

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
CARRERA DE MECÁNICA INDUSTRIAL



TRABAJO DE APLICACIÓN DE EXAMEN DE GRADO

Presentado para la obtención del grado de Licenciatura

**CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL PARA LA
MATERIA DE TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES DE LA
CARRERA DE MECÁNICA INDUSTRIAL**

POSTULANTE: JAVIER GENARO PAXI QUISPE

LA PAZ – BOLIVIA
Agosto, 2017

Trabajo de Aplicación:

**CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL PARA LA
MATERIA DE TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES DE
LA CARRERA DE MECÁNICA INDUSTRIAL**

Presentado por: Univ. Javier Genaro Paxi Quispe

Para optar el grado académico de Licenciado en Mecánica Industrial

Nota numeral:

Nota literal:

Ha sido:

Director Carrera de Mecánica Industrial: Lic. Gustavo T. Monasterios
Peredo

Tribunal: Lic. Richard Villalba Caro

Tribunal: Lic. Víctor Chura Uruchi

Tribunal: Msc. Lic. Jhonny Tenorio Misto

DEDICATORIA

A MIS PADRES GENARO Y CRISTINA:

QUIENES ME ENSEÑARON EL CAMINO DEL ESTUDIO Y LA RESPONSABILIDAD; POR EL AMOR Y APOYO DE SIEMPRE, QUE INCONDICIONALMENTE ME BRINDARON.

A MIS HERMANOS Y HERMANAS:

POR EL APOYÓ Y MOTIVACIÓN QUE ME BRINDARON DURANTE LA ETAPA DE MIS ESTUDIOS.

AGRADECIMIENTOS

Al plantel docente por todos los conocimientos transmitidos durante la etapa de mis estudios en esta prestigiosa Carrera de Mecánica Industrial de la Facultad de Tecnología.

A los miembros del Tribunal examinador: Lic. Richard Villalba C., Msc. Lic. Jhonny Tenorio M., Lic. Victor Chura U., mis agradecimientos por los consejos, sugerencias y directrices que me brindaron.

A mis Padres, Hermanos, Hermanas y Amigos por su comprensión y apoyo sin los que no hubiese sido la conclusión de mis estudios.

A Dios, por el milagro de la vida y a mis Padres por su constante apoyo.

“Pedí a Dios fuerzas para alcanzar el éxito,
y me hizo débil para obedecer con humildad”

“Pedí a Dios estar en primera fila.....
y me coloco en último lugar para que conociera la paciencia y la humildad”

“Pedí a Dios ser yo el centro del mundo.....
y me enseñó que la vanidad me aparta del centro de cualquier cosa”

“Pedí a Dios fama y gloria pero me concedió sencillez
y comprensión para que mi ego no hiera a los demás”.

“Pedí a Dios el mejor auto y veloz...
y me concedió un paso firme por el sendero correcto para
que no atropellara mis sentimientos”.

“Pedí a Dios tener una mansión.... pero me dio una
pequeña casa llena de ternura y amor a lado de mi familia”

“Pedí a Dios salud para hacer cosas grandes,
y me hizo frágil para hacer cosas mejores”

“Pedí a Dios riquezas para ser feliz,
y medio pobreza para hacerme sabio”.

“Pedí poder para obtener el aplauso de los hombres,
y me dio debilidad para sentir la necesidad de Dios”.

“pedí todas las cosas para disfrutar de la vida,
y me dio vida para disfrutar de todas las cosas”.

“No recibí nada de lo que pedí,

Pero todo lo que había esperado, casi a pesar de mí, obtuve lo que pedí sin expresarlo, y
soy entre los hombres el más ricamente bendecido”.

