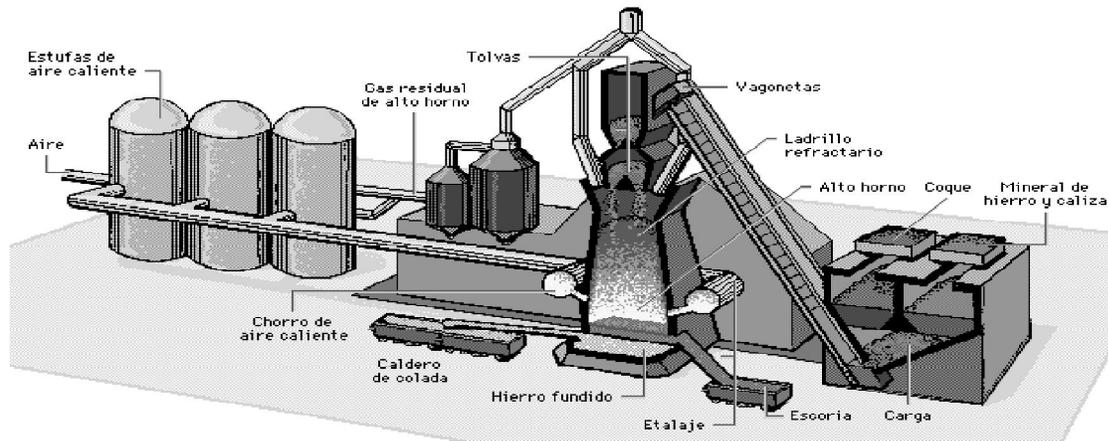
### **2.1. Hornos de fundición**

Este tipo de hornos, se utilizan para la fundición tanto de metales férreos como de metales no férreos, tales como; cobre, latón, bronce y también aluminio en algunas ocasiones.

#### **2.1.1. Alto horno**

El alto horno está constituido por dos cuerpos huecos de forma especial colocados uno sobre otro y contruidos de obra de albañilería que se mantiene sujeta dentro de una envolvente de acero. Sus partes principales son el soporte u obra, el etalaje, el vientre, la cuba y el tragante. Tiene una altura de 30 a 80 metros; su diámetro máximo es de 10 a 14 metros. El alto horno se carga alternativamente con una mezcla de minerales y fundentes, así como con coque. Las adiciones de fundentes (principalmente cal), fluidifican los componentes térreos, difícilmente fusibles, de los minerales y de las cenizas del combustible, convirtiéndolos en escoria.

Figura 3 Alto horno



Fuente: Metalurgia general. Tomo I, p. 83.

### 2.1.1.1. Subproductos del alto horno

Los subproductos del alto horno son derivados de la fundición que pueden ser utilizados en su momento para una aplicación diferente, entre los más comunes tenemos: la escoria, el gas tragante y el arrabio.

#### 2.1.1.1.1. La escoria

La escoria constituye un subproducto. Consta principalmente de silicato de calcio y se emplea en construcción (balasto o macadán, ladrillos de escoria, lana de escoria, cemento portland de escorias)

#### 2.1.1.1.2. El gas tragante

El gas tragante o de alto horno es también un subproducto. Contiene aproximadamente un 24 por ciento de óxido de carbono y además anhídrido carbónico, hidrógeno y nitrógeno.

Este gas de alto horno es combustible y se utiliza para el calentamiento de los recuperadores de calor, calderas de vapor y demás fines calefactores, como carburante gaseoso en motores de gas y para calentamiento de las cámaras de coque.

#### **2.1.1.1.3. Arrabio**

El arrabio es el material fundido que se obtiene en el alto horno mediante la reducción del mineral de hierro. Entre los materiales básicos empleados para fabricar arrabio se encuentran hierro, coque y caliza.

#### **2.1.2. Horno cubilote**

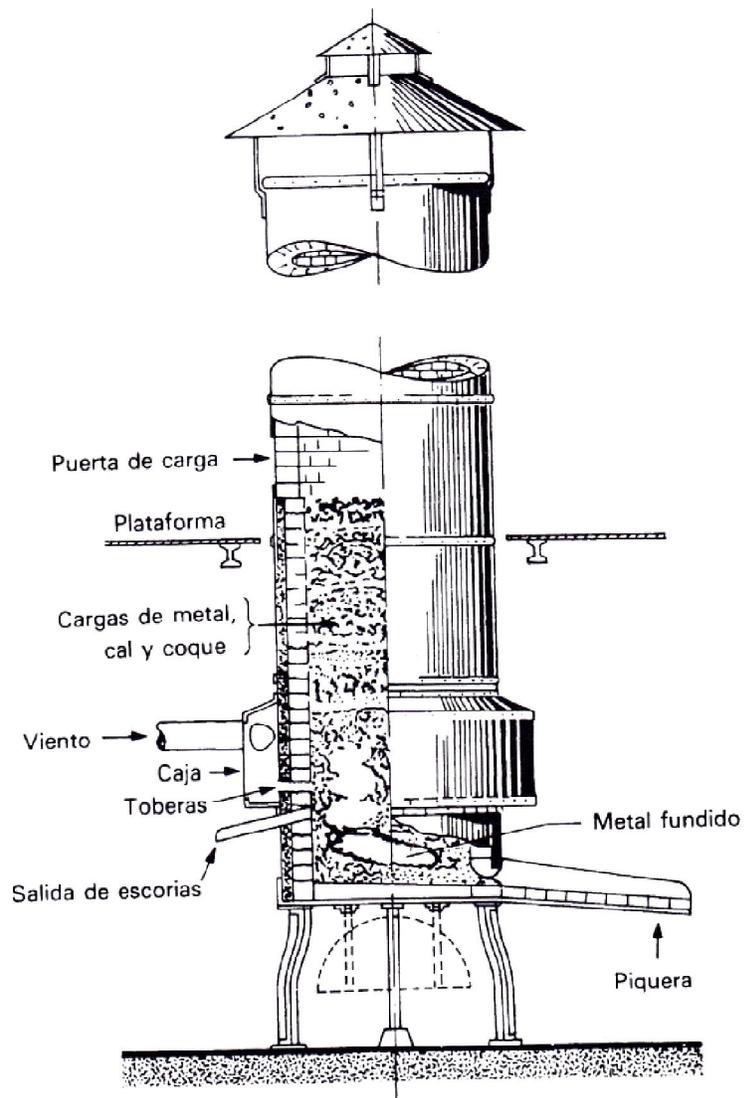
Los hornos cubilotes son equipos muy económicos y de poco mantenimiento, estos se utilizan para hacer fundición de hierros colados (hierro gris o fundición gris). Consisten en un tubo de más de 4 metros de longitud y pueden tener desde 0,8 hasta 1,4 metros de diámetro. Se cargan en la parte superior con chatarra de hierro, coque y piedra caliza. Para la combustión del coque se inyecta aire con unos ventiladores de alta presión, este accede al interior por unas toberas ubicadas en la parte inferior del horno.

El coque constituye el combustible para calentar el horno. A través de las aberturas cerca del fondo de la carcasa se introduce aire forzado por medio de ventiladores para la combustión del coque.

El fundente es caliza, compuesto alcalino que reacciona con la ceniza del coque y otras impurezas para formar escoria. La escoria sirve para cubrir la fundición, protegiéndola de reaccionar con la atmósfera interior del cubilote y reduciendo las pérdidas de calor.

Cuando la mezcla se calienta, se produce la fusión del hierro y el horno se sangra periódicamente para suministrar el metal líquido listo para el vaciado en moldes.

Figura 4 Horno cubilote



Fuente: Metalurgia general. Tomo I, p. 86.

### **2.1.2.1. Revestimiento del cubilote**

El revestimiento del cubilote puede ser de ladrillos refractarios o de material apisonado, estos últimos se llaman también monolíticos y si se apisonan y se secan bien pueden tener una vida tan larga como la de los mejores ladrillos.

El espesor del revestimiento depende del tamaño del cubilote y de la duración de las coladas. En un funcionamiento normal con 4 a 6 horas de colada por día y producción de 5 toneladas por hora, el espesor es de unos 225 milímetros y en los cubilotes más grandes el revestimiento no tiene espesores mayores de 300 milímetros, a no ser que las condiciones de trabajo sean muy duras. El espesor de la mampostería en la chimenea por encima de la puerta de carga o tragante, no suele pasar de 75 a 120 milímetros.

En muchos cubilotes el revestimiento entre las toberas y el tragante es de espesor uniforme, pero cuando la distancia vertical entre toberas y el tragante es relativamente pequeña se le puede abocinar para que la sección transversal sea mayor por encima de las toberas. Con ello se aumenta la capacidad de la zona de precalentamiento por encima del lecho del coque y puede trabajarse con más economía.

El ensanchamiento debe ser tal que el diámetro de la sección mayor supere en unos 150 a 225 milímetros la sección a la altura de toberas. El bocinado debe empezar 60 o 90 centímetros por encima de las toberas y tener una altura aproximada de 60 centímetros. Estos revestimientos no son recomendables en los siguientes casos:

- Cuando en una misma colada desean fundirse mezclas diferentes y se desea mantenerlas lo más separadas posible, pero sin vaciar el horno antes de pasar de una a otra.
- Cuando la distancia vertical entre las toberas y el tragante es mayor que lo normal y hay una zona de precalentamiento amplia con un revestimiento de espesor uniforme.
- Cuando el cubilote ha de vaciarse más de una vez durante la colada para separar mezclas diferentes. El revestimiento abocinado aumenta el tiempo necesario para vaciar el horno y es mayor el desgaste del revestimiento.
- Para obtener la máxima eficiencia de un cubilote debe ser tal el espacio de precalentamiento que sea capaz de contener aproximadamente las capacidades de metal, coque y caliza que el horno puede consumir en una hora de funcionamiento.

#### **2.1.2.2. Funcionamiento del cubilote**

En la conducción correcta del cubilote se empieza por encender un fuego sobre el fondo y se añade coque en pequeñas cantidades hasta alcanzar el nivel de las toberas, el fuego asciende progresivamente hasta que todo el coque está caliente alimentado por tiro natural, el aire es succionado a través de los agujeros de limpieza y de escoria que se mantienen abiertos. A veces se emplean toberas auxiliares o un pequeño soplante para quemar rápidamente el coque.

Cuando el coque está bien encendido se cierra con arena el agujero de limpieza y se tapa con una placa de acero. Se añade mas coque para alcanzar el lecho de la altura requerida, el cual se comprueba con una barra de medida introducida por la puerta de carga.

Antes de introducir cualquier carga hay que estar seguro de que el coque está bien encendido y que arde fácilmente en las toberas. Cuando está en el punto se añaden las cargas para llenar el horno hasta el nivel del tragante. Se alternan las cargas de metal y coque, el fundente, que normalmente es caliza, se carga con el coque. Cuando el cubilote está lleno se comienza el soplado, y a los 5 o 7 minutos debe verse pasar el metal fundido por delante de las toberas.

Algunos fundidores prefieren mantener abierto el agujero de colada hasta que el metal ya fundido salga caliente del horno, entonces se cierra con un tapón de arcilla. Otros cierran el agujero, una vez que el secado es completo, antes de empezar a soplar. El metal se va acumulando en el crisol o pozo y cuando se supone que hay cantidad suficiente (según experiencia), se sangra el horno.

Mientras tanto se siguen añadiendo cargas de metal y coque para remplazar al metal fundido y así se continúa hasta el fin de la colada. La escoria se sangra por el agujero correspondiente a intervalos de 45 a 60 minutos o siempre que se considere que se ha acumulado en el horno demasiada escoria.

### **2.1.2.3. Procesos modernos en los cubilotes**

En los últimos años se han introducido ciertos perfeccionamientos en la práctica del cubilote, muchos no son realmente nuevos, pero se les ha utilizado como consecuencia del aumento de los precios de la mano de obra y de los materiales. Uno de estos desarrollos es el uso creciente de los cubilotes refrigerados con agua, en los que existe una camisa de agua en la zona de fusión o se proyectan chorros de agua sobre ella.

La refrigeración con agua ahorra refractarios y gastos de reparación. También se emplean frecuentemente toberas de cobre enfriadas por circulación de agua. Es evidente que esta refrigeración resta calor a la zona de fusión, pero en cubilotes grandes de más de 90 centímetros de luz, las economías conseguidas hacen ventajoso su empleo. Otro caso en que se justifica la refrigeración es el de cubilotes que trabajan más de 8 horas seguidas. En casos especiales se han conseguido operaciones de una semana o más sin destrucción del fondo.

Para ahorrar coque y hacer posible el empleo de cargas con mayor proporción de chatarra de acero ha aumentado continuamente el empleo de cubilotes de viento caliente. El empleo de viento precalentado permite usar coques de peor calidad y hacer disminuir las pérdidas de silicio, mientras que a la vez se incrementa la absorción de carbono por el metal. El viento se calienta normalmente a 400 o 500 grados Celsius y se emplean tres sistemas diferentes para precalentamiento:

- Se utiliza un precalentador especial de viento calentado por aceite, gas u otro combustible. Normalmente se trata de un intercambiador tubular de calor en el que el combustible se quema en la cámara de combustión,

pasando los productos por el interior y el aire por el exterior de los tubos, o viceversa.

- El contenido de combustible de los gases de escape del cubilote y su calor sensible se emplean para calentar el viento. La mayor parte de los gases de escape (aproximadamente el 75 por ciento) son extraídos y llevados a una cámara de combustión en la que se queman con aire, los productos de esta combustión pasan por un recuperador metálico y calientan el viento.
- Se extraen los gases por un agujero practicado justamente encima de la zona de fusión y solo se emplea su calor sensible para calentar el viento en un recuperador. Aunque hay varios sistemas y tipos de calentamiento del viento, el procedimiento más empleado es el anterior, y por ello lo describiremos con más detalle. El gas de escape del cubilote sale normalmente a temperaturas comprendidas entre 350 y 500 grados Celsius y contiene de 12 a 16 por ciento de monóxido de carbono. Entre el calor sensible y su poder calorífico resultan unas 540 kilocalorías por metro cúbico. Este gas se extrae por debajo del nivel de carga, siendo conveniente un estrechamiento bajo la puerta de carga para forzar los gases a pasar al sistema de recuperación.

El gas caliente se suele hacer pasar a través de un separador de polvos de tipo ciclón, no se pierde mucha temperatura. Seguidamente los gases llegan a la cámara de combustión situada precisamente delante del recuperador.

Algunos cubilotes no tienen boca lateral para la carga, sino que llevan un tragante cerrado en su parte superior con un sistema de campana y tolva, es más apropiado para los cubilotes grandes. En este caso todos los gases del

tragante pasan por el sistema de recuperación, las ventajas que ofrece el aire caliente en el funcionamiento del cubilote son:

- Disminución del consumo de coque y posibilidad de empleo de coques de menor calidad con muchas cenizas.
- Se pueden fundir y carburar mayores proporciones de chatarra de acero para fabricar fundición.
- Disminuye la pérdida de silicio.
- Es posible conseguir mayores temperaturas de colada, lo que importa principalmente para colar piezas delgadas.

Hay que tener en cuenta que todas las ventajas no se pueden conseguir a la vez. Como cada vez es más necesaria la supresión de humos en los procesos industriales resulta ventajoso el empleo de cubilotes con el tragante cerrado, pues es fácil instalar un colector de polvo después del recuperador y antes que los gases de escape pasen a la chimenea.

### **2.1.3. Horno eléctrico**

En los hornos eléctricos, el calor se produce por transformación de la energía eléctrica producto de la resistencia de un arco, de los electrodos o de la carga. En electrometalurgia se emplean mucho estos hornos para producir la fusión de los materiales de puntos de fusión bajos.

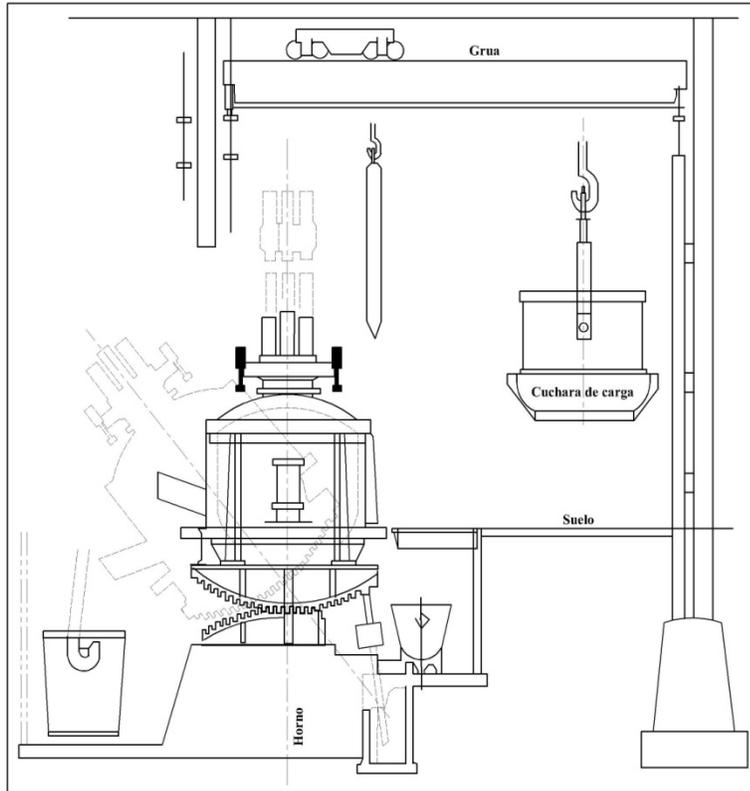
Cuando se emplea la electricidad como manantial térmico, generalmente no se producen humos o gases eliminables por la chimenea, que es un aspecto

inherente al empleo de combustibles. Por tanto, independientemente de la temperatura crítica del proceso, todo el calor eléctrico introducido se puede considerar como calor disponible. Este aspecto de la calefacción eléctrica es importante al compararla con la de los combustibles.

Por ejemplo, el costo por unidad de energía térmica se ha de basar no en la energía total suministrada, sino en la energía utilizada en el proceso. Este tipo de comparación es favorable a la energía eléctrica, especialmente para los procesos que requieren elevada temperatura, en los que solamente una fracción del poder calorífico de los combustibles es calor utilizado.

La productividad conseguida con los hornos eléctricos es consecuencia de tres factores: poder alcanzar con exactitud y seguridad temperaturas elevadas; cierre hermético de los hornos, que permite utilizar atmósferas protectoras y preservar y mejorar el acabado superficial; y conducción automática y manejo de los equipos, que disminuye mucho la mano de obra, a la vez que elimina los errores humanos.

Figura 5 **Horno eléctrico**



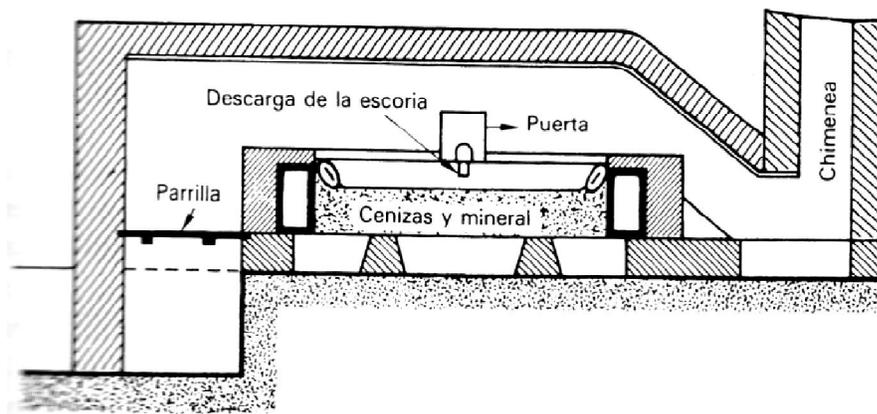
Fuente: Metalurgia general. Tomo I, p. 94.

#### 2.1.4. **Horno reverbero**

Los hornos de tipo reverbero son aquellos en los que el combustible no se encuentra en contacto con la carga, pero si las llamas o los gases de combustión. Las características del horno reverbero son: crisol relativamente poco profundo, de gran área y techo bajo y arqueado, y las llamas reflejan sobre la carga el calor producido en la combustión. La eficacia térmica es pequeña, inferior al 20 por ciento, pero tiene las ventajas de mayor regulación que el de cuba y, además, elimina algunas causas de contaminación.

Este horno tiene un empleo limitado como horno de reducción, pero son extensas sus aplicaciones en el afino de los metales. Ya que la carga se produce en la solera que es de poca profundidad, anteriormente este tipo de hornos solo tenía capacidad de 350 a 450 kilogramos de metal, pero en los modernos la capacidad es de 10 a 30 toneladas llegando incluso a 80 toneladas. La siguiente figura muestra un clásico horno de reverbero.

Figura 6 **Horno reverbero**



Fuente: Metalurgia general. Tomo I, p. 87.

### 2.1.5. Horno Siemens – Martin

Este tipo de hornos de reverbero se emplean principalmente para la fusión y afino del acero destinado a la fabricación de lingotes, y representaron la forma de fabricación de acero más extendido en Gran Bretaña y Estados Unidos. Su capacidad puede variar entre 25 y 500 toneladas. Hace años se empleaban hornos más pequeños, de 15 a 30 toneladas, pero estos han sido sustituidos casi completamente por los hornos eléctricos.

Sin embargo existen todavía en funcionamiento algunos hornos para fabricar piezas coladas grandes, con pesos de 50 toneladas o más.

El horno Martín–Siemens es calentado con aceite, gas de coquería o una mezcla de gas de alto horno y de coquería, si se dispone de ella. Cuando se emplea un gas de poco poder calorífico, la mezcla citada, es fundamental precalentar el gas en un regenerador. El aire se precalienta siempre para conseguir la máxima economía térmica y lograr una elevada temperatura de llama.

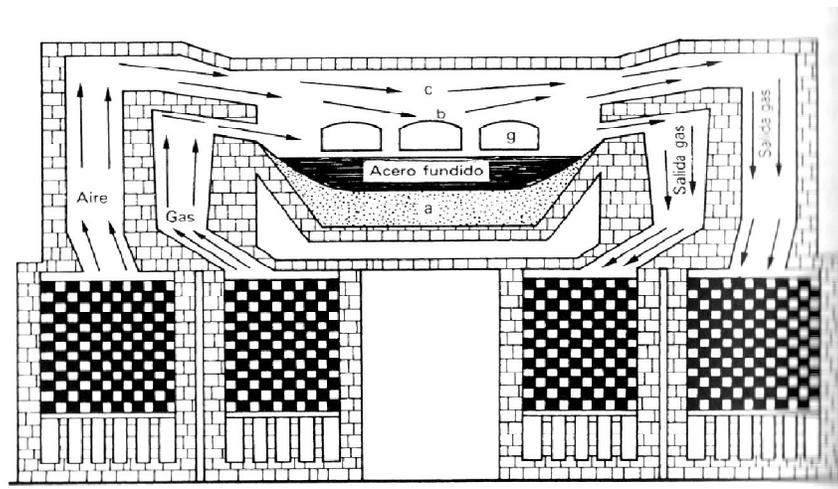
El horno es un recipiente rectangular con puertas para combustible y gases en ambos extremos. Estas puertas pueden responder a diversos diseños, pero en todo caso deben dirigir los gases hacia abajo, hacia la carga o baño del metal. La llama y los gases calientes pasan por encima del baño y salen por el extremo opuesto del horno.

Los gases de la combustión atraviesan uno o dos regeneradores antes de perderse en la chimenea; frecuentemente se colocan calderas después de los regeneradores para recuperar el calor perdido y conseguir la mejor recuperación posible de los productos de la combustión mediante válvulas refrigeradas con y aún el gas de coquería, no suele precalentarse el combustible y solo hay que precalentar el aire en cada uno de los extremos del horno.

En los últimos años se ha empleado oxígeno para aumentar la temperatura de la llama en los períodos iniciales de la fusión. También se utiliza un chorro o lanza de oxígeno para ayudar a la eliminación del carbono en el período de afino del arrabio para convertirlo en acero.

Los hornos Martín–Siemens pueden ser fijos o basculantes, prefiriéndose los últimos para el afino de arrabios altos en fósforo. Para fabricar aceros de calidad se emplean generalmente los hornos Martín–Siemens con revestimiento básico, aunque aún se utilizan en algunos lugares los que tienen revestimiento ácido para obtener aceros de muy buena calidad partiendo de materias primas muy selectas. La siguiente figura muestra un clásico horno de reverbero.

Figura 7 Horno Siemens - Martin



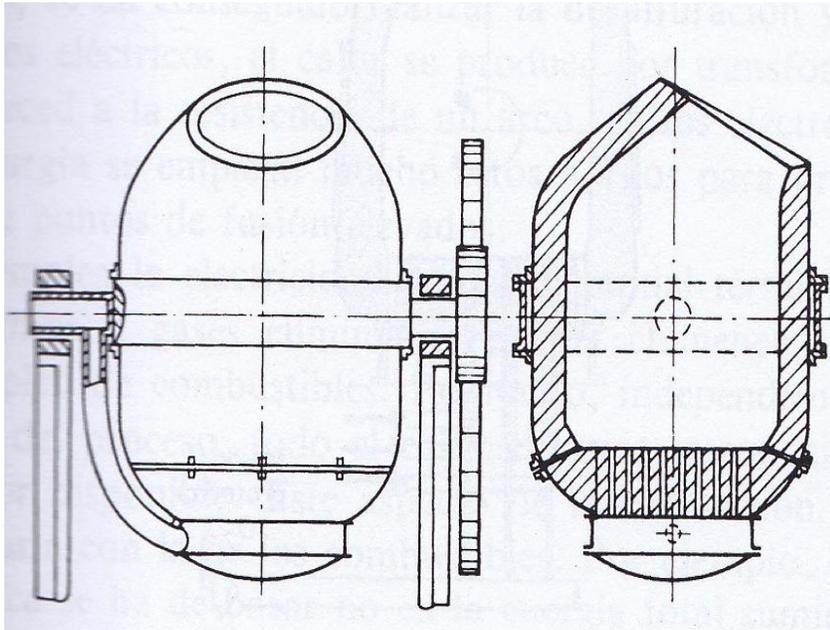
Fuente: Metalurgia general. Tomo I, p. 268.

### 2.1.6. Horno Bessemer y Thomas

Una de las características principales de este horno es la rapidez de la operación, debido a la mezcla íntima del arrabio con el oxígeno, lo que permite transformar en unos minutos la carga del horno, que tiene forma de pera y se conoce como convertidor de acero. Es frecuente denominar este método proceso del convertidor.

El convertidor es una vasija en forma de pera entre dos muñones, uno de los cuales puede estar hueco, revestida interiormente con bloques hechos con una mezcla húmeda de una roca cuarcítica siliciosa, arcilla muy refractaria y polvo de coque. Lo más conveniente es cargar el convertidor con arrabio del mezclador, a unos 1 200 grados Celsius con lo que se consigue mezclar bien las diferentes sangrías y eliminar algo de azufre con la escoria que se forma en su superficie, debido a la avidéz del manganeso por el azufre, no disolverse el sulfuro manganeso en el hierro líquido y tener pequeña densidad, por lo que asciende a la superficie. La siguiente figura muestra un horno convertidor de Bessemer.

Figura 8 **Horno Bessemer y Thomas**



Fuente: metalurgia general. Tomo I, p. 91.

## **2.2. Hierro fundido**

Los hierros fundidos, como los aceros, son básicamente aleaciones de hierro y carbono. En relación con el diagrama hierro-carburo de hierro, los hierros fundidos contienen más cantidad de carbono que la necesaria para saturar austenita a la temperatura eutéctica; por tanto, contienen entre 2 y 6,67 por ciento de carbono. Como el alto contenido de carbono tiende a hacer muy frágil al hierro fundido, la mayoría de los tipos manufacturados comercialmente están en el intervalo de 2,5 a 4 por ciento de carbono.

La ductilidad del hierro fundido es muy baja y este no puede laminarse, estirarse o trabajarse a temperatura ambiente. La mayoría de los hierros fundidos no son maleables a cualquier temperatura; sin embargo, a veces funden fácilmente a pueden fundirse en formas complicadas que generalmente se maquinan a dimensiones finales. Como la fundición de piezas es el único proceso aplicado a estas aleaciones, se conocen como hierros fundidos.

Aunque los hierros fundidos comunes son frágiles y tienen más bajas propiedades de resistencia que la mayoría de los aceros, son baratos, pueden fundirse, más fácilmente que el acero y tienen otras propiedades útiles. Además, mediante una aleación apropiada, buen control de la fundición y un tratamiento térmico adecuado, las propiedades de cualquier hierro fundido pueden disminuirse considerablemente. Los significativos desarrollos en el control de la fundición han dado lugar a la producción de grandes tonelajes de hierros fundidos, cuyas propiedades suelen ser consistentes.

### **2.2.1. Tipos de hierro fundido**

El mejor método para clasificar el hierro fundido es de acuerdo con su estructura metalográfica. Las variantes a considerar que dan lugar a diferentes tipos de hierro fundido son; el contenido de carbono, el contenido de aleación y de impurezas, la rapidez de enfriamiento durante o después del congelamiento y el tratamiento térmico después de fundirse. Estas variables controlan la condición del carbono y también su forma física.

El carbono puede estar combinado en forma de carburo de hierro en la cementita, o existir como carbono sin combinar (o libre) en forma de grafito. La forma y distribución de las partículas de carbono sin combinar influirá grandemente en las propiedades físicas del hierro fundido. Los tipos de hierro fundido se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Hierros fundidos blancos, en los cuales todo el carbono está en la forma combinada como cementita.
- Hierros fundidos maleables, en los cuales la mayoría o todo el carbono esta sin combinar en la forma de partículas redondas irregulares, conocida como carbono revenido, el cual se obtiene mediante tratamiento térmico del hierro fundido blanco.
- Hierros fundidos grises, en los cuales la mayoría o todo el carbono esta sin combinar en la forma de escamas de grafito.
- Hierros fundidos enfriado rápidamente, en los cuales una capa superficial de hierro fundido blanco esta combinada con una interior de hierro gris.

- Hierros fundidos nodulares, en los cuales, mediante adiciones de aleaciones especiales, el carbono esta grandemente sin combinar en forma de esferoides compactas. Esta estructura difiere del hierro maleable en que se obtiene directamente desde la solidificación y las partículas de carbono redondas son de forma regular.
- Hierro fundidos aleados, en los cuales las propiedades o la estructura de cualquiera de los tipos mencionados se modifican mediante la adición de elementos de aleación.

### **2.2.2. Hierro fundido blanco**

Los cambios que tienen lugar en este hierro durante la solidificación y el enfriamientos subsecuente son determinados por el diagrama hierro carburo de hierro. Todos los hierros fundidos blancos son aleaciones hipoeutéticas y ahora se describirá el enfriamiento de una aleación al 2,50 por ciento de carbono.

La cementita, es un compuesto intersticial dura y frágil, es por eso que el hierro fundido blanco contiene una cantidad de cementita relativamente grande como una red interdendrítica continua, hace al hierro fundido duro y resistente al desgaste, pero extremadamente frágil y difícil de maquinar.

Los hierros fundidos completamente blancos tienen pocas aplicaciones en ingeniería debido a esta fragilidad y falta de maquinabilidad; más bien, se utilizan en casos en que la resistencia al desgaste es lo más importante y el servicio no requieren ductilidad, como camisas para mezcladoras de cemento, bolas de trituración para acería, ciertos tipos de dado para estiramiento, y boquillas de extrusión.

Un gran tonelaje de hierro fundido blanco se emplea como material de inicio para manufacturas de hierro fundido maleable. El intervalo de propiedades mecánicas para hierros blancos no aleados es como sigue: dureza brinell 375 a 600; resistencia tensil, 20 000 a 70 000 libras por pulgada cuadrada, resistencia compresiva 200 000 a 250 000 libras por pulgada cuadrada, y módulo de elasticidad, de 24 a 28 millones libras por pulgada cuadrada.

### **2.2.3. Hierro fundido maleable**

El propósito de la maleabilización es convertir todo el carbono combinado presente en el hierro blanco en nódulos irregulares de carbono revenido (grafito), y ferrita. Comercialmente, este proceso se efectúa en dos etapas conocidas como la primera y la segunda etapa del recocido.

En la primera etapa del recocido, la fundición del hierro blanco, se recalienta lentamente a una temperatura entre 1 650 y 1 750 grados Fahrenheit. Durante el calentamiento la perlita se convierte en austenita en la línea inferior crítica, la austenita así formada disuelve alguna cementita adicional conforme se calienta a la temperatura de recocido. Después de la primera etapa de recocido, las piezas fundidas se enfrían tan rápido como sea practico hasta unos 1 400 grados Fahrenheit, en preparación para la segunda etapa del tratamiento de recocido, este ciclo de enfriamiento generalmente requiere de 2 a 6 horas, dependiendo del equipo utilizado.

La segunda etapa del recocido, las piezas fundidas se enfrían lentamente a una rapidez de 5 a 15 grados Fahrenheit por hora, a través del intervalo crítico en la cual tendría lugar la reacción eutectoide durante el lento enfriamiento, el carbono disuelto en la austenita se convierte en grafito en las

partículas de carbono revenido existente, y la austenita restante se transforme en ferrita.

#### **2.2.4. Hierro perlítico maleable**

Si una cantidad controlada de carbono en el orden de 0,3 a 0,9 por ciento, se retiene como carburo de hierro finalmente distribuido, resulta un conjunto totalmente distinto de propiedades mecánicas. La resistencia y la dureza de las piezas fundidas se incrementarán sobre el hierro ferrítico maleable por una cantidad proporcional a la cantidad de carbono combinado restante en el producto terminado.

La etapa de grafitación es un requisito previo para todos los métodos de manufactura de piezas fundidas de hierro maleable. Si se agrega manganeso, se puede mantener el ciclo regular para retener carbono combinado por toda la matriz, o la segunda etapa de recocido del proceso normal puede remplazarse por un temple, generalmente aire, el cual enfría las piezas fundidas a través del intervalo eutectoide lo suficientemente rápido para retener carbono combinado por toda la matriz. Es práctica común revenir la mayoría de los hierros perlíticos maleables después del enfriamiento por aire.

#### **2.2.5. Hierro fundido gris**

Este grupo constituye una de las aleaciones de hierro más ampliamente utilizadas.

En la manufactura de hierros fundidos grises, la tendencia de la cementita a separarse en grafito y austenita o ferrita es favorecida controlando la composición de aleación y las rapidezces de enfriamiento.

La mayoría de los hierros fundidos grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2,5 y 4 por ciento de carbono.

Estas aleaciones solidifican formando primero austenita primaria. La apariencia inicial de carbono combinado está en la cementita que resulta de la reacción eutéctica a 2 065 grados Fahrenheit. El proceso de grafitación es ayudado por el alto contenido de carbono, alta temperatura y la adecuada cantidad de elementos de grafitación, sobre todo el silicio.

Se ha demostrado experimentalmente que, con el adecuado control de los factores mencionados, la aleación seguirá el diagrama de equilibrio estable hierro-grafito, formando austenita y grafito a la temperatura eutéctica de 2 075 grados Fahrenheit. En cualquier caso, cualquier cementita que se forme se grafitizará con rapidez. El grafito aparece como muchas placas irregulares, generalmente alargadas y curvas, las cuales dan al hierro fundido gris su característica fractura de color grisáceo o negruzco. Se debe destacar que mientras la microestructura representa su apariencia sobre una superficie plana, las hojuelas son partículas tridimensionales; en efecto son placas curvas algunas veces enlazadas y pueden representarse por modelos espaciales.

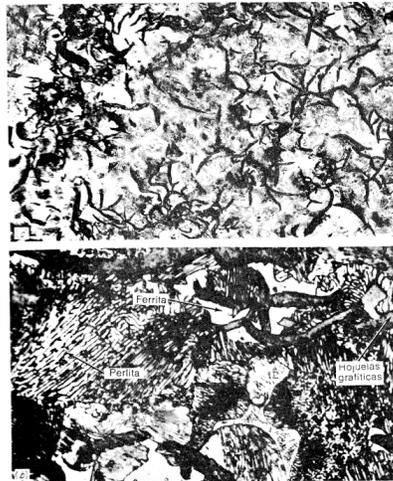
Durante el enfriamiento continuado, hay precipitación adicional de carbono debido al decremento en solubilidad de carbono en austenita, el cual se precipita como grafito o como cementita proeutectoide que grafitiza rápidamente.

La resistencia del hierro fundido gris depende casi por completo de la matriz en que esta incrustado el grafito, la cual es determinada por la condición de la cementita eutectoide.

Si la composición y rapidez de enfriamiento son tales que la cementita eutectoide también grafitiza entonces la matriz será completamente ferrítica; por otro lado, si la grafitización de la cementita eutectoide se evita, la matriz será completamente perlítica. La constitución de la matriz puede variarse desde perlítica, pasando por mezclas de perlita y ferrita en diferentes proporciones, hasta llegar a la ferrita prácticamente pura.

La mezcla grafito – ferrita es el hierro gris más suave y débil; la resistencia y la dureza aumentan al incrementarse el carbono combinado, alcanzando un máximo con el hierro perlítico gris. La siguiente figura muestra la microestructura del hierro fundido gris con la matriz por entero perlítica

Figura 9 **Microestructura del hierro fundido gris con la matriz por entero perlítica**



Fuente: Introducción a la metalurgia física. p. 432.

### **2.2.5.1. Silicio en el hierro fundido**

El silicio es muy importante en la metalurgia del hierro gris; incrementa la fluidez y tiene efecto sobre la solidificación de aleación fundida. La composición eutéctica se mueve a la izquierda (aproximadamente 0,30 por ciento de carbono por cada 1 por ciento de silicio), lo cual abate efectivamente la temperatura a la cual la aleación empieza a solidificar. Conforme aumenta el contenido de silicio, disminuye el área de campo de austenita, el contenido de carbono eutectoide decrece y la transformación eutectoide ocurre sobre un intervalo que se amplía.

El silicio es un grafitizador y si no está contrabalanceado por los elementos de promoción de carburos, favorece la solidificación de acuerdo con el sistema estable hierro – grafito. Por ende, durante la solidificación en presencia de silicio, el carbono se precipita como grafito primario en forma de hojuelas. Una vez que se ha constituido el grafito primario, su forma no puede alterarse por ningún método. Estas débiles hojuelas de grafito rompen la continuidad de la matriz y el efecto de muesca (concentración de esfuerzo), lo cual explica la baja resistencia y la poca ductilidad del hierro gris.

La máxima resistencia tensil se obtiene con 2,75 por ciento de carbono y 1,75 por ciento de silicio. Estos porcentajes darán como resultado un hierro fundido perlítico gris. Si los porcentajes de carbono y silicio son tales que pudieran formar un hierro fundido blanco o un hierro perlítico gris, la resistencia tensil será baja. Se requiere un cuidadoso control del contenido de silicio y de la rapidez de enfriamiento para grafitizar la cementita eutéctica y proeutectoide, pero no la cementita eutectoide, a fin de terminar con un hierro perlítico gris de alta resistencia

### **2.2.5.2. Azufre en hierro fundido**

La mayoría de los hierros grises comerciales contienen entre 0,06 y 0,12 por ciento de azufre. El efecto del azufre sobre la forma de carbono es el contrario del silicio. A mayor contenido de azufre, mayor será la cantidad de carbono combinado, tendiendo de esta manera a producir un hierro blanco duro y frágil.

A parte de producir carbón combinado, el azufre tiende a reaccionar con el hierro para formar sulfuro de hierro (FeS). Este compuesto de baja fusión presenta delgadas capas interdendríticas y aumenta la posibilidad que haya fisuras a altas temperaturas (fragilidad al rojo). El azufre en grandes cantidades tiende a reducir la fluidez y suele causar cavidades (aire atrapado), en las piezas fundidas.

Afortunadamente, el manganeso tiene mayor afinidad para el azufre que el hierro, formando sulfuro de manganeso (MnS). Las partículas de sulfuro de manganeso aparecen como pequeñas inclusiones ampliamente dispersadas, las cuales no perjudican las propiedades de la fundición. Es práctica común utilizar manganeso que contenga dos a tres veces su contenido de azufre.

### **2.2.5.3. Manganeso en el hierro fundido**

El manganeso es un estabilizador de carburo que tiende a incrementar la cantidad de carbono combinado, pero es mucho menos potente que el azufre. Si el manganeso está presente en la cantidad correcta para formar sulfuro de manganeso, su efecto será reducir la proporción de carbono combinado eliminando el efecto del azufre.

El exceso de manganeso tiene poco efecto en la solidificación y solo retarda débilmente la grafitación eutectoide, el manganeso es un fuerte estabilizador de carburo.

#### **2.2.5.4. Fósforo en el hierro fundido**

La mayoría de los hierros grises contienen entre 0,10 y 0,90 por ciento de fósforo originario del mineral de hierro. La mayor parte del fósforo se combina con el hierro para formar fósforo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ), el cual constituye un eutéctico ternario con la cementita y la austenita (perlita a temperatura ambiente). El eutéctico primario se conoce como esteadita y es una característica normal en la microestructura de los hierros fundidos. La esteadita es relativamente frágil y con alto contenido de fósforo, en tanto que las áreas de esteadita tienden a formar una red continua, delineando las dendritas primarias de austenita.