(Anónima)

ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Índice de contenido	vi
Resumen	ix
Capítulo I	1
Introducción	
1.1.Marco Institucional	1
1.2.Planteamiento del problema	2
1.3.Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4.Justificación	2
Capítulo II	4
Marco Teórico Referencial	
2.1. Antecedentes históricos	4
2.2. ¿Qué es fundición?	5
2.3. Fundición en Bolivia	6
2.4. Tipos de hornos	7
2.4.1. Horno eléctrico	8
2.4.2. Horno de inducción	9
2.4.3. Horno de arco eléctrico	10
2.4.4. Horno de cubilote	12
2.4.5. Definición de horno crisol	14
2.4.5.1. Crisol móvil	16
2.4.5.2. Crisol estacionario	16
2.4.5.3. Crisol basculante	17
2.5. Selección del horno	18
2.6. Materiales no ferrosos	19
2.6.1. Clasificación de los metales no ferrosos	19
2.6.2. Aluminio y sus aleaciones	20
2.6.2.1. Características físicas	22
2.6.2.2. Propiedades químicas	23
2.6.2.3. Características mecánicas	23
2.6.2.4. Clasificación de las aleaciones de aluminio	24
2.6.2.5.Fundición de aluminio	25
2.6.3. El cobre	27

2.6.3.1. Aplicaciones del cobre	28
2.6.3.2. Aleaciones de cobre	28
2.6.3.3. Los cobres débilmente aleados	30
2.6.3.4. Fundición del cobre	30
2.7. Materiales refractarios	31
2.7.1. Tipos de prefabricados	32
2.7.1.1. Prefabricados	32
2.7.1.2. Aislantes prefabricados	37
2.7.2. Sistema de suministro de energía: El quemador	38
2.7.2.1. Reacción de Combustión	39
2.7.3. Llama	40
2.7.4. Poder calorífico	42
2.7.4.1. Poder calorífico superior	42
2.7.4.2. Poder calorífico inferior	42
2.8. Conversión del calor dentro del horno	42
2.9. Crisol	46
Capítulo III	49
Desarrollo del Trabajo	
3.1. Consideraciones para la construcción del horno	49
3.2. Parámetros de construcción de un horno de crisol	50
3.3. Elección del crisol	50
3.4. Dimensiones del horno crisol	52
3.4.1. Cálculo de diámetro interior y altura interior	52
3.5. Elección y dimensión del ladrillo refractario	53
3.5.1. Criterios de selección para refractarios	53
3.5.2. Elección de ladrillo refractario	54
3.5.3. Dimensiones de ladrillos refractarios	54
3.6. Elección de la carcasa	55
3.7. Requerimientos energéticos	56
3.7.1. Energía requerida para llevar a cabo la fusión del metal	56
3.8. Proceso constructivo del horno de crisol estacionario	61
3.8.1. Cilindrado de la carcasa	61
3.8.2. Unión de plancha y soportes	62
3.8.3. Adquisición de ladrillos refractarios	63
3.8.4. Moldeados de los ladrillos refractarios	64
3.8.5. Construcción de la cubierta	65
3.8.6. Instalar lana de vidrio	67
3.8.7. Instalar la tapadera	68
3.8.8. Instalación de turbina y quemador	68
3.8.8.1. Características de motor	69
3.8.9. Instalación de crisol	72
3.9. Costo de producción	74
Conclusiones y recomendaciones	