La condición reduce la tenacidad y hace frágil al hierro fundido de manera que el contenido de fósforo debe controlarse cuidadosamente para obtener propiedades mecánicas óptimas.

El fósforo incrementa la fluidez y amplía el intervalo de congelamiento eutéctico, incrementando así la grafitación primaria cuando el contenido de silicio es alto y el de fósforo bajo; por ende, es útil en piezas fundidas muy delgadas en las que un hierro menos fluido puede no tomar una impresión perfecta del molde.

Si los contenidos de silicio, azufre, manganeso y fósforo se controlan a niveles adecuados, la única variable remanente que afecta la resistencia de un hierro perlítico gris es la hojuela de grafito. Como el grafito es extremadamente suave y débil, su forma, tamaño y distribución determinarán las propiedades

mecánicas del hierro fundido. La reducción del tamaño y distribución de las hojuelas de grafito y el incremento en su distribución han explicado la mejora en la calidad del hierro fundido gris.

#### **2.2.5.5. Tratamiento térmico del hierro gris**

La supresión de las tensiones internas es, probablemente, el tratamiento térmico que más aplica para hierros grises. El hierro gris sin tratamiento térmico posterior al fundido suele contener tensiones residuales, porque el enfriamiento avanza a diferentes rapidezces por todas las secciones de una pieza fundida. Las tensiones residuales resultantes pueden reducir la resistencia, producir deformación y, en algunos casos extremos, aun presentar fisuras.

La temperatura para la supresión de tensiones esta generalmente por debajo del intervalo de transformación de perlita a austenita. Para una máxima supresión de tensiones con mínima descomposición de carburo, es deseable un intervalo de temperatura de 1 000 a 1 050 °F. La tensión residual puede eliminarse manteniéndose durante una hora este intervalo. Cuando se requiere casi completa la liberación de esfuerzo (más e 85 por ciento), se puede emplear una temperatura mínima de 1 100 grados Fahrenheit.

El recocido del hierro gris consiste en calentarlo a una temperatura suficientemente alta para suavizarlo y mejorar así su maquinabilidad. Para la mayoría de os hierros grises se recomienda una temperatura de recocido entre 1 300 y 1 400 grados Fahrenheit. Hasta aproximadamente 1 100 grados Fahrenheit, el efecto de la temperatura sobre la estructura del hierro gris es insignificante.

Conforme la temperatura aumenta a más de 1 100 grados Fahrenheit, la rapidez a la que el carburo de hierro se descompone en ferrita más grafito aumenta marcadamente, alcanzando un máximo a unos 1 400 grados Fahrenheit para hierro no aleado o de baja aleación.

La pieza fundida debe mantenerse a temperatura que permita que el proceso de grafitación se complete. A temperaturas inferiores a 1 300 grados Fahrenheit, se requiere generalmente un tiempo de calentamiento demasiado largo.

El hierro gris se normaliza al ser tratado a una temperatura superior a la del intervalo de transformación, se mantiene a esta temperatura por un período aproximado de 1 hora por pulgada de máximo espesor de sección y se enfría en aire inmóvil a temperatura ambiente. El intervalo de temperatura para la normalización del hierro gris es aproximadamente de 1 625 a 1 700 grados Fahrenheit. La normalización puede utilizarse para mejorar las propiedades mecánicas de la condición de fundido modificadas por otro proceso de tratamiento térmico (como la grafitación o el precalentamiento y postcalentamiento, asociados con la reparación con la soldadura).

El hierro gris, como el acero, puede endurecerse cuando se enfría rápidamente o templarse desde una alta temperatura adecuada. El hierro templado puede revenirse recalentando en el intervalo desde 300 hasta 1 200 grados Fahrenheit para aumentar tenacidad y suprimir las tensiones. Por lo general, el hierro gris se endurece calentando en horno y templando desde una temperatura de 1 575 hasta 1 600 grados Fahrenheit. El medio de templado puede ser agua, aceite, sal caliente o aire, dependiendo de la composición y tamaño de la sección.

El aceite es el medio de templado más usual cuando se busca un endurecimiento profundo y completo de la pieza. El templado en agua puede ser demasiado drástico y producir fisuras y distorsión, a menos que las piezas fundidas sean de sección transversal maciza y uniforme.

El agua se emplea a menudo para templar con endurecimiento por llama o inducción en casos en que solo se endurece la superficie exterior. El hierro gris en la condición de templado es frágil.

Revenir después de templar mejora la resistencia y tenacidad, pero disminuye la dureza. Una temperatura de unos 700 grados Fahrenheit se requiere antes de que la resistencia al impacto restaure al nivel de condición de fundido. Después de revenir a 700 grados Fahrenheit para máxima tenacidad, la dureza de la matriz es como Rockwell 50. Donde no se requiere la tenacidad y es aceptable una temperatura de revenido de 300 a 500 grados Fahrenheit, la dureza de la matriz equivale a Rockwell 55 a 60.

El tratamiento térmico no se efectúa en forma comercial para aumentar la resistencia de las piezas de hierro gris, porque la resistencia del metal fundido puede incrementarse a menor costo ya sea reduciendo los contenidos de silicio y total de carbono o añadiendo elementos de aleación. El hierro gris generalmente se temple y reviene para incrementarse la resistencia al desgaste y a la abrasión, aumentando la dureza. Una estructura consistente en grafito embutido en una matriz dura martensítica es producida por tratamiento térmico, proceso que puede remplazar la superficie de hierro blanco generalmente producida por el vaciado en moldes fríos.

También puede aplicarse en casos en que no es factible utilizar “moldes fríos”, como con formas complicadas o grandes piezas fundidas. La combinación de matriz de alta dureza y grafito como un lubricante origina una superficie con buena resistencia al desgaste para algunas aplicaciones, como engranajes para implementos de granja, ruedas dentadas, camisas de cilindros para motores diesel y ejes de levas para automóviles. De este modo, el tratamiento térmico se extiende al campo de aplicación del hierro gris como un material de la ingeniería.

#### **2.2.5.6. Tamaño y distribución de las hojuelas de grafito**

Las grandes hojuelas de grafito interrumpen seriamente la continuidad de la matriz perlítica, reduciendo de esta manera la resistencia y ductilidad del hierro gris. Las pequeñas hojuelas de grafito son menos dañinas y, por tanto, generalmente se prefieren.

Los tamaños de las hojuelas de grafito generalmente se determinan por comparación de los tamaños estándar preparados conjuntamente por la AFS (American Foundrymen's Society) y la ASTM (American Society for Testing Materials). El procedimiento para preparar y medir el tamaño de las hojuelas está dado en el ASTM *Designation A247-67, 1971 Book of ASTM Standards, part 31*. La medición de las longitudes se hace de las más grandes hojuelas de grafito en una sección atacada químicamente de hierro gris a 100x, en la siguiente tabla se muestra la asignación de los números.

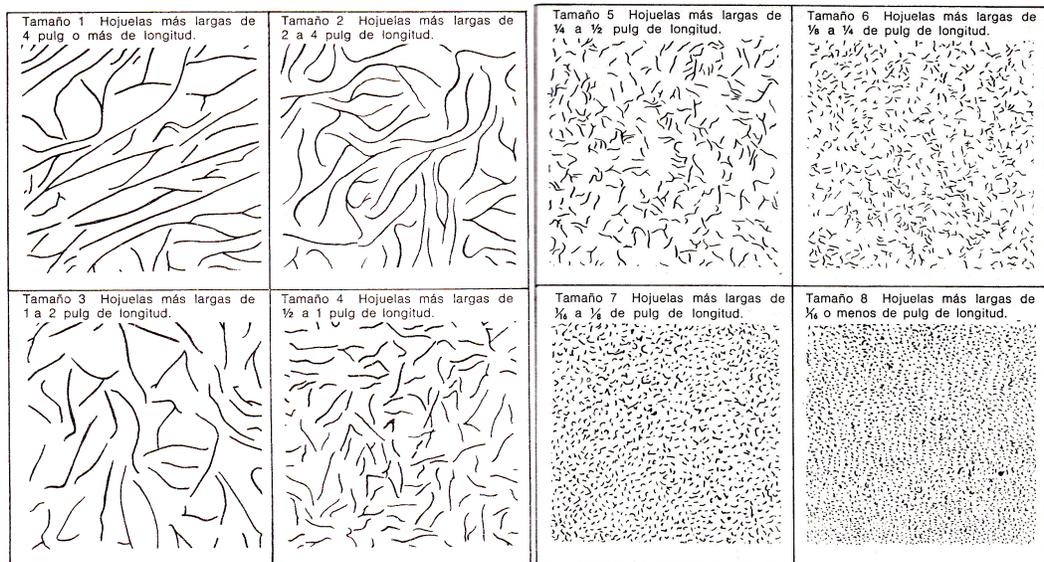
Figura 10 Tamaño de las hojuelas de grafito

NÚMERO DEL TAMAÑO DE LA HOJUELA AFS-ASTM	LONGITUD DE LAS HOJUELAS MÁS LARGAS A 100x	
	PULG	MM
1	4 o más	128
2	2-4	64
3	1-2	32
4	1/2-1	16
5	1/4-1/2	8
6	1/8-1/4	4
7	1/16- 1/8	2
8	1/16 o menos	1

Fuente: Introducción a la metalurgia física. p. 437.

La figura 11 muestra las longitudes de las hojuelas mediante campos típicos lo más cercanamente posible a los diversos tamaños.

Figura 11 Longitudes de las hojuelas de grafito



Fuente: Introducción a la metalurgia física. p. 438.

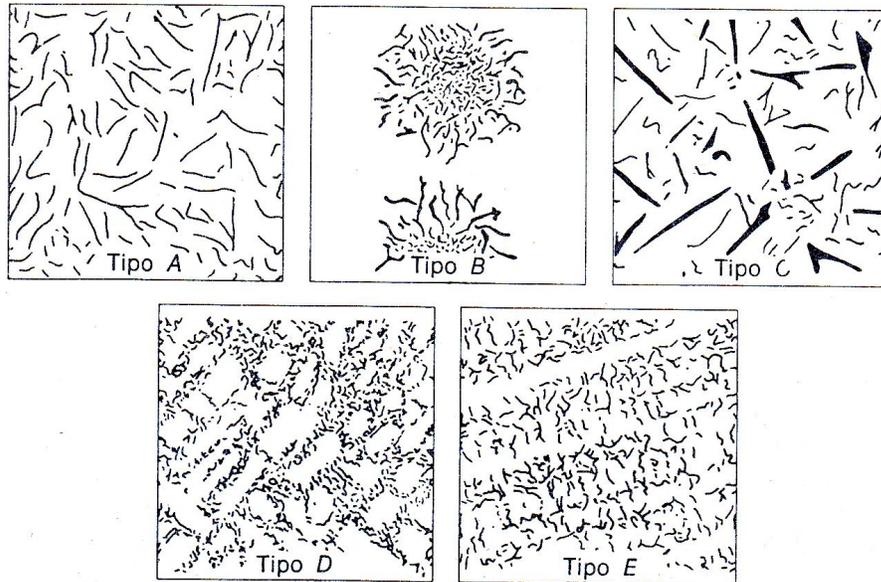
El lento enfriamiento de los hierros hipoeutéticos para favorecer la grafitación también produce grandes cristales de austenita primaria, lo cual limita la mezcla eutéctica o el grafito de las fronteras de grano y da como resultado pocas y gruesas hojuelas de grafito.

Aumentar el contenido de carbono para incrementar la cantidad de eutéctico hace que sea mayor la cantidad de grafito formado, lo cual puede debilitar el hierro fundido en mayor medida que una hojuela de menor tamaño pudiera fortalecerlo. Aumentar el contenido de silicio hace que se incremente la cantidad de eutéctico formado, reduciendo así el tamaño de la hojuela; sin embargo, como el alto contenido de silicio tiene fuerte influencia sobre la grafitación, la matriz probablemente será ferrítica y dará como resultado una pieza de fundición débil.

El mejor método para reducir el tamaño y mejorar la distribución de hojuelas de grafito parece ser mediante la adición de una cantidad de material, conocida como inoculante. Los agentes de inoculación utilizados satisfactoriamente son el calcio, aluminio, titanio, zirconio, carburo de silicio, siliciuro de calcio o combinaciones de estos. El mecanismo exacto por medio del cual operan no se ha entendido en plenitud. Probablemente causan la nucleación de austenita primaria, originando pequeños granos, lo cual reduce el tamaño y mejora la distribución de las hojuelas de grafito.

La forma en la que las hojuelas de grafito están ordenadas en la microestructura de hierro fundido gris generalmente se indica como uno o más tipos preparados conjuntamente por la AFS y la ASTM. La siguiente figura muestra los cinco tipos de hojuela.

Figura 12 Tipos de hojuelas de grafito



Fuente: Introducción a la metalurgia física. p. 440.

Los tipos de las hojuelas tipos D y E resultan de la grafitación de una estructura eutéctica normal. Tales tipos aparecen en los hierros fundidos de muy alta pureza o en hierros comerciales enfriados rápidamente durante la solidificación. Aunque el tamaño de la hojuela gráfica es pequeño, la conformación interdendrítica y el alto contenido de grafito debilitan el material; por tanto, las conformaciones de hojuelas tipos D y E son indeseables en hierros grises.

Cuando la rapidez de enfriamiento es menor, la mayoría de los hierros grises comerciales muestran una total separación del eutéctico, de manera que las hojuelas de los tipos D y E no ocurren. El tipo de hojuela mas deseable en hierro gris se representa por la distribución uniforme y orientación al azar tipo A, lo cual resulta de una estructura eutéctica completamente separada.

Como se ve inicialmente, el tamaño de las hojuelas individuales de grafito esta determinado por el de los cristales de austenita alrededor del cual se forman.

La conformación en toseta de las hojuelas de grafito del tipo B es común solo en la región intermedia de un hierro fundido vaciado en molde frío. Esta región se conoce como región manchada u consiste en una mezcla de hierro gris y blanco. La rapidez de enfriamiento en esta región es la máxima que permitiría el proceso de grafitación.

Las pocas hojuelas de grafito grandes y rectas en el tipo C siempre indican que el hierro es hipereutéctico en contenido de carbono. El silicio y otros elementos de aleación reducen el contenido de carbono del eutéctico y, si están presentes en cantidades suficientes, la composición eutéctica puede reducirse hasta menos del 3,5 por ciento de carbono.

#### **2.2.5.7. Propiedades mecánicas y aplicaciones del hierro gris**

La más importante clasificación de los hierros grises, desde el punto de vista de la ingeniería, es la utilizada en la ASTM *Specification A48*. Las piezas fundidas de hierro gris se clasifican en siete clases (números 20, 25, 30, 35, 30, 50 y 60) que dan la mínima resistencia tensil de las barras de prueba en miles de libras por pulgada cuadrada; por el ejemplo el hierro gris clase 20 tendría una resistencia tensil mínima de 20 000 libras por pulgada cuadrada; los de la clase 30; 30 000 libras por pulgada cuadrada, etc.

La resistencia tensil es importante al seleccionar un hierro gris para piezas sometidas a cargas estáticas indirectas de tensión o flexión. Tales piezas incluyen recipiente para soportar grandes presiones, cajas, válvulas, accesorios y palancas.

Los hierros superiores a 40 000 libras por pulgada cuadrada en resistencia tensil generalmente se consideran hierros de alta resistencia y son un poco más caros de producir y más difíciles de maquinar. Los hierros grises no exhiben un punto de cedencia bien definido como lo hacen la mayoría de los aceros dulces.

La curva esfuerzo-deformación no muestra una proporción rectilínea, lo cual impide determinar un modulo relativo al 25 por ciento de la resistencia tensil esperada, o el módulo tangente trazando una línea tangente a algún valor de esfuerzo dado. El porcentaje de elongación es pequeño para todos los hierros fundidos, excediendo rara vez de 3 a 4 por ciento y la reducción de área es demasiado pequeña para ser apreciable.

La dureza del hierro gris es resultado promedio del grafito suave en el hierro y la matriz metálica. La variación en tamaño y distribución de grafito causará amplias variaciones de dureza (particularmente dureza Rockwell). El medidor de dureza Brinell, que cubre un área mayor, tiende a dar un valor de dureza más preciso que el medidor de dureza Rockwell.

Debido a que el hierro gris es el tipo de pieza de fundición menos costoso, siempre debe considerarse primero cuando se va a seleccionar un metal fundido. Otro metal debe escogerse solo cuando las propiedades mecánicas y físicas del hierro gris sean inadecuadas.

Ejemplos de aplicaciones que requieren un mínimo de propiedades de piezas fundidas y el mínimo costo posible son contrapesos para elevadores y para puertas de hornos industriales. El hierro gris se utiliza ampliamente para guarniciones y marcos alrededor de maquinaria peligrosa.

Muchos tipos de cajas para engranajes, recintos para equipo eléctrico, cajas para bombas y cajas para turbinas de vapor se funden en hierro gris, debido a su bajo costo. Otras piezas fundidas de hierro gris similares se emplean en monobloques para motor, bocas de incendios y cubiertas para alcantarillas. La siguiente tabla muestra las propiedades mecánicas típicas de las barras de prueba de hierro gris estándar, en el fundido.

**Figura 13 Propiedades típicas de las barras de hierro gris**

CLASE ASTM	RESISTENCIA TENSIL, LB/PULG <sup>2</sup>	RESISTENCIA COMPRESIVA, LB/PULG <sup>2</sup>	RESISTENCIA TORCIONAL DE CORTE, LB/PULG <sup>2</sup>	MÓDULO DE ELASTICIDAD MILLONES DE LB/PULG <sup>2</sup>		LÍMITE A LA FATIGA INVERTIDA POR FLEXIÓN LB/PULG <sup>2</sup>	RESISTENCIA TRANSVERSA DE UNA BARRA DE 1.2 PULG DE DIAMETRO Y 18 PULG DE LONGITUD, LB	BHN
				TENSIÓN	TORSIÓN			
20	22 000	83 000	26 000	9.6-14.0	3.9-5.6	10 000	1 850	156
25	26 000	97 000	32 000	11.5-14.8	4.6-6.0	11 500	2 175	174
30	31 000	109 000	40 000	13.0-16.4	5.2-6.6	14 000	2 525	201
35	36 500	124 000	48 500	14.5-17.2	5.8-6.9	16 000	2 850	212
40	42 500	140 000	57 000	16.0-20.0	6.4-7.8	18 500	3 175	235
50	52 500	164 000	73 000	18.8-22.8	7.2-8.0	21 500	3 600	262
60	62 500	187 500	88 500	20.4-23.5	7.8-8.5	24 500	3 700	302

Fuente: Introducción a la metalurgia física. p. 442.

### **2.2.6. Hierro fundido moldeado en frío**

Las piezas fundidas de hierro moldeadas en frío se hacen vaciando el metal fundido contra un enfriador metálico, lo cual da como resultado una superficie de hierro fundido blanco.

Esta superficie dura o porción externa de hierro blanco resistente a la abrasión es soportada por un núcleo más suave de hierro gris. Esta estructura externa-interna se obtiene mediante un cuidadoso control de la composición aleada total y un ajuste de la rapidez de enfriamiento.

La congelación empieza primero y la rapidez de enfriamiento es mayor donde el metal fundido está en contacto con las paredes del molde. La rapidez de enfriamiento decrece conforme se aproxima el centro de la pieza fundida. Una pieza fundida de hierro con superficie de hierro blanco puede producirse ajustando la composición del hierro de manera que la rapidez normal de enfriamiento en la superficie sea apenas lo suficientemente rápida para producir hierro blanco, mientras que la rapidez de enfriamiento menor por debajo de la superficie producirá hierro manchado o gris.

La adición de manganeso disminuye la profundidad de la capa de hierro blanco hasta que el azufre ha sido neutralizado mediante la formación de sulfuro de manganeso. Por encima de esta cantidad, el manganeso incrementa la profundidad del enfriado rápido y de dureza. El fósforo disminuye la profundidad de la capa de hierro blanco. Con carbono y silicio constante, un incremento del 0,1 por ciento de fósforo disminuirá la profundidad de la capa de hierro blanco en aproximadamente 0,1 de pulgada.