5.1. Conclusiones	75
5.2. Recomendaciones	77
5.3. Anexos	78
5.4. Referencias bibliográficas	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espada típica de la edad de bronce	5
Figura 2. Material en estado líquido	6
Figura 2. Horno eléctrico de resistencia	9
Figura 4. Partes de horno de inducción	11
Figura 5. Partes de horno de arco eléctrico	12
Figura 6. Partes de horno de cubilote	13
Figura 7. Versión típica de un horno estacionario con crisol removible	14
Figura 8. Crisoles de grafito utilizados en hornos de crisol	15
Figura 9. Horno de crisol estacionario	16
Figura 10. Horno de crisol basculante	17
Figura 11. Clasificación de los metales no ferrosos	20
Figura 12. Esquema de producción de aluminio por método Bayer	21
Figura 13. Propiedades mecánicas en función de la pureza del aluminio	25
Figura 14. Esquema de extracción de cobre	29
Figura 15. Mezcla monolítica	35
Figura 16. Diferentes tipos de llama en un mechero bunsen	41
Figura 17 Dimensiones de referencia del crisol	50
Figura 18. Boceto de horno crisol	51
Figura 19. Ladrillos refractarios	54
Figura 20. Diagrama que muestra el diámetro interior y exterior	54
Figura 21. Esquema de un corte transversal del horno	55
Figura 22. Unión de soportes de estabilidad	62
Figura 23. Armado de ladrillos refractarios	58
Figura 24. Arena refractaria	63
Figura 25. Bauxita, ladrillo refractario molido	63
Figura 26. Moldeado de ladrillo refractario.	64
Figura 27 Armado de la cubierta con los ladrillos refractarios	65
Figura 28 Instalación de lana de vidrio o manta refractaria	66
Figura 29. Instalación de turbina o venterol con el quemador	67
Figura 30. Turbina o venterol seleccionada	68
Figura 31. Turbina conectado con su motor	69
Figura 32. Flujo de colada de una pieza	69
Figura 33. Ensamble de horno crisol	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efectos de maquinado en el aluminio y sus aleaciones	22
Tabla 2. Resumen de las características físicas del aluminio	23
Tabla 3. Propiedades de tracción en función del % de trabajo en aluminio	24
Tabla 4. Propiedades Mecánicas del aluminio puro a temperaturas ambiente	24
Tabla 5. Intervalo de composición química y temperatura típica de operación para las diferentes clases de ladrillos de arcilla refractaria	32
Tabla 6. Propiedades típicas de los refractarios	35
Tabla 7. Propiedades físicas de los materiales aislantes.	38
Tabla 8. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiometríca de algunos combustibles.	40
Tabla 9. Formas comunes de crisoles para fundir metales	47
Tabla 10. Parámetros de construcción para el horno de crisol	50
Tabla 11. Características de motor para turbina	68
Tabla 12. Influencia de condiciones de venterol en la temperatura	70
Tabla 13. Temperaturas en las paredes del horno	70
Tabla 14. Instalación correcta del crisol dentro de cámara de horno	72
Tabla 15. Costo de construcción de horno crisol	73

ANEXOS

1. Anexo 1. Crisol elegido AGF 10 FORMATO A
2. Anexo 2. Guía de capacitación laboral en señalización de seguridad

RESUMEN

Con el presente Trabajo de Aplicación se desarrollara la construcción de un horno para fundición de materiales no ferrosos en específico de los materiales de ALUMINIO Y COBRE, con fines didácticos y de investigación para los estudiantes de la materia de TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES.

En este horno el metal no ferroso que se fundirá se halla en el interior de un crisol fabricado de grafito. Este crisol se posiciona en el interior de la cámara de combustión cilíndrica, que a su vez está formada internamente por un revestimiento refractario de ladrillo de alto contenido de alúmina, cemento refractario, cemento refractario, chamota, arena de silicio y externamente por una carcasa de lámina de acero, calentados mediante un sistema de combustión de gas natural, impulsado por un flujo de aire mediante un quemador y una turbina o venterol.

El horno de crisol tipo estacionario con crisol removible es el más adecuado para la necesidad que se requiere en la enseñanza de los estudiantes de la materia de Tecnología de los Materiales.

El crisol que se almacenara el metal fundido tiene una capacidad de 10 Kg, que será ideal para el proceso de enseñanza además que a partir de la capacidad del crisol de grafito o arcilla grafitada tipo AFG 10 – 30K, se realiza los cálculos de las dimensiones internas y externas del horno, que nos ayudara para la elección del quemador y la turbina o venterol.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

En vista que la carrera de MECÁNICA INDUSTRIAL está en pleno desarrollo tecnológico, sus metas inmediatas son brindar una enseñanza de calidad a los estudiantes, integrando los conocimientos teóricos con experiencias prácticas a través del laboratorio de fundición, para tener un contacto más cercano el procesamiento de los materiales, procesos energéticos, tecnológicos y de intercambio térmico.