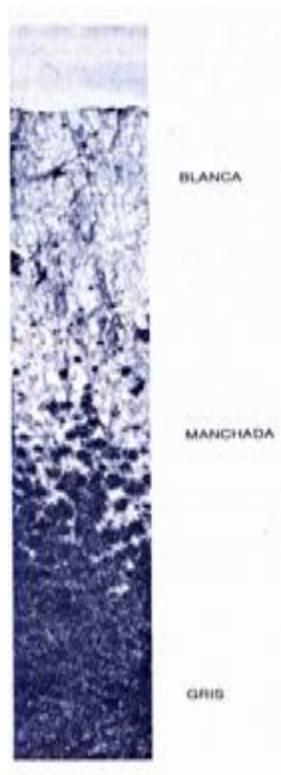
El níquel reduce la profundidad de la capa de hierro blanco y su influencia es aproximadamente la cuarta parte de la del silicio. La reducción en profundidad de enfriado rápido se acompaña por un incremento gradual en dureza hasta que el contenido alcanza el 5 por ciento aproximadamente. El níquel también refina la estructura de carburo de la capa y la estructura de hierro gris situado por debajo de la capa de hierro blanco.

El cromo se utiliza en pequeñas cantidades para controlar la profundidad de la capa de hierro blanco; 0,01 por ciento de cromo neutralizará 0,015 por ciento de silicio aproximadamente. Debido a la formación de carburo de cromo, el cromo se utiliza en cantidades de 1 a 4 por ciento en hierros moldeados en frío para aumentar la dureza y mejorar la resistencia a la abrasión.

También estabiliza el carburo y suprime la formación de grafito en grandes secciones. Cuando se añade, en cantidades de 12 a 35 por ciento, el cromo proporcionará resistencia tanto a la corrosión como a la oxidación a temperaturas elevadas.

Al añadir un 4 por ciento de cobre, disminuye la profundidad de la capa de hierro blanco; pero si excede esta cantidad, la profundidad de la capa y la dureza aumentarán. El cobre también reduce la proporción de la porción manchada a la porción de hierro blanco. El molibdeno es solo un tercio tan efectivo como el cromo, incrementando la profundidad de la capa de hierro blanco; sin embargo, mejora la resistencia de la cara recubierta en la capa de hierro blanco al agrietamiento por calor y desprendimientos de metal en capas; picaduras por ataque químico y descascaramiento. La siguiente tabla muestra la fractura de una pieza fundida de hierro moldeado en frío.

Figura 14 **Fractura de una pieza fundida de hierro moldeada en frío**



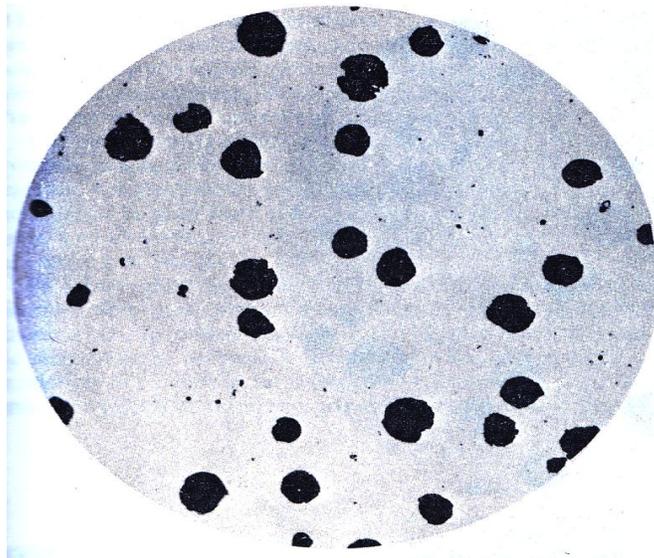
Fuente: Introducción a la metalurgia física. p. 445.

### **2.2.7. Hierro fundido nodular**

Este hierro, también conocido como hierro dúctil, hierro de grafito esferoidal o hierro esferulítico, es hierro fundido en el que el grafito, está presente como pequeñas bolas o esferoides. Las esferoides compactas interrumpen la continuidad de la matriz mucho menos que las hojuelas de grafito, lo cual da como resultado mayor resistencia y tenacidad, comparada con una estructura semejante a la del hierro gris. El hierro fundido nodular difiere del maleable en que generalmente se obtiene como resultado de la solidificación y no requiere tratamiento térmico.

Los esferoides son más redondas que los agregados irregulares de carbono revenido encontrado en el hierro maleable como se observa en la siguiente figura.

Figura 15 **Hierro nodular, sin estar atacado químicamente**



Fuente: Introducción a la metalurgia física. p. 447.

El contenido total de carbono de hierro nodular es el mismo que en el hierro fundido gris. Las partículas esferoidales de grafito se forman durante la solidificación debido a la presencia de una pequeña cantidad de ciertos elementos de aleación. La adición del elemento formado de nódulos, generalmente magnesio o cerio, se efectúa en el cucharón antes del vaciado. Como estos elementos tienen una estrecha afinidad para el azufre, el contenido de azufre de la aleación de base hierro debe ser inferior al 0,015 por ciento para que el tratamiento sea efectivo, y las aleaciones se describen como desulfurizadas.

### **2.2.8. Hierro fundido aleado**

Un hierro fundido aleado es aquel que contiene un elemento o elementos especialmente añadidos en suficiente cantidad para producir una modificación en las propiedades físicas o mecánicas que se pueden medir. Los elementos normalmente obtenidos de la materia prima, como silicio, manganeso, azufre y fósforo, no se consideran adiciones de aleación.

Los elementos de aleación se añaden al hierro fundido para fines especiales (como resistencia a la corrosión, al calor o al desgaste) y para mejorar las propiedades mecánicas. La mayoría de los elementos de aleación en el hierro fundido aceleraran o retardaran la grafitación, lo cual es una de las razones importantes para la aleación. Los elementos de aleación más comunes son el cromo, el cobre, el molibdeno, el níquel y el vanadio.

### **2.3. Moldeo**

Muy raramente las formas en que se obtienen los metales de sus menas son utilizadas directamente para fines industriales, pues, aparte sus inherentes composiciones químicas o propiedades mecánicas, los metales no tienen una forma que sea prácticamente útil.

En general, los productos metálicos obtenidos en la metalurgia extractiva se someten a determinadas operaciones de conformación, para darles forma: el moldeo, el hechurado, la pulvimetalurgia y la soldadura.

El moldeo consiste en la obtención de las piezas metálicas dentro de los moldes en lo que se vierte el metal líquido.

Los materiales metálicos que son aptos para el servicio en el estado de moldeo han de poseer ciertas propiedades que contribuyan a producir piezas buenas y sanas. Entre las propiedades favorables para ese fin se encuentran la gran fluidez, pequeña contracción y poca sensibilidad a los esfuerzos que, necesariamente, se producen en las operaciones de moldeo.

También es necesario que el material, una vez solidificado, posea una estructura conveniente que para su trabajo lo haga después con fidelidad; para la mayoría de las aleaciones no férreas, la estructura que adquiere la pieza moldeada durante la solidificación persiste después toda su vida. Desde luego, la microestructura se puede modificar por tratamiento térmico, si la aleación tiene una constitución conveniente.

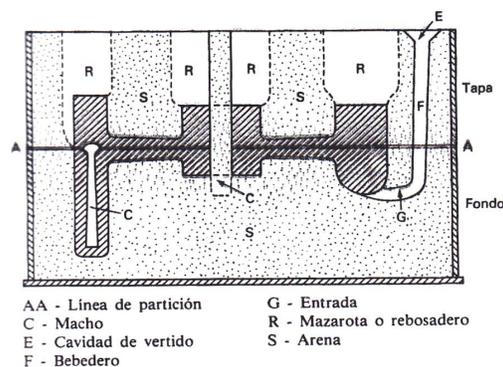
La práctica de moldeo comprende tres etapas principales: preparación del molde, fusión de los metales que integran el material o vertido del metal fundido dentro de las formas requeridas. Es evidente, pues, que la metalurgia del moldeo ha de tratar no solo del comportamiento del metal o aleación en estafo fundido, sino también de los fenómenos asociados con el paso del material de la forma líquida a la sólida.

### **2.3.1. Moldes**

Las piezas moldeadas se hacen vertiendo el metal líquido en un molde y dejándolo solidificar. La mayoría de las piezas moldeadas se hacen en moldes formados con arena seca o verde, consolidada alrededor de un modelo o cuerpo sólido que reproduce la forma del objeto que se trata de moldear y que es eliminable mecánicamente o a mano. Pero como pocas piezas son bloques sólidos, la mayoría de los huecos que tienen se consiguen colocando machos con la forma del espacio deseado.

Las bocas y conductos que se dejan en el cuerpo del molde para permitir el vertido y entrada del metal se llaman bebederos, canales o surcos de colada. La entrada se puede incorporar al modelo, o bien se hace una cavidad en la arena, una vez hecho el molde. El metal se desliza horizontalmente a lo largo de los canales o surcos y entra en el molde por las bocas. Según la forma y tamaño de la pieza hay que dejar respiradores y mazarotas, o salidas para comprobar que el metal ha rellenado adecuadamente las partes más altas del molde. En la siguiente figura se presenta una pieza moldeada con el bebedero, canales, bocas, macho y mazarotas.

Figura 16 **Esquema de las partes principales de un molde**



Fuente: Metalurgia general. Tomo II, p. 895.

Los requisitos de los respiraderos son principalmente, cinco:

- Que en ella se encuentre la última porción de metal que se solidifique;
- Debe de cubrir completamente el área de moldeo que requiere alimentación;

- Debe de tener suficiente volumen para compensar la contracción metálica dentro de la pieza;
- Debe de mantenerse la fluidez del metal que pueda fluir desde esta y penetrar hasta la última cavidad de contracción; y
- Debe de establecer, efectivamente, un gradiente de temperatura pronunciado dentro del molde, de modo que la pieza solidifique en dirección hacia el respiradero.

Los respiraderos son de dos tipos: abiertos y ciegos. Los primeros están abiertos a la superficie, y los segundos rodeados completamente por el molde, excepto un respiradero que pueda haber desde ella a la superficie del molde. En la producción de las piezas moldeadas de acero, ahora, se emplean mucho más que antes los respiraderos ciegos, sobre pequeñas piezas moldeadas, en posiciones que normalmente se considerarían aptas para los respiraderos abiertos.

No todas las piezas se hacen en arena, pues cada año se fabrican más toneladas de piezas tubulares por el procedimiento de centrifugación. Asimismo aumenta el moldeo a presión, el moldeo en cáscara, el moldeo en cáscara, el moldeo a la cera pérdida y el moldeo en coquilla.

#### **2.3.1.1. Contracción y gases en las piezas moldeadas**

Para evitar las cavidades al contraerse el metal en la pieza moldeada, es necesario que el respiradero solidifique al final y que haya canales de flujo desde el metal fundido del respiradero a todas las partes de la pieza que solidifica, lo que permite obtener piezas sanas.

Otra causa de porosidad en las piezas moldeadas son los gases retenidos. Las cavidades gaseosas se pueden distinguir de las cavidades de contracción por la forma esférica de aquellas.

Los gases pueden proceder de la humedad o de otras sustancias en el metal; el vapor de agua de la atmosfera, gases o fundentes del horno; o quedar libres del metal liquido durante su enfriamiento y solidificación debido a la disminución de la solubilidad del gas disuelto; o por reacciones químicas entre los componentes del metal. El mejor ejemplo de porosidad producida por la disminución de la solubilidad es la liberación de hidrógeno en el aluminio o en el cobre, en tanto que el desprendimiento del monóxido de carbono en el acero es el mejor ejemplo conocido como reacción química.

Para la eliminación de los gases del metal fundido, antes de moldearlo, basta con poner éste en equilibrio en una atmosfera inerte que contenga una pequeña presión parcial del gas respectivo, si bien se ha de tener en cuenta que varios factores influyen para que el equilibrio se alcance lentamente: la mayoría de los metales, y muy especialmente el aluminio, forman una capa de óxido que impide la salida del gas, y aun en las mejores circunstancias, se necesita mucho tiempo para que el gas difunda hasta la superficie del metal fundido.

Estas dos dificultades se pueden vencer haciendo pasar un gas inerte a través del metal fundido que impida la formación de las películas protectoras y disminuya la necesaria difusión. Con el nitrógeno seco y otros gases se consiguen, en este sentido, buenos resultados.

### 2.3.1.2. Solidificación del metal

Por otra parte, el éxito en la obtención de piezas sanas y aptas está relacionado con el fenómeno de la solidificación de los metales. El principal factor para conseguir piezas sanas es que la solidificación se produzca hacia los respiraderos, donde puede concentrarse la contracción sin ofrecer dificultades. Por esta causa, es esencial que las piezas se proyecten de modo que no se produzca una previa solidificación lateral en las porciones de las piezas próximas a los respiraderos.

La fusión de los metales se realiza en los hornos, el líquido se vierte en las cucharas de coladas y se cuela en los moldes. La siguiente figura muestra parte de los equipos utilizados en los procesos de vaciado de metales.

Figura 17 Cucharas de colada

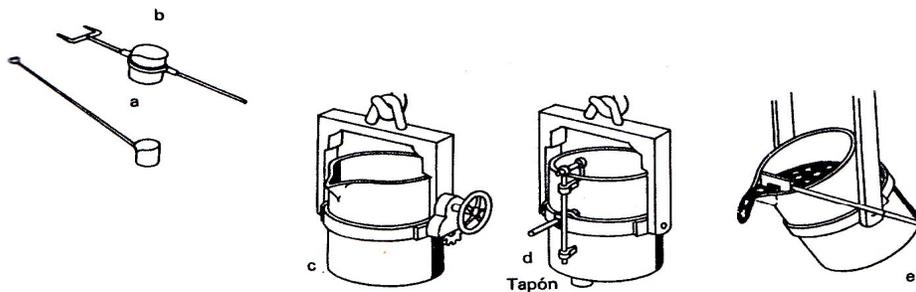


Fig. 23.2. — Cucharas de colada. *a)* Cuchara de mano; *b)* caldero manejado por dos hombres; *c)* caldero manejado con grúa; *d)* caldero de colada por el fondo; *e)* desesco-riado.

Fuente: Metalurgia general. Tomo II, p. 897.

Para asegurar la solidificación direccional, se aconseja que, en general, para el moldeo de las piezas de los metales no férreos se haga el vertido por la parte superior, situando los respiraderos cerca de las partes más gruesas de la pieza.

Se puede mejorar la llegada del metal con el empleo de respiraderos ciegos o cubriendo las entradas con arena, una vez que se han llenado con metal.

Ya se ha indicado que hay dos clases de contracción en la solidificación a partir del metal fundido hasta la temperatura ambiente. Estos cambios de dimensión durante el enfriamiento han de tenerse en cuenta en el diseño del molde y obliga a que los respiraderos tengan una sección mayor que la parte más ancha del molde, con el fin de asegurar que en las zonas donde hay contracción, el metal pueda fluir y llenar el área, pues de otro modo aparecen defectos en forma de huecos.

La solidificación ha de empezar en las partes más pequeñas y alejadas de los bebederos, y debe proceder, gradualmente, en dirección de los respiraderos. En aquellas partes, ha de encontrarse el metal mas caliente con cierta presión hidrostática para llenar los huecos que se formen durante la contracción de este. El tiempo de solidificación depende del espesor, y de la manera de realizarse la cristalización hasta tomar la forma de la pieza; el diseño se ha de elegir bien, para evitar los planos de pequeña resistencia.

Las secciones delgadas, que solidifican primero, deben encontrarse en la parte baja de la caja, en tanto que las secciones que tienen pequeña relación de área a volumen, y que, por lo tanto, solidifican con más lentitud, han de estar en la parte superior de la caja. La velocidad de la cristalización se regula mediante compensadores que aumentan el grueso de la sección en la dirección del respiradero, y la velocidad de enfriamiento se regula mediante inserciones de metal.

Los bebederos se han de construir de modo que se evite la agitación del metal introducido por ellos, para que no se formen óxido ni escorias. Asimismo se ha de evitar la turbulencia que producirá la erosión del molde. La cantidad de metal que ocupan los bebederos y respiraderos, que forman los desperdicios, varía mucho de unas aleaciones a otras, según el diseño del molde y la calidad y propiedades que se desean en la pieza moldeada.

### **2.3.1.3. Diseño de los moldes**

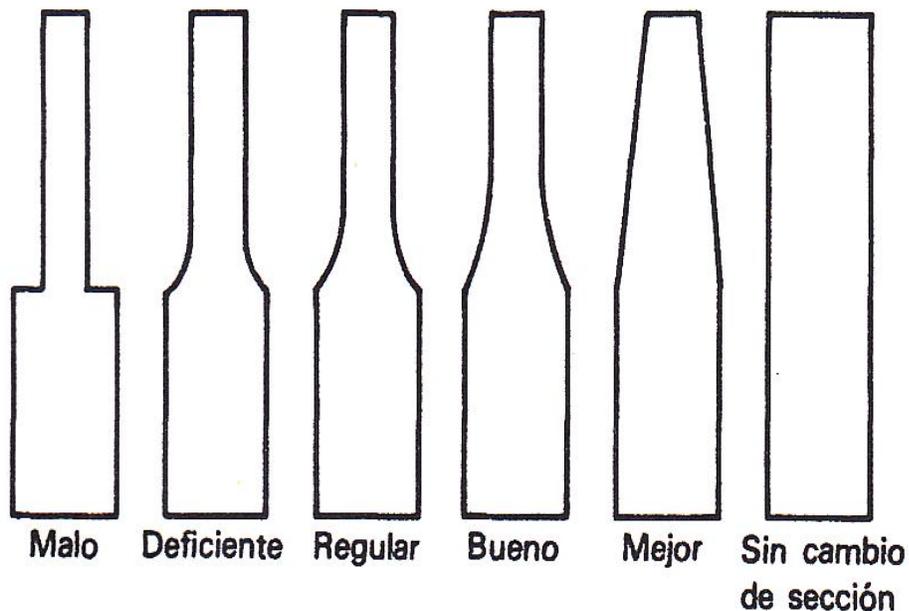
En el diseño de moldes, actualmente existen varias reglas básicas, las cuales deben de ser tomadas en cuenta, entre las principales reglas para el diseño de los moldes se tienen las siguientes:

- Para que no haya defecto en las piezas es necesario que los respiraderos abastezcan de metal fundido a la parte inferior de las mismas, por lo que debajo de aquella no puede haber una disminución de la sección.
- La sección conviene que sea lo más uniforme posible para evitar la formación de grietas en caliente.
- Se han de evitar los ángulos agudos, pues es donde se originan los lugares más calientes y los planos de debilidad.
- Se han de disminuir al máximo los lugares en que puede haber una cavidad de contracción.
- Se ha de tener en cuenta que donde se encuentran cambios de sección, cambia la velocidad del enfriamiento, y esto altera las propiedades del material.
- Se han de evitar las tensiones debidas al moldeo.
- Solo se emplean copas o cazos y compensadores, cuando son absolutamente necesarios.
- Cuando se desea la máxima eficacia, se proyectan costillas y ménsulas.

- Se ha de facilitar la contracción o cambio de dimensiones del metal debido a la solidificación.
- Se ha de tener en cuenta el material que se ha de eliminar en las operaciones posteriores: mecanizado, etc.

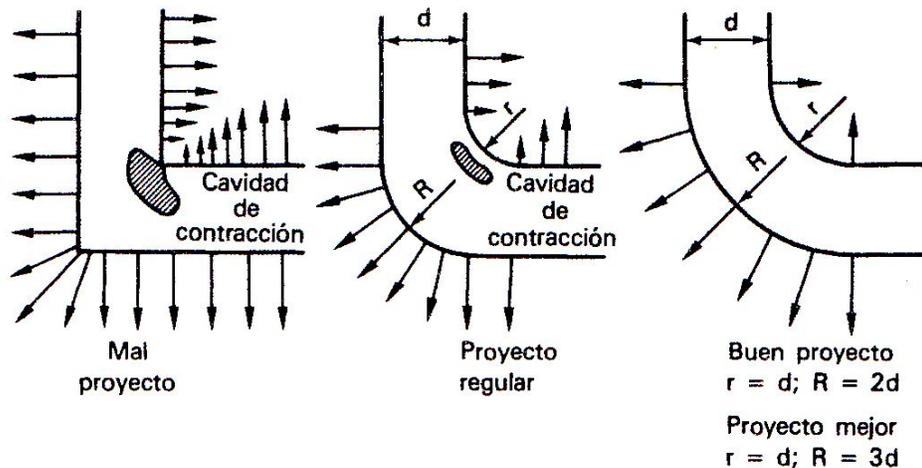
Con frecuencia, es necesario dar un tratamiento térmico a la pieza moldeada para eliminar las tensiones o para mejorar las propiedades del metal. La siguiente figura muestra la influencia de la sección en la formación de grietas en caliente.