Es en ese sentido se realizara un HORNO DE FUNDICIÓN para los metales no ferrosos para su construcción. Es importante aprovechar mediante este TRABAJO DE APLICACIÓN que será beneficioso para la carrera de Mecánica Industrial.

1.1. MARCO INSTITUCIONAL.

En la carrera de Mecánica Industrial siempre se encuentra en constante actualización de métodos y modelos de enseñanza para la formación de futuros profesionales en diversas áreas, en las cuales se encuentra el área de soldadura, donde se da el estudio de materiales, propiedades de los metales y procesos de mejoramiento de diferentes materiales.

En la carrera de Mecánica Industrial, con el pasar del tiempo desde su inicio se vio un gran crecimiento respecto a sus ambientes y maquinas, aun así hay mucho más que incorporar para mejorar los talleres y laboratorios, tal es el caso del laboratorio de tecnología de los materiales, que cuenta con un horno crisol que se encuentra en condiciones desfavorables de funcionamiento.

En la materia de tecnología de los materiales cuenta con la parte de laboratorio en donde se ve el análisis de la fundición de los materiales, y el presente trabajo de aplicación va encaminada al estudio y construcción del horno de fundición.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la carrera de Mecánica Industrial se cuenta con un horno de fundición que no se encuentra en perfectas condiciones de manejo, de la cual se llegaría a mejorar la construcción y características técnicas de un horno de fundición de crisol estacionario, en la cual la carrera va creciendo de población estudiantil y con el horno que se cuenta no se llegaría a una eficiente enseñanza y mucho más que el proceso de fundición no es instantáneo y con un horno ineficiente no se alcanzaría a realizar una práctica con los cálculos de tiempo que se realizan antes del proceso de fundición.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

Construir un HORNO para fundición de metales no ferrosos, utilizando un hogar y crisol, calentados mediante un sistema de combustión con gas natural impulsado por flujo de aire. El horno se encuentra provisto de un mecanismo de protección, en función de la necesidad y satisfacción del proceso de enseñanza practica de los estudiantes de la asignatura de Tecnología de Materiales.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Seleccionar los componentes como ser quemador y ventilador para el flujo de aire para lograr un caudal de llama de combustión de forma espiral que envuelva el crisol para lograr máximas temperaturas de fusión.
- Determinar los parámetros de construcción del horno de crisol
- Describir el proceso de construcción del horno de crisol
- Calculo de costo de producción del horno de crisol

1.4. JUSTIFICACIÓN.

Considerando que en la misión y visión de la carrera está incorporada la investigación dentro de los diferentes ámbitos de formación profesional, la construcción de un

HORNO CRISOL para FUNDICIÓN contribuirá a la implementación de un laboratorio de tecnología de materiales y manufactura, que permitirá la incursión en la investigación del desarrollo de aleaciones de metales.

En la carrera de Mecánica Industrial, constantemente actualizan y mejoran en el proceso de enseñanza a su población estudiantil, en el cual muy por de lado de la teoría se realiza prácticas de laboratorio en diversas asignaturas, tal es el caso de la materia de Tecnología de los Materiales, donde se realizan prácticas de laboratorio en procesos de fundición, de tal manera que se requiere de diversos instrumentos para la práctica de la fundición.

El laboratorio de la materia de Tecnología de los Materiales cuenta con un horno de fundición que no se encuentra en condiciones óptimas de funcionamiento, por lo consiguiente se vio con la necesidad de construir un nuevo horno para la práctica del procesos de fundición y apoyar a la formación de los estudiantes que cursan la materia.

Con la construcción del horno de crisol para fundición tipo estacionario se realizara una mejora en cuanto al volumen que se requiera a fundir, el tipo de material que se podrá fundir, mejorar las características técnicas del horno.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

El presente Trabajo de Aplicación estará sustentado por las siguientes teorías y enfoques.