Figura 18 **Influencia de la sección en la formación de grietas**



Fuente: Metalurgia general, Tomo II, p. 898.

Figura 19 **Coladas de un perfil en L**



Fuente: Metalurgia general. Tomo II, p. 899.

#### 2.3.1.4. Modelos

Con el empleo de los moldes no permanentes, tales como los de arena, de yeso y cemento, y el moldeo de precisión de la cera pérdida, se necesitan modelos con la forma requerida; en el último caso, el modelo se emplea una sola vez. Los modelos que se requieren para los primeros procedimientos pueden ser madera, metal, yeso o plásticos. El material más corriente es la madera, que se trabaja con facilidad. Presenta el defecto de ser muy susceptible a la influencia de la humedad. Con frecuencia se recomienda los moldes permanentes de metal (coquillas) cuando se ha de hacer gran cantidad de moldes

En el modelo de la cera pérdida se emplean varios materiales, tales como la cera o parafina, metales fusibles y hasta mercurio a temperaturas en que éste es sólido.

Los metales fusibles se utilizan cuando la técnica requiere machos complicados o es difícil extraer los modelos. El material que se ha de emplear en el modelo depende del diseño de la pieza, número de moldes que se han de hacer y métodos de fusión empleados.

Cuando los modelos se utilizan pocas veces, se emplea pino blanco, pero es preferible utilizar maderas más ásperas y que no se deformen en contacto con la humedad, tal como el roble y el nogal. Con frecuencia estos modelos de madera se refuerzan con láminas de metal en las partes donde se estropean con facilidad. En general, los modelos de madera son más baratos que los de metal, y la madera es preferible, sí el tamaño del modelo es muy grande o el diseño se ha de cambiar con frecuencia. Para la producción en cantidad, los modelos de metal son más prácticos y económicos.

Al hacer un modelo se ha de pensar en: la contracción del metal, que varía entre un 0,7 y un 2,0 por ciento el metal que se ha de eliminar por mecanizado; que quede espacio para los machos; y el despiece para poder extraer el modelo, todavía en el diseño de los modelos hay que considerar otros aspectos, según las características del metal, tales como evitar que se produzcan tensiones por contracción, que acarreen la rotura, y que el metal fundido tenga fácil acceso a todo el molde, con el fin de que este se llene bien. Con frecuencia en los modelos de madera las partes de la pieza se pintan con colores diferentes para que sirvan de guía respecto a los requisitos de la pieza moldeada.

Los modelos con yeso o de cemento se están extendiendo debido a sus características, dilatación regulada y gran resistencia a la compresión. Ello permite contrarrestar la contracción del metal.

Se han conseguido cementos de yeso mezclados con fibras o metales, con una resistencia a la tracción hasta 10,5 kilogramos por milímetro cuadrado. También se utiliza yeso y cementos que mantienen la forma plástica algún tiempo antes del fraguado o endurecido.

#### **2.3.1.5. Arenas de moldeo**

Los principales requisitos de las arenas de moldeo son: carácter refractario, cohesión, porosidad y permeabilidad. La arena ha de resistir el calor del metal fundido, por cuya razón es necesario que tenga una gran proporción de sílice con un mínimo de los ingredientes que aumentan la fusibilidad, tales como ciertos óxidos metálicos. Por tanto para trabajar con metales no féreos y fundiciones ligeras se requiere una proporción de sílice próxima al 80 por ciento; para la fundición media al 85 por ciento; para la pesada al 90 por ciento, y para el acero del 90 al 93 por ciento.

Sin embargo, en el caso de las piezas moldeadas de acero, las arenas que tienen un material de unión con punto de fusión relativamente bajo, como ocurre en ciertas arcillas naturales, tienden a producir una superficie metálica mucho más limpia que las arenas muy refractarias.

Además del carácter refractario de la arena, tienen importancia la plasticidad y la cohesión lograda con el material de unión. Ciertas arenas, tales como las belgas, tienen un material de unión muy refractaria, casi igual que el de la arena, pero otras arenas contienen un material de unión mucho menos refractario.

Muchas arenas naturales presentan la propiedad de formar masas compactas, a favor de la presencia de arcilla que actúa aglutinando los granos de las mismas. El término arcilla se aplica a un particular grupo de minerales, en el que el principal constituyente es el silicato aluminico hidratado. La propiedad distintiva de la arcilla es su plasticidad, que es transmitida a la masa de la arena en presencia de la arena húmeda.

Uno de los materiales de unión mas universalmente empleado en el moldeo del acero es la bentonita, que es una sustancia análoga a la arcilla, formada por la acción de los agentes atmosféricos sobre las cenizas volcánicas y compuesta de minerales de la familia de la montmorillonita  $\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Al}_4(\text{OH})_4 - n\text{H}_2\text{O}$ . Existen otras arcillas aglomerantes: las halloysitas, que en vez de tener forma de escama, como ocurre, en general, con las arcillas que se emplean para esta finalidad, las partículas tienen la forma de bastoncito, estas arcillas son muy refractarias y sus propiedades de plasticidad y de contracción son medianas.

La acción aglomerante de la arena parece ser debida a que el agua que se añade a la mezcla de arena y arcilla penetra en la masa, y su acción fisicoquímica forma una capa sobre escamas de arcilla. Es interesante tener en cuenta el tipo de agua que se emplea en el moldeo, ya que las sales que contiene influyen en la propiedad del cambio de iones y en otras modificaciones que pueden producirse en las arcillas.

Para que las piezas no seas defectuosas, es necesario que el aire existente en el molde y los gases engendrados por el calor del metal salgan sin impedimento a través de las paredes de la arena. El termino porosidad se refiere al número de espacios que existen entre los granos de arena, y principalmente está regido por el tamaño y forma de estos mismos granos,

proporciones de los materiales de unión, de la humedad presente y de la densidad de la arena una vez comprimida.

La permeabilidad de la arena es notoriamente diferente de la porosidad, si bien está íntimamente relacionada con esta, y se mide por la facilidad con que escapan los gases a través de la arena. El exceso de aglutinante tiende a llenar los poros, y por tanto, disminuye la permeabilidad, aunque pueda producir una arena fuerte con buenas cualidades cohesivas.

Análogamente, si bien al aumentar la humedad se incrementan la permeabilidad de la arena, produciendo la saturación de esta, y a la vez que llena los poros tiende a desalojar al aglutinante.

El efecto del secado del molde es aumentar la permeabilidad a medida que se hacen mayores los poros, debido a la contracción de los granos de arena, particularmente en el caso de las arenas fuertemente unidas.

#### **2.3.1.6. Arenas para machos**

Las propiedades que han de tener los machos dependen del fin al que se destinan. El macho es el que da la forma a la parte interior de la pieza, por lo que ha de cumplir algunos requisitos diferentes al de la parte exterior. Al moldeador le interesa principalmente, la dureza, la resistencia a la compresión, ya sea en arena seca o verde, la permeabilidad, homogeneidad de la superficie, carácter refractario, capacidad de unión, producción de gases y absorción de la humedad. Los machos han de mantener su forma hasta que el metal se solidifica; el macho ideal es el que se desmorona y pasa a la masa de arena una vez que ha solidificado el metal.

Si la consistencia del macho es mayor que la necesaria, será difícil extraer esta arena del interior de la pieza moldeada. La mezcla de arena para hacer estos machos consta de dos partes: arena rica en sílice con poca o nada de la arcilla aglomerante, y un aglutinante. Para la elección de la arena para machos, la composición química no es lo más importante; interesa más el examen mineralógico. Debido a que es deseable un elevado por ciento de cuarzo, para que el macho no se deshaga cuando sufra la acción del calor.

Las arenas de moldeo para los aceros han de resistir temperaturas de colada de 1 500 a 1 650 grado Celsius y, por tanto, la arena ha de tener cualidades refractarias, y cada vez que se emplean hay que añadir un aglomerante. Con el fin de agregar aglomerante en cada operación, se utilizan dos tipos de arena: arena de revestimiento y arena de socorro.

La arena de revestimiento consta de un 50 por ciento de arena vieja y el otro 50 por ciento de arena nueva, con más proporción de aglomerantes, tal como arena refractaria o bentonita.

Las arenas gruesas se pueden apisonar más intensamente que las finas sin peligro de disminuir la permeabilidad, pues tienen poca movilidad y presentan grandes huecos entre los granos.

#### **2.3.1.7. Maquinaria para el moldeo con arena**

Se construyen máquinas que apisonan la arena, separan el molde apisonado y el modelo y realizan las dos operaciones simultáneamente. La arena no es un material que se apisona con facilidad para conseguir la forma deseada.

Sin embargo, es posible apisonar la arena de tal manera que se produzca una porción dura bien apisonada, exactamente debajo del punto de aplicación de la presión de apisonado, si bien algo distante de ese punto la arena puede ser blanda y, por tanto, no apta para resistir la fluencia y la presión del metal fundido.

Existen tres métodos principales de apisonado de la arena en el interior de las cajas de moldeo por medios mecánicos: por presión ejercida directamente sobre la arena, es decir, prensado de la arena; por percusión, y por tirado de la arena. El prensado de la arena es el primer método que se ha empleado en gran extensión, y es la característica que principalmente domina en muchos tipos de máquinas. Se puede utilizar la energía neumática o hidráulica para producir una presión uniforme sobre la superficie comprimida.

El sistema de moldeo mecánico por percusión ha revolucionado la práctica del mismo; en primer término, debido a la velocidad con que se puede realizar el apisonado, y también, porque se puede ejecutar el trabajo con un mayor rendimiento que con el moldeo por prensado.

La caja de moldeo, con el modelo y llena de arena, se coloca sobre la platina de la máquina; esta se eleva y se la deja caer repetidamente sobre el yunque de la máquina. Por sucesivos choques, la arena fluye y se introduce uniformemente en los huecos de alrededor del modelo. La densidad que se alcanza en la caja depende del número de golpes y de la longitud del trayecto recorrido por la platina.

### 2.3.1.8. Moldes de arena

Además del tamaño, entre 0,4 y 1,6 milímetros, y la uniformidad de los granos de arena, tiene una gran importancia la forma del grano, y con esta base se clasifican las arenas en cuatro grupos, según sean los granos angulares, subangulares, redondos y compuestos de varias formas de grano. Las arenas con granos angulares y subangulares son mejores para el modelo, si bien se considera aún el grano redondo como el ideal para la mayoría de las arenas de machos.

Las arenas con granos angulares hacen mejores superficies en el hueco del molde por poderse apisonar más intensamente, con el resultado de haber menos costra y puntos incisivos. Al aumentar la presión de compactación de la arena en el molde, disminuye la permeabilidad al propio tiempo que se incrementa la resistencia, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 20 Efecto de la humedad sobre la resistencia a la compresión y permeabilidad de la arena de moldeo

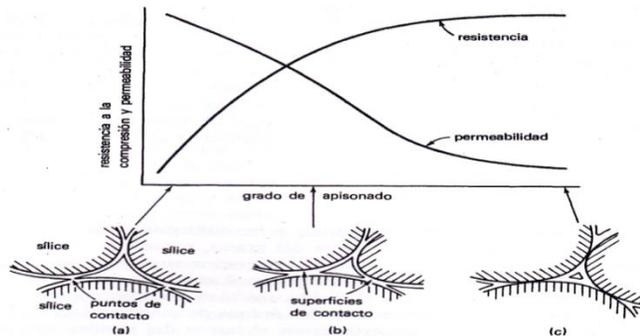


Fig. 23.7. — Efecto del apisonado sobre las arenas de moldeo: *a)* las áreas de contacto en tierras bien mezcladas y sin apisonar son relativamente pequeñas; *b)* la arena correctamente apisonada presenta mayores áreas de contacto, aun reteniendo considerables espacios intersticiales; *c)* la arena excesivamente apisonada está bien aglutinada y es resistente, pero ha perdido la permeabilidad.

Fuente: Metalurgia general. Tomo II, p. 904.

La arena ha de tener la suficiente consistencia para resistir su manejo y presiones producidas por el metal fundido. Para ayudar a la hechura del molde y a la selección y regulación de la mezcla de arena, interesa estudiar las propiedades de esta a temperaturas atmosféricas. Los moldes de arena se hacen siguiendo cuatro métodos:

- Arena seca. La arena se calienta en un horno antes de utilizarla.
- Arena que está sólo seca en la superficie, lo que se consigue pasando una llama de gas por encima de la arena después del moldeo.
- Arena secada al aire una vez acabado el molde.
- Arena verde, que es la utilizada tal como se encuentra en la naturaleza.

La arena, al ponerse en contacto con el metal, alcanza una elevada temperatura, y algunos de sus ingredientes se alteran o se destruyen, por lo que es necesario emplear cada vez arena y conglomerantes nuevos, para asegurar la adecuada resistencia de la arena de moldeo. La regulación de la arena tiene una gran importancia, pues muchos defectos de las piezas moldeadas se deben a deficiencias de la arena.

Es evidente que se pueden producir defectos en las piezas por la calidad del metal, método de moldeo o equipo empleado, pero si en la arena hay demasiada humedad, se pueden producir muchos gases por reacción del agua con el metal fundido.

Conviene proteger la superficie lisa y del macho de la acción del metal líquido, y para conseguir una superficie lisa, o para evitar adherencias de arena en la pieza moldeada, con frecuencia, el hoyo del molde se reviste con un material refractario; para este fin se emplean diferentes sustancias.

Las piezas moldeadas ligeras se espolvorean con talco o estratita, y las grandes con plumbago o grafito natural. Los moldes de arena seca se espolvorean o riegan con soluciones refractarias, que contienen harina de sílice, melaza, y agua.

El carbón bituminoso rico en carbono con poca ceniza, es una sustancia corriente para los polvos de revestimiento en el moldeo de los metales ferrosos: disminuye la adherencia de la arena en la pieza moldeada y con frecuencia deja una superficie lisa.

Las arenas de moldear para la fundición gris y maleable deberán de tener un índice de permeabilidad de 20 a 200 para las arenas más gruesas y la resistencia a la compresión deberá estar entre 2-8 gramos por milímetro cuadrado, estos materiales se cuejan entre 1 350 y 155 grados Celsius.

#### **2.3.1.9. Llenado del molde**

El método de introducir el metal fundido en el molde es de la mayor importancia; su propósito debe ser llenar el molde de modo que el metal más frío se sitúe en las partes alejadas de la mazarota, en tanto que el más caliente lo haga en las cavidades de la misma, con el fin de favorecer la solidificación hacia la mazarota.

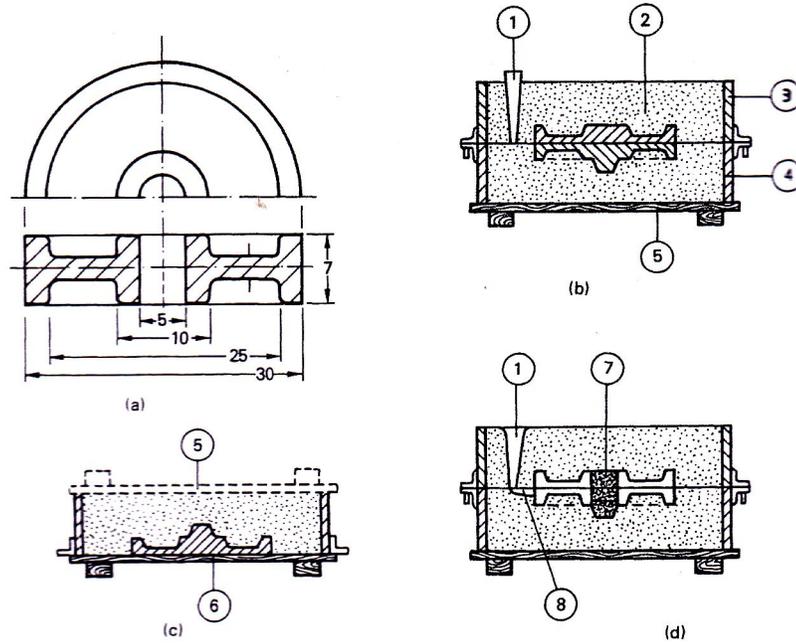
Sin embargo, con frecuencia es necesario introducir el metal en las partes más bajas del molde para evitar la turbulencia en su cavidad con la consiguiente formación de escorias que podían quedar atrapadas en la pieza, si bien estos efectos perjudiciales se corrigen de varias maneras.

En conclusión, lo que se persigue con el vertido del metal dentro del molde es: llenar completamente la cavidad del molde, evitar el deterioro del molde por el metal líquido y establecer gradientes de temperatura convenientes dentro del molde, de tal modo que las entradas no originen cavidades de contracción en las piezas. Para conseguir estos propósitos se ha de regular:

- El método de llenado, es decir, la manera de transferir el metal líquido desde el cucharón al molde.
- El tipo de conducto que regula la actuación de las entradas o bocas que dejan pasar el metal a la cavidad principal del molde.
- La posición, dimensiones y número de las bocas que dan entrada a la cavidad principal del molde.
- La velocidad de vertido.
- La posición del molde durante el moldeo.
- La temperatura y fluidez del metal.

El sistema de entradas al molde, además de permitir el llenado de este con metal, actúa como un sistema de ventilación para la eliminación de los gases que se desprenden del molde, y como elevador o cabeza de alimentación para proporcionar el metal líquido a la cavidad que se ha de llenar, con el fin de compensar las disminuciones de volumen, debidas a la contracción del líquido y la solidificación. En la siguiente figura se pone de manifiesto las características de un molde de arena para lingotes o engranajes.

Figura 21 Molde para un engranaje



a) Modelo (en cm).

b) Caja inferior.

1. Bebedero.
2. Capa.
3. Escuadra superior.
4. Caja inferior.
5. Placa de fondo.

c) Caja superior.

5. Placa de fondo.
6. Falso fondo.

d) Molde listo.

1. Bebedero.
7. Macho.
8. Canal.

Fuente: Metalurgia general. Tomo II, p. 912.

### 2.3.1.10. Moldeo con yeso y con cemento

El moldeo con yeso o cemento sigue las mismas reglas que el moldeo en arena, y la única diferencia radica en el material que se emplea para hacer el molde. En vez de emplear arena se hace uso de yeso o un cemento que resiste bien las temperaturas elevadas; el material, una vez seco y cocido, tiene la suficiente permeabilidad para permitir el escape de los gases y aire del molde. Debido a que estos materiales tienen grafito fino, las piezas moldeadas se pueden hacer bien reguladas y con una superficie muy fina.

El empleo de yeso y cemento se limita a los metales que funden por debajo de 1 150 grados Celsius, con excepción del manganeso; pero por modificación del procedimiento se ha conseguido moldear el acero inoxidable, a 1 650 grados Celsius. Los metales que más corrientemente se moldean por este método son los latones amarillos (latón de marina y el muntz), bronce de aluminio ricos en hierro, bronce de manganeso y silicio y en ocasiones, el aluminio. Aplicaciones típicas son los artículos de plomería, material, mangos terminales, etc.

### **2.3.2. Moldeo de precisión a la cera pérdida**

El moldeo de estatuas, de piezas de joyería y de odontología es difícil por los problemas que presenta la disposición de los machos. Para evitar el empleo de estos, se utilizan técnicas especiales de moldeo y materiales que funden a la temperatura de cocido de las arenas de moldeo o los moldes de yeso. Para construir una estatua, lo primero que hay que hacer es un molde de yeso del modelo original del artista, este molde, dividido en dos partes, se cierra y llena con cera, y después de unos segundos se invierte para dejar salir la cera que no ha solidificado.

La ventaja fundamental de este procedimiento es que permite una exactitud de dimensiones imposible de conseguir por otros métodos. Si se tiene cuidado de controlar las numerosas variables determinantes, se consiguen piezas con tolerancias dimensionales muy estrechas y un acabado superficial excelente. Se puede lograr una pieza con dimensiones ajustadas en +/- 0,002 milésimas por milímetro, aunque ello quiere extremo cuidado en todo el proceso de moldeo.

### **2.3.2.1. Moldeo por revestimiento**

Una modificación del procedimiento de la cera perdida se práctica para obtener de modo directo moldes exactos para fines industriales, a partir de un modelo principal. Se da este procedimiento a los procedimientos que comprenden un modelo fungible (que desaparece por fusión) que se reviste con una especie de masilla fina refractaria que lleva aglutinantes adecuados. Sin embargo los métodos empleados ahora para el moldeo del acero representan un grave avance con respecto al procedimiento básico.

Este método ofrece unas posibilidades que no tienen los otros métodos, y además se obtienen superficies lisas excelentes, con tolerancias de un 50 por ciento menor que las conseguidas con el método de la cera perdida. En cambio, el costo y sobre todo la mano de obra, es mayor en este método que en los otros. Debido a la posible toxicidad del ambiente por el mercurio, este procedimiento no se utiliza.