2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

En Centroamérica, durante la época de la colonia, la técnica de fundición fue mayormente utilizada para la elaboración de herramientas, armas, elementos decorativos, etc., la forja y la fundición dentro de este ámbito se han mantenido muy relacionadas una con la otra, pues el maestro fundidor tenía conocimientos de herrería y forja. En el siglo XX surgieron talleres de herreros forjadores y fundidores que brindaban este servicio para una creciente demanda de herramientas y elementos realizados por medio de estas técnicas

En un primer momento de la fundición los moldes empleados eran de piedra, donde se tallaba la figura del elemento a elaborar. Para aquel entonces, el nivel alcanzado en el tallado en piedra permitía trabajos muy finos. Posteriormente se avanzó a la edad de bronce donde se empezaron a emplear técnicas para mejorar la solidez del metal fundido como también el uso de moldes compuestos por dos partes para elaborar piezas que tenían simetría bilateral, para este último se procuraba que la luz del elemento fabricado concordara con el filo, al cual se le daba forma en el acabado.

Al referirse a los metales fundidos, mayormente se encuentra el manejo del plomo y aluminio y en algunos casos bronce por ser metales que requiere de una temperatura inferior o igual a los 1000 °C, temperatura que estos artesanos podían alcanzar sin ningún problema. Hoy en día el oficio de la fundición y los talleres dedicados a esta técnica son escasos, debido a diversos factores que han impedido que se mantenga vigente en una época donde muchos oficios se ven afectados por la industrialización, que brinda los mismos servicios con costos más bajos.

En la actualidad, la fundición se ha situado como uno de los procesos más prácticos para la elaboración de piezas de gran complejidad en cualquier metal. Virtualmente,

cualquier metal que puede ser fundido puede ser vertido en un molde para tomar la forma impresa en este. En términos de valor y volumen en la industria metalúrgica, la fundición se ve superada únicamente por el acero rolado. Anualmente, solo en Estados Unidos, más de 3000 instalaciones fundidoras producen de 12 a 14 millones de toneladas de fundición en las variedades ferrosas y no ferrosas. El valor anual de los productos de fundición se estima que se acerca a los \$20 billones.



Fig. 1. Espada, típica de la edad de bronce, elaborada en cobre arsenical y en molde de dos partes.

2.2. ¿QUÉ ES FUNDICIÓN?

Fundición es el proceso de transformar del estado sólido al estado líquido los metales y sus aleaciones, generando determinada cantidad de calor, bien definida y característica para cada metal y aleación. También se entiende que la fundición de metales es el proceso de fabricación de piezas mediante el colado del material derretido en un molde.



Fig. 2. Material en estado liquido en un crisol

2.3. LA FUNDICIÓN EN BOLIVIA.

El 21 de Julio de 1966 después de 20 años de la muerte del presidente Villarroel, el presidente Ovando Candía, anuncio que en operación estrictamente y ejecutada por su ministerio de Minería, Eduardo Méndez Pereira, se había firmado un convenio con la firma de Klockner Industries Anlagen GmbH de Alemania para el establecimiento de hornos de fundición de estaño de baja ley en Bolivia, subrayo que la gestión tuvo que ser rigurosamente secreta en vista que los intereses internacionales y nacionales que se oponían a las fundiciones.

La producción en la gestión 1978 del estaño metálico de la Empresa Metalúrgica Vinto subió el valor a más de 200 millones de dólares por año. El aprovisionamiento de minerales a la empresa metalúrgica Vinto (EMV) ha estado a cargo predominante a cargo de las cooperativas mineras, Comibol y la minería mediana y chica.

En la gestión 1994, luego de 16 años Vinto ha producido un total de 144 444 toneladas métricas finas de metales, con un valor de 437 630 000 de dólares americanos, de este total las cooperativas han producido 41.000 toneladas que les ha permitido obtener 139.000 millones de dólares americanos.