### **2.3.3. Moldeo en cáscara o casquete**

Este procedimiento es un excelente medio para lograr buenas tolerancias y piezas de moldeo fino. En los Estados Unidos es conocido actualmente como moldeo por casquete, moldeo en cascara y también, simplemente como procedimiento "C", el cual se separa completamente de la técnica normal de moldeo. Se utilizan para el moldeo placas metálicas calientes, montadas con las superficies hacia arriba en una caja de moldeo, en la que se introduce una material para el molde.

Dado que el molde no contiene humedad, no se produce el enfriamiento del metal fluido por el cambio de agua a vapor, lo que hace que la superficie sea más fina y lisa, permitiendo una reproducción más fiel de los detalles.

Las ventajas de esta técnica son:

- Sirve para moldear piezas de los metales férreos y no férreos y aleaciones ligeras
- Ofrece una buena superficie de moldeo
- Se pueden hacer piezas muy delgadas
- Se maneja menos arena, etc.
- Se puede emplear la mano de obra corriente
- No se requiere largas permanencias para la estabilización
- La misma mezcla se emplea para los molde y machos
- Los moldes se pueden almacenar hasta que se necesitan

#### **2.3.4. Moldeo en coquillas**

Estos moldes se hacen de metal y se practican con este tipo de moldeo varias técnicas. Con esta clase de molde se puede hacer un gran número de piezas moldeadas, pues aun cuando el molde puede deteriorarse por contacto con el metal fundido, no es necesario construir uno nuevo para cada pieza que se moldea, como ocurre en el moldeo en arena u en otros procedimientos.

El método más sencillo consiste en disponer de un molde metálico en dos partes, que se ajustan por medio de una grapa o pinza; el metal fundido se vierte en la parte superior y el molde se llena por acción de la gravedad, siendo la presión algo superior a la atmosférica, debida al metal que se encuentra en el bebedero.

Una vez frío el metal introducido, se abre el molde y se extrae la pieza moldeada, si bien en ocasiones se requiere emplear cierto orificio para poder hacer bien la operación.

La vida del molde depende de las características del metal fundido, diseño y construcción del molde y diseño de la pieza a moldear. Generalmente, se pueden hacer unas 15000 piezas de fundición gris y unas 10000 de aluminio en un molde de fundición solo con pocas reparaciones.

### **2.3.5. Moldeo a presión o por inyección**

Además de los procedimientos basados en introducir el metal por acción de gravedad, los moldes permanentes se pueden modificar de modo que sobre el metal, se ejerza una cierta presión para lograr que la pieza moldeada tenga menos defectos. El molde metálico o la matriz constan, al menos, de dos partes o bloques de acero especial, cada uno con una cavidad que están unidas durante el moldeo y que se separan en cuanto se está en condiciones de extraer la pieza moldeada.

### **2.3.6. Moldeo por centrifugación**

Aunque no existe un método ideal para la producción de piezas moldeadas, dos de los procedimientos se aproximan a los requisitos requeridos: el moldeo por centrifugación y el de vertido continuo, conocido como el moldeo continuo. La técnica del moldeo por centrifugación se puede empezar para la producción de formas sencillas, tales como discos y tubos, o para la producción de las formas más complicadas moldeadas en arena, mientras que el moldeo continuo se limita a la producción de lingotes y latones, y especialmente en el campo de los metales no férreos encuentra gran aplicación con esta finalidad.

El procedimiento de moldeo por centrifugación está basado en la aplicación de una fuerza centrífuga para la alimentación del metal durante la solidificación, y en ciertos casos para favorecer la expulsión de los gases disueltos y otras impurezas indeseables, tal como la escoria.

En el moldeo centrífugo se emplean moldes de arena, yeso, cemento, carbón o acero y se obtienen piezas de muy diversas aleaciones. No se necesitan machos y la parte interior de la pieza moldeada exige el mecanizado para eliminar la escoria y la porción impurificada del metal moldeado.

Este método tiene las desventajas de la alimentación del tamaño y formas adaptables a él y el costo de la instalación y mantenimiento de las máquinas centrífugas.

### **2.3.7. Colada continua**

Este método de moldeo ha adquirido una gran importancia, tanto para los metales férreos como para los no férreos. Con el fin de obtener formas especiales se han realizado ensayos en los que se inclina el eje de giro y también se hace que el molde gire simultáneamente sobre dos ejes. Lo que se persigue con la colada continua es aprovechar el calor retenido por los metales, después de que han pasado por el molde, que representa un gran número de calorías y laminarlos en caliente.

La colada continua consiste en verter, regularmente, el acero, fundido en un horno eléctrico, en un cucharón transportador que asciende hasta la parte superior de una torre de unos veintidós metros.

Allí el acero se pasa al cucharón de vertido que se mantiene caliente por inducción. El acero se vierte en un molde vertical, largo, que se enfría con agua. Poco después solidifica la superficie, el acero se contrae y separa del molde.

### **2.3.8. Galvanoplastia o electroconformación**

La electroconformación o galvanoplastia es la producción o reproducción de objetos mediante depósitos electrolíticos. Sus más importantes aplicaciones son el electrocopiado y los métodos similares para la fabricación de placas de impresión, la producción de matrices fonográficas, de hojas, de tubos y de artículos de formas diversas (moldes para vidrio, cerámica, jabón, cera, bombones, etc.) mediante depósitos electrolíticos. Una característica esencial de la galvanoplastia es que implica la separación del depósito de la forma que les sirvió de base y sobre la que se moldearon.

### **2.3.9. Nuevas técnicas de moldeo**

Unos metales se adaptan más al moldeo por un cierto procedimiento que por otro, tanto por la economía en la mano de obra como en la calidad y en el número de piezas que se obtienen. En las siguientes figuras, se establecen comparaciones de algunos procedimientos de moldeo con diversos metales y se destacan las posibilidades industriales actuales de los principales procedimientos de moldeo.

Los principales avances experimentados últimamente en la tecnología del moldeo derivan de la aplicación del vacío y de las atmósferas controladas, en dicho procedimiento de conformación metálica.

Figura 22 Características relativas de algunos metales de moldeo, numerados por orden de preferencia

PROCEDIMIENTO DE MOLDEO	PRESIÓN EXTERNA					
	ARENA	ESCAVOLA	MOLDE PERMANENTE	MATRIZ	CÁMARA FRÍA	CENTRÍFUGO (EN MOLDES METÁLICOS)
Materiales convenientes para el procedimiento en cuestión	Todos los metales moldeables	Latón amarillo, bronce, Zn, Pb, Sn	Todas aleaciones, bronce, hierro, Zn + Pb	Aleaciones de Zn con Al, aleaciones de Al, Pb + Sn	Aleaciones de Al latón, bronce, aleaciones de Mg, aleac. de Zn (no Al)	Todas las aleaciones, latón, bronce, monel, hierro y acero
Porosidad .....	6	2	1	5	4	2
Homogeneidad de la superficie .....	6	1	1	2	3	2
Detalle del contorno; tolerancia de dimensiones	6	1	1	3	2	1
Resistencia mecánica (metal sólido) .....	5	6	3	2	1	2
Espesor de sección .....	5	1	4	3	2	6 (al estado moldeado)
Coste total .....	1	3	4	5	6	2
Velocidad de producción	1	Para una producción pequeña y moderada		5	6	3
		2	4			
		Para una gran producción				
Coste de mano de obra por pieza .....	6	5	3	1	2	4
Posible ahorro en el mecanizado .....	5	1	4	3	2	6

Fuente: Metalurgia general. Tomo II, p. 933.

Figura 23 Posibilidades industriales de procedimientos de moldeo

Procedimiento	Fundición esferoidal	Acero	Acero inoxidable	Aluminio-magnesio	Bronce-latón	Fundición gris	Fundición maleable	Cinc-plomo
Arena .....	X	X	X	X	X	X	X	X
Colada continua ....	X				X	X		X
Centrífugo .....	X	X	X		X	X		X
Precisión (cera perdida) .....	X	X	X	X	X			
Coquilla .....				X	X	X		X
Escavola .....				X	X			X
Cáscara .....	X	X	X		X	X	X	
Presión .....				X	X			X

Fuente: Metalurgia general. Tomo II, p. 934.

### **2.3.10. Moldeo de metales amorfos**

Enfriando rápidamente un líquido metálico, se logra impedir que adquiera la estructura cristalina propia del metal en estado sólido. La técnica solo permite conseguir estas grandes velocidades de enfriamiento en delgadísimas láminas metálicas. La laminación por rotación de una aleación metálica líquida constituye la técnica más utilizada en la actualidad para lograr la elevada velocidad de enfriamiento que se necesita para producir un metal amorfo.

La película metálica formada sobre la superficie del correspondiente líquido entra en contacto con el rotor, se enfría muy rápidamente debido a que dicha lámina es muy delgada, el rotor constituye un sumidero térmico de gran volumen y por último, los metales son buenos conductores del calor. Con esta técnica se han alcanzado velocidades de enfriamiento del orden de mil grados kelvin por milisegundo, es decir, a razón de un millón de grados Kelvin por segundo.

## **2.4. Combustibles**

Combustible es cualquier material capaz de liberar energía cuando se cambia o transforma su estructura química. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable (por ser una reacción química, se conoce como energía química). En general se trata de sustancias susceptibles de quemarse, pero hay excepciones de acuerdo al tipo de sustancias que se estén quemando.

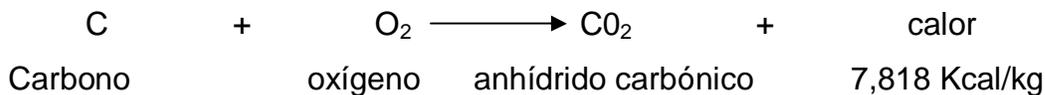
### 2.4.1. Composición química de los combustibles

Se puede definir la combustión como una reacción química según la cuál un elemento combina con oxígeno desprendiendo apreciable cantidad de calor.

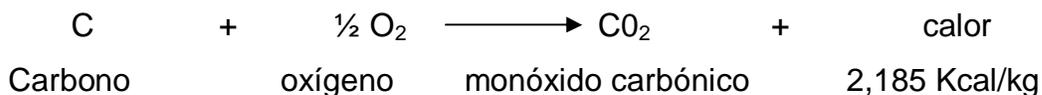
Para que exista combustión es necesario que exista un elemento que queme (combustible) y el oxígeno (carburante). Los combustibles utilizados contienen dos elementos que poseen la propiedad de unirse exotérmicamente al oxígeno: el carbono y el hidrógeno, generalmente combinados entre sí (como hidrocarburos). Algunos combustibles arden más fácilmente que otros y en general esto depende de que tan fácil sea ponerlos en contacto con el oxígeno del aire.

### 2.4.2. Reacciones químicas básicas de la combustión

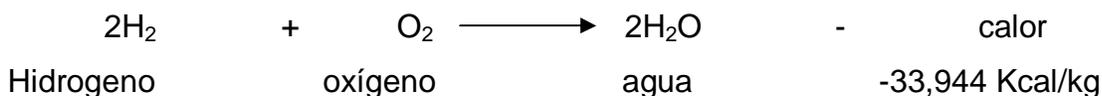
El carbono cuando se quema con suficiente aire produce anhídrido carbónico. Esto se llama combustión completa del carbono.



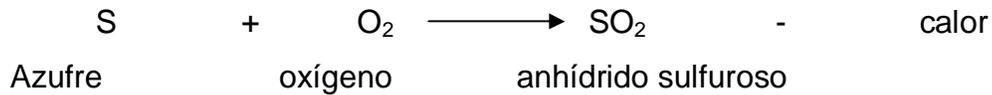
Al quemar el carbono con menos aire que el anterior, da origen al monóxido de carbono. Se dice entonces que la combustión es incompleta:



El hidrógeno se quema produciendo agua



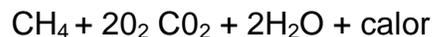
El azufre quema dando anhídrido sulfuroso



El nitrógeno no quema pues es un gas inerte y no contribuye a la combustión.

## 2.5. Aire necesario en la combustión

Cuando se conoce la composición química de un combustible es posible calcular la cantidad de oxígeno necesario para una combustión completa. Sin embargo, la combustión no se hace con oxígeno puro, sino con aire, compuesto casi exclusivamente de nitrógeno y oxígeno (79 por ciento vol. de nitrógeno y 21 por ciento vol. de oxígeno). Al utilizar aire como medio carburante trae como consecuencia la introducción de una gran masa de nitrógeno (que no participa en las reacciones químicas de la combustión) que absorbe buena parte del calor generado, con el consiguiente descenso de la temperatura de la llama y aumento de las pérdidas de calor arrastrado por los humos en la chimenea.



Carbono oxígeno bióxido agua 11,953 carbónico kilocalorías por kilogramo

Es decir que se necesitan 2 metros cúbicos de oxígeno para quemar 1 metro cúbico de metano. La cantidad de aire necesaria sería la siguiente: como el aire tiene 21 por ciento de oxígeno en volumen. 0,21 metros cúbicos de oxígeno están contenidos en 1 metro cúbico de aire. 2 metros cúbicos de oxígeno están contenidos en 10 metros cúbicos de aire. Se tiene entonces que para quemar 1 metro cúbico de metano se necesitan 10 metros cúbicos de aire.

Los productos de una combustión completa que salen por chimenea serán bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua, anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Si la combustión es incompleta, también tendremos monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). Si existe exceso de aire, también habrá oxígeno en los gases de chimenea. Si existe déficit de aire, también habrá hidrocarburo no quemado en los gases de chimenea.

### **2.5.1. Aire teórico**

Se llama así a la cantidad de aire que según la reacción química se necesita para una combustión completa. La combustión completa es un concepto teórico y se presenta como un caso ideal. En la práctica se requiere mayor cantidad de oxígeno.

### **2.5.2. Exceso de aire**

Durante las combustiones reales no se puede quemar completamente todo el combustible empleando la cantidad de aire mínima y necesaria, ya que cada partícula de combustible ésta rodeada del oxígeno necesario que requiere su combustión total, pues en un horno por ejemplo, existirían lugares con exceso y otros con defecto de aire. La cantidad de calor generada por la combustión de una cantidad de combustible es independiente del exceso de aire siempre que la combustión sea completa. Mientras mayor sea la cantidad de aire en exceso, mayor será la pérdida de combustible y menor será la eficiencia del horno.

Si se usa una cantidad insuficiente de aire, el carbono no se quemará completamente hasta bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sino que se formará una cierta cantidad de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ).

Bajo condiciones promedio, la presencia de 1 por ciento de monóxido de carbono en los gases de combustión representa aproximadamente una pérdida del 4 por ciento en combustible. El criterio a seguir es lograr el porcentaje más alto de CO<sub>2</sub> en los gases de combustión evitando la formación de CO.

### **2.5.3. Definición de exceso de aire**

Es la relación entre el excedente de aire y el aire teórico y solo lo expresa en porcentaje:

$$\text{Exceso de aire: } 100 \times \% \text{ O}_2 \text{ chimenea} / 21 - \% \text{ O}_2 \text{ chimenea}$$

## **2.6. Combustibles metalúrgicos**

Se dice de una sustancia que es combustible cuando arde rápidamente en el aire y el calor producido se puede emplear en operaciones industriales. Los combustibles metalúrgicos han de suministrar el calor a los niveles de temperatura utilizados en las operaciones metalúrgicas industriales. El calor se puede producir, también, por una reacción distinta de las de combustión, y así, algunos procesos elementales de la metalurgia química son autógenos.

Sin embargo, la mayoría de esos procesos consume grandes cantidades de calor, que se ha de suministrar por medio de combustibles o por calefacción eléctrica. Las reacciones metalúrgicas requieren elevadas temperaturas y el alcanzar estas temperaturas es un problema de combustible y de horno. Además el combustible, en algunos procesos, tales como los de alto horno, actúa también como agente reductor.

La temperatura a la cual arde un combustible depende de su condición física y de la presión del gas carburante y se denomina temperatura de ignición. La combustión siempre va acompañada de un desprendimiento de energía en forma de calor y de luz. El residuo de la combustión del carbón puede ser un material inorgánico incombustible que forma cenizas.

La siguiente tabla presenta, en forma general, la clasificación de los combustibles y para algunos de ellos su poder calorífico.

Figura 24 **Clasificación de los combustibles**

				Poder Calorífico en kcal/kg	
Combustibles de carbono e hidrogeno	Sólidos	Naturales	Madera { Dura .....	2 500 a 3 800	
			{ Blanca .....		
			Turba { Nueva .....	2 000 a 4 200	
			{ Vieja .....		
			Lignito { Nuevo .....	6 000 a 7 400	
	{ viejo .....				
			Carbón bituminoso, hulla no coquificable..	5 000 a 8 100	
			Antracita .....	7 300 a 8 000	
	Preparados	conglomerados (carbón vegetal)			
		Coque pulverizado, subproducto.			
		Carbonizados { Semicoque			
		{ Carbón de madera			
Líquidos	Natural: petróleo-aceite crudo				
				158 000 kcal/m <sup>3</sup>	
	Preparados	Aceites destilados: gas-oil y fuel-oil.....		8 750 kcal/kg	
Alquitrán de hulla.....					
	Combustibles coloidales.				
Gaseosos	Natural: gas natural .....			9 100 kcal/m <sup>3</sup>	
	Preparados	Gas de Gasógeno .....		1 370 »	
		Gas de horno alto .....		820 »	
		Gas de horno de coque .....		4 570 »	
		Gas de carbon graso .....		2 700-7 100 »	
		Gas de agua .....		2 330 »	
		Mezcla de gas, agua y aire .....		4 550 »	
		Gases embotellados	Acetileno .....		12 800 »
			Butano .....		26 500 »
	Hidrógeno .....		2 450 »		
Combustibles incidentales	Convertidor	Azufre			
		Hierro			
Manganeso.					
Carbono					
Silicio					
		Fósforo			
	Azufre	Tostación (sin fusión)			
		Fundición (con fusión)			

Fuente: Metalurgia general. Tomo I, p. 79.

### **2.6.1. Clasificación de los combustibles**

Los combustibles se suelen clasificar de acuerdo a su estado en condiciones normales, es decir:

- Sólidos
- Líquidos
- Gaseosos

#### **2.6.1.1. Combustibles sólidos**

Este tipo de combustible no es utilizado por las refinerías, el rendimiento típico de la combustión de un sólido no supera el 65 por ciento. Entre los combustibles sólidos más utilizados está el carbón, el cual se origina a partir de los restos en descomposición interrumpida de árboles, arbustos, helechos, musgos, lianas y otras formas de vida vegetal, que florecieron en lodazales y pantanos enormes, hace muchos millones de años, durante períodos prolongados de clima húmedo y tropical y precipitaciones pluviales abundantes.

El precursor del carbón fue la turba, que se formó mediante la actividad bacteriana y química sobre los desechos de plantas. Las acciones subsiguientes del calor, la presión y otros fenómenos físicos transformaron la turba para convertirla en las diversas clases de carbón que se conocen en la actualidad. Debido a los diversos grados de cambios metamórficos ocurridos durante este proceso, el carbón no es una sustancia uniforme, no hay dos carbones que sean iguales en ningún aspecto.

### **2.6.1.2. Combustibles líquidos**

Los combustibles líquidos han demostrado su ventaja en muchas aplicaciones metalúrgicas. La mayoría de los utilizados industrialmente derivan del petróleo bruto, los principales son: aceites ligeros y pesados, tales como petróleo bruto, aceite de alquitrán, y creosota. Su utilidad más sobresaliente está en la relación con la fusión de los metales no féreos y con la fusión del acero en ciertos tipos de convertidores.

La cantidad de agua y sedimento presentes en el aceite no ha de sobrepasar en conjunto, del 2,5 por ciento, pues de otra manera, la potencia calorífica y la conveniencia general para su utilización en los hornos, disminuye mucho. A pesar de las grandes variaciones en las clases y en las cantidades de hidrocarburos de los aceites combustibles, las composiciones en función de los elementos químicos no varían mucho de un aceite a otro

### **2.6.1.3. Combustibles gaseosos**

Los combustibles gaseosos tienen un número de ventajas sobre los otros combustibles: limpieza y ausencia de cenizas lo que es muy conveniente, particularmente para la fusión de los metales no féreos, facilidad de manipulación y regulación, flexibilidad, buenas características de combustión y menos pérdidas ya que la combustión cesa cuando se desea.

La mayoría de los gases combustibles son mezclas de distintas sustancias en proporciones variadas. Las más corrientes de estas, agrupadas en combustibles y diluyentes, son: combustibles, hidrógenos, monóxido de carbono, metano, etano, etileno y otros hidrocarburos; diluyentes, nitrógeno, dióxido de carbono y agua.