De 1994 al 2014 luego de 20 años, de la parte negativa (EMV) es la pregonada habilitación, instalación y funcionamiento del horno AUSMELT que no funciona, en este

los factores productivos de materia prima cuya alimentación de concentrados se hace muy importante para el funcionamiento normal de la fundición.

Después de varias décadas se puso en marcha la fundición en Karachipampa, proyecto que se convirtió en un “Elefante Blanco”, gracias a las inversiones del momento y a un largo proceso de rehabilitación comenzó a caminar con la producción de lingotes de plomo y plata con valor agregado que significa obtener buenas utilidades para nuestro país.

La fundición de Karachipampa comenzó a instalarse el año 1979 concluyendo el año 1984, después de 30 años de paralización por múltiples razones se logró poner en marcha el julio de 2014, destinando a fundir lingotes de plomo y plata.

2.4. TIPOS DE HORNOS

Cuando se habla sobre los hornos, se puede referir a una cantidad y tipos de sistemas diferentes, en el presente trabajo se presenta un acercamiento teórico a la fundición de metales, en la cual se ha de mencionar las distintas clases de hornos que existen.

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Estos varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos pocos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto de hasta varios centenares de toneladas de capacidad. El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinado por los siguientes factores:

- Necesidades de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida (ahorro de energía y de tiempo).
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición (control de calidad).
- Producción requerida del horno (productividad y economía).
- El costo de operación del horno (productividad y economía).
- Interacción entre la carga, el combustible y los productos de la combustión.

Los tipos de hornos que se usan en un proceso de fundición son:

- Horno eléctrico.
- Horno de inducción.
- Horno de arco eléctrico.
- Horno de cubilote.
- Hornos de crisol (estacionario y basculante).

La aplicación de cada uno de estos hornos depende de factores como: cantidad de volumen a fundir, tipo de materiales a fundir, capacidad económica, tipo de industria, etc.

2.4.1. HORNO ELÉCTRICO.

El tipo más sencillo de horno eléctrico es el horno de resistencia, en el que se genera calor haciendo pasar una corriente eléctrica por un elemento resistivo que rodea las paredes internas del horno.

El elemento calefactor puede adoptar la forma de una bobina de alambre enrollada alrededor de un tubo de material refractario o puede consistir en un tubo de metal u otro material resistivo, como el carborundo.

Los hornos de resistencia son especialmente útiles en aplicaciones en las que se necesita un horno pequeño cuya temperatura pueda controlarse de forma precisa.

El horno del laboratorio cuenta con un controlador de temperatura que permite regular la temperatura a la que se encuentra el horno y realizar curvas de calentamiento para procesos que requieren cambios de temperatura controlados en el tiempo.



Fig. 3. Horno Eléctrico de resistencias

El sistema de control de temperatura del horno es de tipo PID, (Proporcional, Integral, Derivativo). La acción proporcional modula la respuesta del sistema, la integral corrige la caída o el aumento de la temperatura, y la derivativa, previene que haya sobrecarga en el sistema. Este tipo de control, regula la temperatura de forma tal que a medida que se acerca a la medida deseada, hay un comportamiento para acercarse en forma suave y controlada al valor final requerido.

2.4.2. HORNO DE INDUCCIÓN.

Un horno de inducción es un horno eléctrico en el que el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor (un metal) en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas.

Una ventaja del horno de inducción es que es limpio, eficiente desde el punto de vista energético y es un proceso de fundición y de tratamiento de metales más controlable que con la mayoría de los demás modos de calentamiento. Otra de sus ventajas es la capacidad para generar una gran cantidad de calor de manera rápida.

Las fundiciones más modernas utilizan este tipo de horno y cada vez más fundiciones están sustituyendo los hornos eléctricos por los de inducción, debido a que aquellos generaban mucho polvo entre otros contaminantes. El rango de capacidades de los hornos de inducción abarca desde menos de un kilogramo hasta cien toneladas y son utilizados para fundir hierro y acero, cobre, aluminio y metales preciosos. Uno de los principales inconvenientes de estos hornos es la imposibilidad de refinamiento; la carga de materiales ha de ser libre de productos oxidantes y de ser una composición y algunas aleaciones pueden perderse debido a la oxidación.