## **2.7. Materiales refractarios**

Los materiales refractarios son componentes importantes del equipo utilizado en la producción, refinación y manejo de metales y vidrios; en la construcción de hornos para tratamientos térmicos y en otros equipos de procesos de alta temperatura. Los refractarios deben soportar alta temperatura sin corroerse o debilitarse por el entorno. Los refractarios típicos están compuestos por diversas partículas gruesas de óxido aglutinadas con un material refractario más fino.

Este segundo material se funde al hornearse y proporciona la unión. En algunos casos, los ladrillos refractarios contienen aproximadamente de 20 a 25 por ciento de porosidad aparente a fin de conseguir un mejor aislamiento térmico. Los materiales refractarios se clasifican: de acuerdo a su comportamiento químico y de acuerdo a su origen y/o composición mineralógica.

### **2.7.1. De acuerdo a su comportamiento químico**

Desde el punto de vista químico, los materiales refractarios pueden ser clasificados en: ácidos, básicos, neutros y especiales.

#### **2.7.1.1. Refractarios ácidos**

Los refractarios ácidos, contienen cantidades substanciales de sílice sin combinar, la cual puede reaccionar químicamente en presencia de temperatura, con escorias, humos, gases o refractarios de naturaleza básica. Los refractarios más comunes son obviamente los de sílice y los de arcilla, también llamados silico-aluminosos.

### **2.7.1.2. Refractarios básicos**

Los refractarios básicos, tienen como sus principales componentes cal y magnesita y pueden reaccionar químicamente en presencia de temperatura con escoria, fundentes o refractarios de naturaleza acida. Los refractarios básicos más comunes son los magnesita, dolomita, magnesita-cromo, cromo-magnesita y forsterita.

### **2.7.1.3. Refractarios neutros**

Los refractarios neutros, que también se les llama anfóteros, son aquellos que no son muy básicos ni muy ácidos y que dependiendo de las condiciones se pueden comportar como ácido o básico. Los refractarios neutros más comunes son los de alta alúmina, mulita, carbón de silicio, grafito y cromo. Aunque este último en presencia de escorias acidas, tiene un comportamiento básico.

### **2.7.1.4. Refractarios especiales**

Los refractarios especiales, son aquellos que se utilizan en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible, entre los cuales podríamos mencionar: el carbono, grafito, la circonia el circón y diversidad de nitruros, carburos y boruros.

## **2.7.2. De acuerdo a su origen y/o constitución mineralógica**

La clasificación desde el punto de vista mineralógico, ofrece las mejores posibilidades para un claro entendimiento del origen y naturaleza de los materiales refractarios.

Desde el punto de vista mineralógico, la clasificación de los materiales pueden hacerse ya sea tomando en cuenta las materias primas con que están fabricados o también con respecto al material predominante después de su fabricación; en cualquier caso los materiales refractarios se pueden clasificar en los siguientes grupos: sílice, arcilla, alta alúmina, básicos, carbón, y aislante

#### **2.7.2.1. Refractarios de sílice**

Los refractarios de este grupo contienen principalmente el dióxido de silicio, llamado comúnmente sílice, en cualquiera de sus tres formas cristalinas tales como cuarzo, tridimita, cristobalita. Las materias primas empleadas para la manufactura de los refractarios de sílice, oscilan entre el 96 y 98 por ciento de dióxido de silicio, siendo el cuarzo el mineral más comúnmente usado.

#### **2.7.2.2. Refractarios de arcilla**

Los refractarios de este grupo también llamados silicio-aluminosos, constan esencialmente de silicato de aluminio hidratados, siendo el caolín la materia prima más común para este grupo. Existe una gran variedad de arcillas, las cuales se diferencian por la cantidad de impurezas que contengan, aun las arcillas más puras, como el caolín, contienen variadas proporciones de óxidos de: hierro, calcio, magnesio, titanio y álcalis. Los refractarios de arcilla contienen en su composición química variados porcentajes de alúmina y sílice, los cuales varían para la alúmina de 18 – 44 por ciento y para la sílice 35 -80 por ciento.

### **2.7.2.3. Refractarios de alta alúmina**

Los refractarios de este grupo están constituidos principalmente por alúmina en mayor proporción y sílice en menor proporción. Las materias primas utilizadas para la fabricación de los refractarios de alta alúmina están la bauxita, silimanita, cianita, andalusita, mulita sintética, corundum y diásporo.

Estos refractarios tienen como mínimo 45 por ciento de alúmina, existiendo comercialmente productos de 50, 60, 70, 80, 90 y en algunos casos hasta de 99 por ciento de alúmina.

### **2.7.2.4. Refractarios básicos**

Estos refractarios constan básicamente de magnesio, conocido comúnmente como magnesita y de óxido de cromo, conocido comúnmente como cromita. Las principales materias primas para la fabricación de los refractarios básicos, son la magnesita natural, hidróxido de magnesio químicamente precipitado y minerales de cromo. Uno de los aspectos importantes de los ladrillos básicos, es la utilización de placas metálicas, ya sea interiores o cubriendo las caras exteriores de las piezas, misma que protege al ladrillo de roturas en tránsito, almacenaje e instalación.

### **2.7.2.5. Refractarios de carbón**

A los refractarios de este grupo, también se les podría llamar no-óxidos ya que en su composición no contienen óxidos, siendo el carbón el principal constituyente.

Las principales materias primas para la fabricación de estos refractarios son el grafito (natural o sintético), la antracita, coque (de petróleo o de fundición) y de carbón de piedra o carbón mineral y son ligados con brea o alquitrán.

#### **2.7.2.6. Refractarios aislantes**

Los refractarios de este grupo, se caracterizan por su gran porosidad y ligero peso, teniendo una más baja conductividad térmica en comparación con otros refractarios. Las materias primas que se utiliza para la fabricación de los aislantes son vermiculita, perlita, diatomita, asbesto, arcilla refractaria y minerales de alta alúmina.

Existe una gran variedad de refractarios aislantes, fabricándose en forma de ladrillos, concretos, blocks, fibras, etc., mismos que se identifican por su temperatura de operación que va desde 80 grados Celsius, hasta temperaturas por arriba de los 1 800 grados Celsius.



### **3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA**

#### **3.1. Proceso de producción de azúcar**

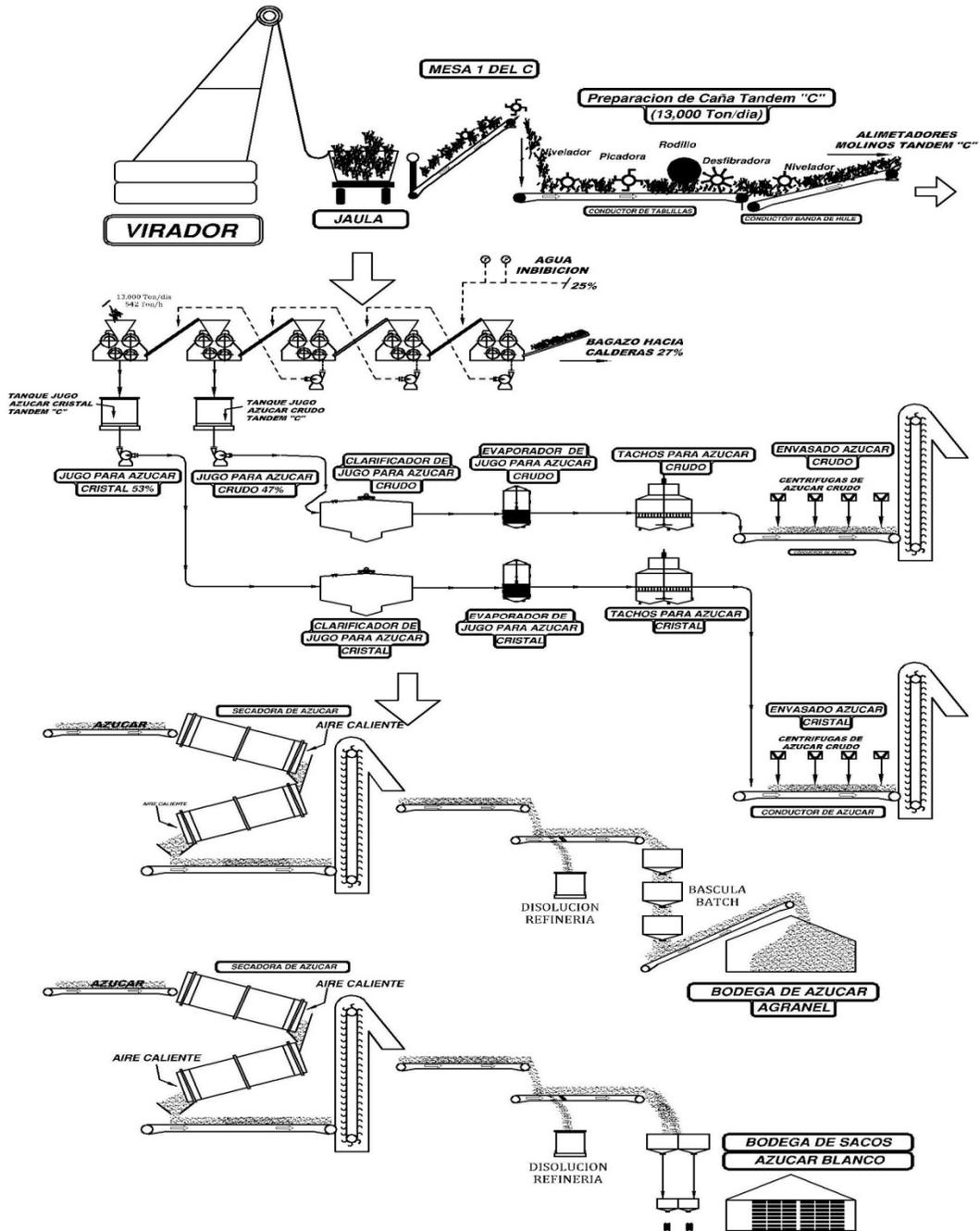
La caña llega al patio de dos formas: caña maleteada que en su mayoría es verde, sin quemar, y caña a granel, que viene en contenedores, llamados jaulas, para que puedan ser fácilmente descargados. En el patio, la caña es pesada en las básculas y luego se descarga en las mesas de caña, donde es lavada. Después, la caña pasa por los conductores donde es transportada y preparada, para que en el sistema de molienda la extracción del jugo sea fácil.

El sistema de molienda consiste de dos tandem de molinos compuestos de cuatro rodillos conocidos con el nombre de mazas. Se agrega agua de imbibición para facilitar la extracción de sacarosa. La finalidad principal de los molinos, es conseguir la mayor separación posible de los dos elementos de la caña: fibra y jugo. El jugo extraído es bombeado a fábrica y el bagazo es conducido a calderas para utilizarse como combustible. Las calderas generan el vapor y este es utilizado para la generación de energía a través del turbogenerador, la cual en su mayoría se vende a la empresa eléctrica y un porcentaje se utiliza en el proceso de evaporación de azúcar.

##### **3.1.1. Diagrama del proceso**

El siguiente diagrama da a conocer parte del proceso que se lleva a cabo para la producción de azúcar, en los diferentes tipos y estados en que se encuentra la misma.

Figura 25 Diagrama del proceso de fabricación de azúcar



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.

### **3.2. Cantidad de molinos instalados**

La cantidad de molinos instalados, utilizados para la extracción varía de acuerdo al tandem de molinos. El tandem A cuenta con seis molinos instalados, cada molino cuenta con cuatro mazas, así mismo el tandem B cuenta con cinco molinos, los cuales también cuentan con cuatro mazas cada uno.

El total de mazas instaladas para la extracción del jugo de la caña es de cuarenta y cuatro, estas mazas cuentan con un eje de acero 1040, y una camisa de hierro fundido gris, el diámetro de la camisa varia según el molino y el tandem en el que se encuentra.

### **3.3. Cantidad de piezas instaladas de hierro fundido**

En lo que respecta a piezas instaladas de hierro fundido gris, se cuenta con una diversidad según la necesidad y la aplicación de cada una de estas. Contamos con peines bagaceros, peines superiores, cuchillas centrales y acoplamientos.

Los peines, cuchillas y acoples son cambiados durante cada zafra según la necesidad que se presente, comúnmente se cambian, los peines bagaceros, peines superiores. Ocasionalmente también se procede al cambio de los acoples debido a la ruptura o desgaste de los mismos. Así mismo en muy raras ocasiones, se realizan cambios de cuchillas centrales, a no ser por problemas de fuerza mayor.

### **3.3.1. Peines superiores**

Los peines superiores tienen como función principal, la limpieza del fondo de los dientes de las mazas. Estos no deben permitir, que el bagazo de caña que pasa por los molinos se quede atrapado, entre los dientes de las mazas.

Estos se realizan de hierro fundido gris, debido a que se prefiere sacrificar el desgaste de un peine y no el de una maza, ya que los costos de fabricación de estas últimas, son relativamente más altos que el propio peine. En el ingenio se cuenta con un total de once peines superiores instalados, distribuidos en el tandem A y el tandem B.

### **3.3.2. Peines bagaceros**

Los peines bagaceros, son los encargados de la limpieza de la maza bagacera, la cual se encuentra ubicada en la salida del proceso de extracción del jugo de cada molino. En el ingenio se cuenta con un total de once peines bagaceros instalados, estos se encuentran distribuidos, tanto en el tandem A como en el tandem B.

### **3.3.3. Cuchillas centrales**

La cuchilla central es una de las piezas más importantes de un molino, debido a que cumple ciertas funciones adicionales, además de la de limpieza del fondo de los dientes de las mazas, esta absorbe cierta presión ejercida por el aceite sobre la maza superior, además sirve como puente en el transporte de la fibra de caña, hacia la salida de los molinos. En el ingenio se cuenta con un total de once cuchillas centrales instaladas, estos se encuentran distribuidos, tanto en el tandem A como en el tandem B.

### **3.3.4. Cuchillas de cuarta maza**

La cuchilla de cuarta maza también tiene como función principal, la limpieza del fondo de los dientes de la cuarta maza, la cual también es conocida con el nombre de rodo alimentador. En el ingenio se cuenta con un total de once cuchillas de cuarta maza instaladas, estos se encuentran distribuidos, tanto en el tandem A como en el tandem B. Hay que tomar en cuenta que estas son las únicas cuchillas que son fabricadas de hierro negro y no de hierro fundido como el resto.

### **3.3.5. Acoplamientos**

El acoplamiento es el dispositivo que se utiliza para unir dos ejes en sus extremos con el fin de transmitir potencia, en el caso de los molinos se utilizan acoples rígidos, los cuales están hechos en su totalidad de hierro fundido, con las mismas características que los peines, cuchillas y mazas utilizadas en los molinos.

En el ingenio se cuenta con un total de once acoples de hierro fundido gris en el tandem A, y con nueve acoples de hierro fundido gris en el tandem B, en la zafra dos mil diez/dos mil once se inicio con la implementación de dos acoples flexibles, los cuales permiten cierta desalineación que no permiten los rígidos que se usan actualmente. Uno de los acoples flexibles, será utilizado en el molino seis del tandem A y uno mas en el molino cinco del tandem B.

## **3.4. Existencia mínima en tiempo de zafra**

La existencia mínima de repuestos, se maneja en base a la necesidad que se tiene en cada tandem de molinos.

Por lo general se maneja un repuesto por cuchilla, o peine tanto de cada molino, así como del largo que estos tengan. El largo aproximado de los molinos del tandem B es de setenta y ocho pulgadas y el del tandem A es de ochenta y cuatro pulgadas.

Otra de las cuestiones importantes es de que en cada cuchilla o peine se tiene un perfil diferente lo que hace aun mas necesario el mantener un repuesto por cada uno de ellos y no uno solo para cierta cantidad de molinos.

## 4. PROPUESTA PARA EL TALLER DE FUNDICIÓN

### 4.1. Ubicación

La ubicación propuesta para el montaje del taller de fundición, es la indicada en el plano. Esta se encuentra a un costado de la carpintería.

### 4.2. Propuesta del plano del taller

La propuesta del plano del taller, se da en base a los requerimientos del material, según los pasos que este lleva, como por ejemplo la preparación, fundición, secado, etc.

Figura 26 **Distribución del taller de fundición**

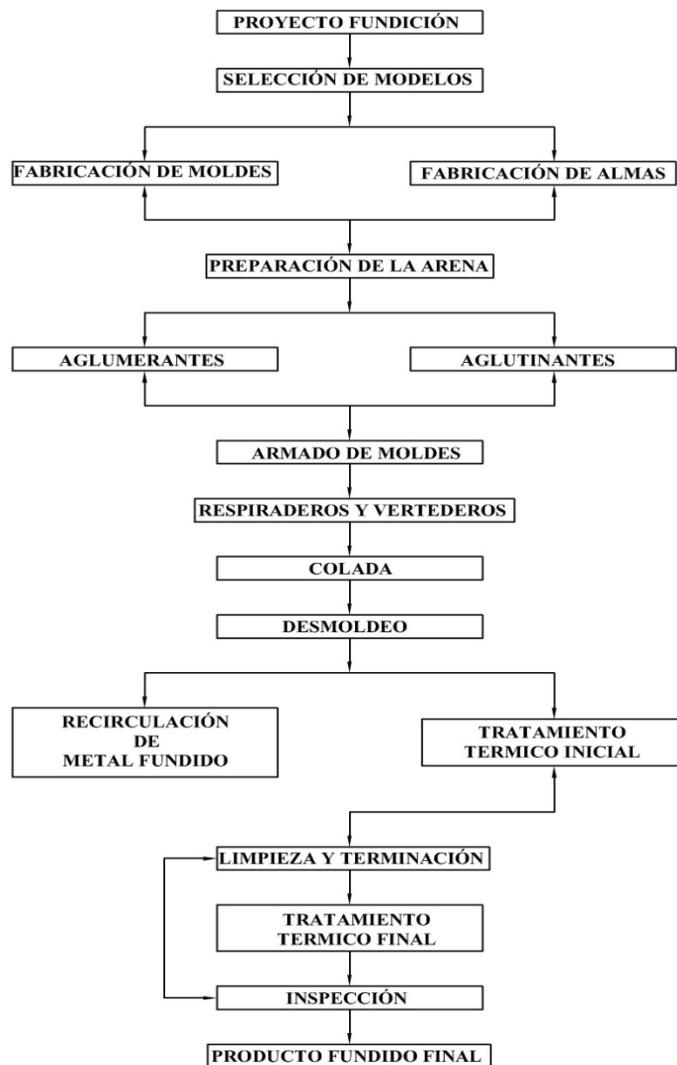


Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.

### 4.3. Flujograma del proceso

El flujograma siguiente nos hará mas fácil el análisis del proceso de fundición, ya que nos da los pasos a seguir de una manera grafica y fácil de comprender

Figura 27 **Flujograma del proceso de fundición**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.

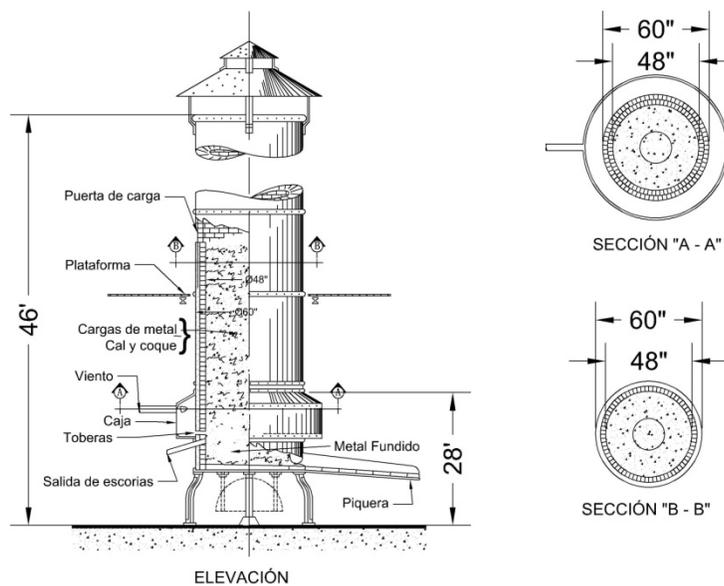
#### 4.4. Selección del horno a utilizar

La selección del horno a utilizar, principalmente se basó tomando en cuenta el tipo de material, del que se encuentran fabricadas las piezas que se utilizan en los molinos, que en su mayoría son de hierro fundido gris. Se recomienda que para la fundición de este material se utilice un horno cubilote, el cual nos permite realizar fundiciones de hierro gris o hierro colado.

##### 4.4.1. Dimensiones del horno

Las dimensiones que se dan a continuación, son en base a un horno de 46 pies de altura, por un diámetro exterior de 60 pulgadas.

Figura 28 Dimensiones del horno de fundición



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.

#### **4.4.2. Material del horno**

El material principal del que se desea fabricar el horno es lámina de 3/8 de pulgada, también utilizaremos lámina de 3/4 de pulgada, esto para refuerzos del horno que permitirán una mayor rigidez del mismo. Dichos espesores de lámina son los adecuados, ya que el horno lleva un recubrimiento interno de material refractario, que impedirá en su mayor parte la transferencia de calor hacia la lámina, por lo que problemas de corrosión serían mínimos debido al material refractario

#### **4.4.3. Accesorios**

Entre los accesorios necesarios e indispensables para el horno de fundición, tenemos el ventilador forzado, el cual nos permitirá una buena combustión al momento de realizar la fundición.

#### **4.5. Selección del material refractario**

Para la selección de este material, se tomó en cuenta la temperatura aproximada que se genera en el hogar del horno, que es de 1 380 a 1 450 grados Celsius lo cual nuestro material debería de sobrepasar dichas temperaturas, comúnmente los materiales de base de cerámica refractaria resisten temperaturas de más de 1 500 grados Celsius, estos usualmente los utilizamos en hornos de fundición, así como en la industria del acero, cemento y vidrio para altos hornos, calderas y crisoles. Entre las recomendaciones tenemos el TCC-25, ya que este es un refractario quemado a mayor temperatura que los convencionales con muy buena resistencia al ataque por escorias, a la abrasión y al choque térmico, de baja porosidad y alta resistencia mecánica.

#### **4.5.1. Dimensiones del refractario**

Nuestro refractario a utilizar deberá ser de tipo ladrillo con una altura de 9 pulgadas, un espesor de 2-1/2 pulgadas y un ancho de 4-1/2 pulgadas.

#### **4.6. Selección del combustible**

El combustible necesario, para generar una combustión adecuada para este tipo de fundición es el coque, ya que contiene un alto poder calorífico que va desde los 14 000 hasta los 32 000 kilojoules por kilogramo, por lo cual es el recomendado para esta función, dicho combustible deberá presentar unas medidas que oscilan entre 4 pulgadas por 6 pulgadas, esto es un dato aproximado o subjetivo, ya que el coque no se encuentra en medidas exactas en la industria.

#### **4.7. Selección del tipo de arena para moldeo**

La arena de mar, es el tipo de arena que utilizaremos para realizar el moldeo de las piezas, esta tiene un bajo costo de adquisición, y sus propiedades al mezclarse con el aglutinante son las necesarias.

#### **4.8. Materia prima**

Para este tipo de fundición se utilizará chatarra de hierro colado, chatarra de piezas de hierro gris, estas serán de los mismos materiales ya trabajados o desgastados, piedra caliza y coque.

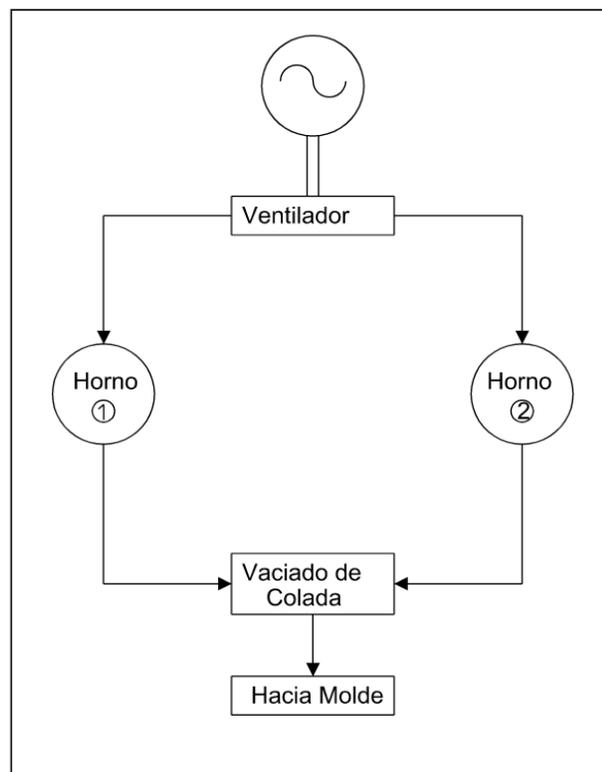
Es necesario tomar en cuenta que para la mezcla de dichos materiales, y que a su vez nos permitan una buena fundición, necesitamos una relación de carga, por lo que necesitamos considerar un 65 por ciento de chatarra de hierro colado, y un 35 por ciento de chatarra de hierro gris, esto permitirá que nuestra fundición sea un tanto económica y rentable para la misma empresa.

## 5. ANÁLISIS TÉCNICO PARA EVALUACIÓN DE COSTOS

### 5.1. Análisis técnico-económico del proyecto

En la figura 26 se muestra el diagrama de fundición, donde se incluye el ventilador de tiro forzado.

Figura 29 Circuito del taller de fundición



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.

Dicho circuito de fundición consta de dos hornos de 46 pies de altura, de los cuales uno estará en funcionamiento y el otro estará listo para usarse al momento que el horno número uno salga de línea para su respectivo mantenimiento.

Según los datos de placas tomadas en un motor de referencia, estos tienen un consumo de 47 amperios, y una capacidad total de 40 HP con 1,185 revoluciones por minuto.

Dichos valores son referenciales, ya que en su momento podrían variar según las necesidades que se presenten al momento de realizar el proyecto.

Asimismo, se presenta la siguiente tabla, incluyendo la cantidad necesaria de materiales con los cuales se inicia cada zafra, así mismo se incluyen los repuestos de cada uno según el flujo registrado durante las zafras anteriores.

Tabla I Costo de repuestos

NOMBRE	CANTIDAD INSTALADA AL INICIO DE ZAFRA	COSTO UNIDAD	CANTIDAD NECESARIA DE REPUESTOS DURANTE LA ZAFRA	COSTO UNIDAD	COSTO TOTAL
TANDEM B					
PEINE SUPERIOR	5	Q 7 200,00	5	Q 7 200,00	Q 72 000,00
PEINE BAGACERO	5	Q 3 850,00	5	Q 3 850,00	Q 38 500,00
CUCHILLA CENTRAL	5	Q 5 200,00	3	Q 5 200,00	Q 41 600,00
ACOPLE H. F.	5	Q 46 403,00	2	Q 46 403,00	Q 324 821,00
TANDEM A					
PEINE SUPERIOR	6	Q 7 690,00	6	Q 7 690,00	Q 92 280,00
PEINE BAGACERO	6	Q 5 450,00	6	Q 5 450,00	Q 65 400,00
CUCHILLA CENTRAL	6	Q 8 920,00	3	Q 8 920,00	Q 80 280,00
ACOPLE H. F.	6	Q 74 099,00	2	Q 74 099,00	Q 592 792,00
<b>COSTO TOTAL DE REPUESTOS</b>					<b>Q 1 307 673,00</b>

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior el costo total de inversión en repuestos es:

Costo Total de Materiales: Q 1 307 673,00

### 5.1.1. Costo de implementación del taller

El equipo necesario para la puesta en marcha del presente proyecto se muestra en la tabla II.

Tabla II Costo de materiales para la implementación del taller

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	COSTO UNIDAD	COSTO TOTAL
MOTOR ELÉCTRICO DE 40 HP 1185 RPM	1	UN	Q 13 614,00	Q 13 614,00
VENTILADOR DE TIRO FORZADO	1	UN	Q 10 500,00	Q 10 500,00
LÁMINA H.N. DE 3/8" X 6' X 20'	480	PI <sup>2</sup>	Q 67,99	Q 32 635,20
LÁMINA H.N. DE 5/8" X 4' X 8'	32	PI <sup>2</sup>	Q 106,05	Q 3 393,60
LADRILLO REFRACTARIO TCC-25. DE 9" X 4.1/2" X 2.1/2"	1600	UN	Q 37,50	Q 60 000,00
MATERIALES DE OBRA CIVIL	1	UN	Q 40 000,00	Q 40 000,00
MANO DE OBRA	1	UN	Q 135 000,29	Q 135 000,29
GRÚA AEREA DE 10 TONELADAS	1	UN	Q 453 333,33	Q 453 333,33
VIGA WF 12X53 LBS	480	PI	Q 311,39	Q 149 467,20
VIGA I 12X40 LBS	300	PI	Q 149,84	Q 44 952,00
VIGA I 8X24 LBS	300	PI	Q 109,86	Q 32 958,00
RIEL DE FERROCARRIL	300	PI	Q 79,01	Q 23 703,00
LÁMINA TROQUELADA DE 15 PIES, CALIBRE 24	100	UN	Q 334,82	Q 33 482,00
<b>COSTO TOTAL DEL PROYECTO</b>				<b>Q1 033 038,62</b>

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior el costo total de inversión es:

Costo total Inversión: Q 1 033 038,62

### 5.1.2. Costo de elaboración de las piezas

A continuación se presenta un costo de producción, basado en 18 días hábiles de trabajo. Este es el tiempo necesario para la preparación, moldeo y fundición de 16,5 toneladas de producción.

Para dicha producción se necesitan 16 personas, entre la cuales contamos con moldeador, operadores de máquinas, auxiliares y albañiles.

Tabla III Costo de producción de 16,5 toneladas

<b>COSTO DE PRODUCCIÓN DE 16,5 TONELADAS DE FUNDICIÓN EN NUESTRO TALLER</b>		
Mano de Obra	Q	49 666,36
Combustible (Coque)	Q	21 384,00
Materia Prima	Q	39 727,15
Consumo de Energía	Q	1 725,15
<b>TOTAL</b>	<b>Q</b>	<b>112 502,66</b>

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior el costo total de producción interna es:

Costo de producción: Q 112 502,66

Asimismo se presenta el costo de producción, de cierto lugar, el cual se tomo de referencia para realizar dicho análisis, tomando en cuenta una producción de 16,5 toneladas, el costo es:

Costo Externo = Q 420 824,90

Entonces:

Se analizará la cantidad de dinero ahorrado por la producción propia del hierro gris en el ingenio:

Ingreso = Q 1 307 673,00

Ahora se analizara la utilidad del proyecto, la cual esta expresada a continuación:

Utilidad = Ingreso - Costo x Producirlo

Utilidad = Q 1 307 673,00 - Q 1 086 321,19

Utilidad = Q 221 351,81

El tiempo de recuperación del proyecto es de:

$$\text{Tiempo de Recuperación} = \text{Costo Inversión/Utilidad}$$

$$\text{Tiempo de Recuperación} = \text{Q 1 033 038,62 / Q 221 351,81}$$

$$\text{Tiempo de Recuperación} = 4,6$$

El tiempo de recuperación es de aproximadamente 5 años.

## **5.2. Análisis de costo beneficio del proyecto**

El principio de costo-beneficio, establece que el valor es creado cuando el beneficio de una decisión excede su costo. El valor financiero es creado por medio de la influencia de tres variables:

- El flujo de efectivo
- El tiempo
- El riesgo

Las decisiones financieras se encuentran íntimamente relacionadas con el valor del dinero a través del tiempo.

Los valores determinan la oportunidad de flujos futuros de efectivo, que se vayan a recibir. Los fondos que se reciban en el próximo año, valen mas que el mismo monto cuando este se recibe en el quinto o en el decimo año. La mayoría de las decisiones financieras, tanto a nivel personal como a nivel de los negocios, deben tomar en cuenta el valor del dinero a través del tiempo.

La relación de Beneficio/Costo esta representada por:

Beneficio/Costo = Ingresos/Egresos

Beneficio/Costo = Q 1 307 673,00/ Q1 086 321,19

Beneficio/Costo = Q 1,203762765

Como la relación de Beneficio/costo es mayor de 1, esto implica que los ingresos son mayores que los egresos, entonces dicho proyecto se recomienda para su ejecución.

### **5.2.1. Valor Presente Neto (VPN)**

Esta es una alternativa para toma de decisiones de inversión, lo cual permite determinar de antemano si una inversión vale la pena o no realizarla y no hacer malas inversiones que provoquen en un futuro perdidas.

El Valor Presente Neto (VPN) puede desplegar tres posibles respuestas, las cuales pueden ser:

VPN < 0

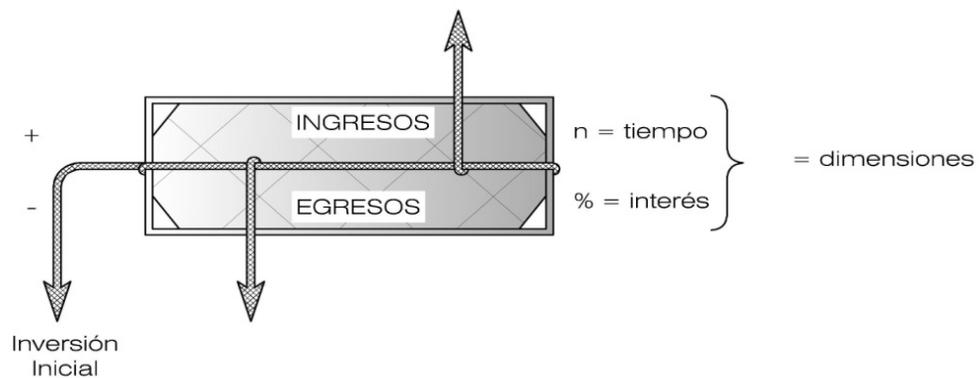
VPN = 0

VPN > 0

Cuando el VPN < 0 y el resultado es un valor negativo muy grande alejado de cero, esta alertando o previniendo que el proyecto no es rentable, ya que se están estimando que habrán pocos ingresos y en el tiempo que se pretende recuperar la inversión no se lograra.

Pero cuando nos da un VPN < 0 cercano a cero nos esta indicando, que la opción puede ser rentable y se pretende una tasa de utilidad muy grande, cuando el VPN = 0 esta indicando que exactamente se esta generando el porcentaje de utilidad que se desea, y cuando el VPN > 0, esta indicando que la opción es rentable y que inclusive podría incrementarse el porcentaje de utilidad.

Figura 30 Diagrama de flujo de efectivo



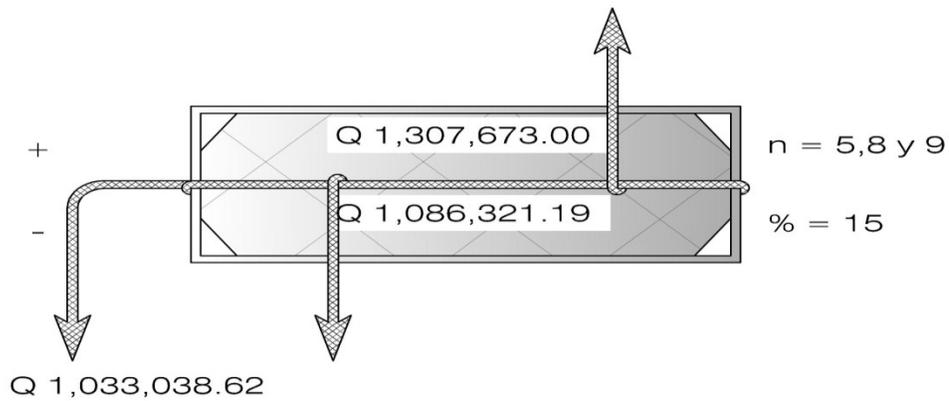
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.

Tabla III. Flujo de efectivo del proyecto

Inversión Inicial	Q 1 033 038,62	Q 1 033 038,62	Q 1 033 038,62
Costo Anual	Q 1 086 321, 19	Q 1 086 321,19	Q 1 086 321,19
Ingresos/año	Q 1 307 673,00	Q 1 307 673,00	Q 1 307 673,00
Tiempo recuperación	5	8	9

Fuente: elaboración propia.

Figura 31 Diagrama de flujo de efectivo del proyecto



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2010.

A través de la ecuación siguiente se calcula el Valor Presente Neto.

$$VPN = -Inversión + Ingresos \left( \frac{(1+\%)^n - 1}{\% \times (1+\%)^n} \right) - Egresos \left( \frac{(1+\%)^n - 1}{\% \times (1+\%)^n} \right)$$

$$VPN = -Inversión + (Ingresos - Egresos) \left( \frac{(1+\%)^n - 1}{\% \times (1+\%)^n} \right)$$

Para el presente proyecto se analizará de 2 y 3 años.

Donde:

n= 5 y 9

%= 15 % (tasa de interés del proveedor)

El valor presente neto para el año 2 es:

$$VPN_{n=2} = -Q 1 033 038,62 + (Q 1 307 673,00 - Q 1 086 321,19) \frac{((1+0,15)^5 - 1)}{0,15 \times (1 + 0,15)^5}$$

$$VPN_{n=5} = -Q 291 033,02$$

Dado el resultado anterior, el valor indica que para 5 años el proyecto no es viable. Analizando ahora para 9 años se tiene que:

$$VPN_{n=9} = -Q 1 033 038,62 + (Q 1 307 673 00 - Q 1 086 321,19) \frac{((1+0,15)^9 - 1)}{0,15 \times (1 + 0,15)^9}$$

$$VPN_{n=9} = Q 23 160,45$$

Este resultado nos muestra que el proyecto es favorable para un período de 9 años.

### **5.2.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)**

Conceptualmente se define que la Tasa Interna de Retorno, es la tasa máxima de utilidad que puede pagarse u obtenerse en la evaluación de una alternativa.

La Tasa Interna de Retorno se calcula con la siguiente ecuación:

$$0 = -Q1\ 033\ 038,62 + (Q1\ 307\ 673,00 - Q1\ 086\ 321,19) \frac{((1+TIR)^2 - 1)}{TIR \times (1 + TIR)^2}$$

Resolviendo la ecuación se tiene:

$$TIR = 19 \%$$

Esta tasa es superior a la del proveedor. Se puede concluir que el proyecto es rentable a partir de 9 años.

## CONCLUSIONES

1. La idea de fabricar en el ingenio las piezas, se basó principalmente en la reducción de costo que genera el fabricar fuera de la misma dichas piezas.
2. Con esto se demostró que el proyecto de fabricación propia obtendrá buenos resultados, ya que se tendrán ingresos, solo por el hecho de no mandar a fabricar las piezas.
3. Asimismo se determinó que a partir del noveno año, dicho proyecto se vuelve rentable y que la Tasa Interna de Retorno, es mayor que las vigentes.
4. La implementación de este tipo de horno de fundición, es una buena opción si se debe iniciar con el descenso de los costos de fabricación.
5. La simplicidad del proyecto, hacen que sea conveniente de llevarlo a la realidad en un tiempo justo.
6. La facilidad de adquisición de la arena para moldeo y su bajo costo hace que los costos también se mantengan bajos.



## RECOMENDACIONES

1. Implementar el Taller de fundición de Hierro Gris, pues, se demostró técnicamente, la viabilidad y rentabilidad de dicho proyecto.
2. El invertir en la implementación del proyecto realmente disminuirá los costos de fabricación que cada zafra se tienen.
3. Cuando se requiera materia prima, tomar en cuenta que la mejor opción, es la de bloques de motor, los cuales son fabricados en hierro fundido.
4. Es necesario tomar en cuenta, que la buena selección de material refractario, contribuirá para una larga vida del horno de fundición.
5. El mantenimiento preventivo del horno y de los equipos es básico, para que su vida útil sea lo más larga posible.



## BIBLIOGRAFÍA

1. APRAIZ BARREIRO, José. *Fundiciones*. 2a ed. Madrid: Dossat, 1963. 166 p.
2. ASKELAND, Donald R. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3a ed. México: Thomson, 1998. 552 p.
3. BARILLAS FLORES, José Francisco. *Programa de mantenimiento preventivo para la empresa metalúrgica: Fundidora Bernal, S. A.* Guatemala: Fundidora Bernal, 2004. 119 p.
4. CALLISTER JR, William D. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 2a ed. España: Reverté, 2007. 804 p.
5. HUGOT. *Manual para ingenios azucareros*. 7a ed. México: Continental, 1984. 803 p.
6. MORRAL, F.R.; Jimeno, E.; Molera, P. *Metalurgia general*. 2a ed. Tomo I. España: Reverté, 1982. 694 p.
7. \_\_\_\_\_. *Metalurgia general*. 2a ed. Tomo II. España: Reverté, 2004. 749 p.
8. SYDNEY H., Avner. *Introducción a la metalurgia física*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1990. 69 p.

9. TERRY ASPIN. *Principios de fundición*. Barcelona: Gustavo Gili, 1995.  
95 p.