Un horno de inducción en funcionamiento normalmente emite un zumbido, silbido o chirrido, debido a la magnetostricción, cuya frecuencia puede ser utilizada por los operarios con experiencia para saber si el horno funciona correspondiente o a que potencia lo está haciendo.

2.4.3. HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.

Los hornos de arco están formados por una chapa de acero revestida de material refractario, provista de electrodos de grafito o de carbón amorfo. Los electrodos de carbón amorfo se forman en los mismos hornos, llenando las camisas que llevan los porta-electrodos de una mezcla formada por antracita, cok metalúrgico, cok de petróleo y grafito amasados con alquitrán.

El arco salta entre los electrodos por intermedio del baño, y aunque se construyen en monofásicos, generalmente son trifásicos. Con los tres electrodos verticales dispuestos en los vértices de un triángulo equilátero. La cuba es cilíndrica, revestida con un material ácido o básico que reposa sobre los ladrillos refractarios. La bóveda está revestida de ladrillos de sílice, que resiste temperaturas de hasta 1600°C y es desplazable para facilitar la carga.

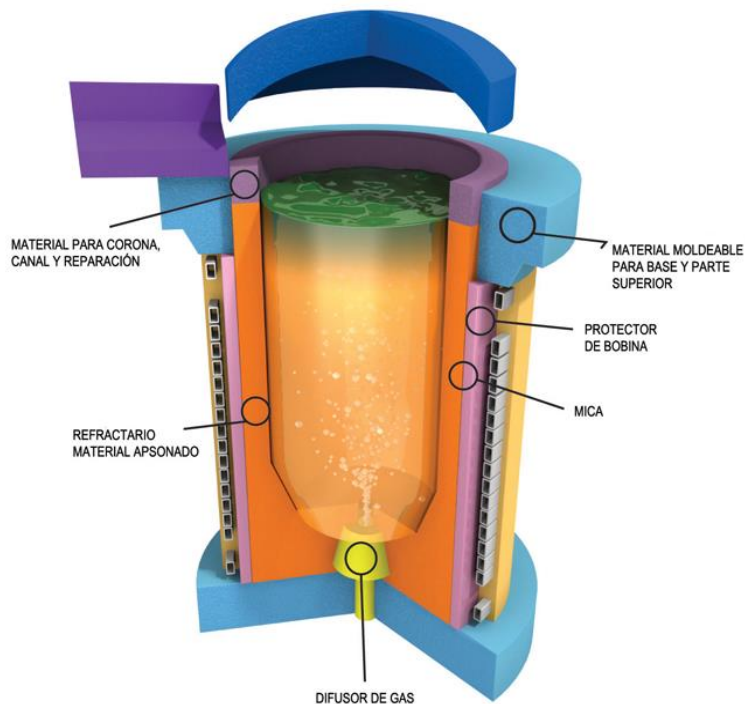


Fig. 4. Partes de Horno de Inducción

El cierre de estos hornos es hermético, logrando la estanqueidad de los orificios de paso, por medio de los cilindros refrigerados por camisas de agua que prolongan además la vida de los electrodos.

Los hornos trabajan a tensiones comprendidas entre los 125 y 500 voltios, obteniéndose dentro de cada tensión la regulación de la intensidad y por lo tanto de la potencia del horno por el alejamiento o acercamiento de los electrodos al baño lo que se realiza automáticamente.

Casi todos los hornos de este tipo son basculantes para facilitar la colada. Algunos llevan un sistema de agitación electromagnética del baño por medio de una bobina montada bajo la solera del horno.

Los hornos eléctricos de arco se emplean en baños de sales y para la fusión de acero, fundición de hierro, latones, bronce, aleaciones de níquel, etc.

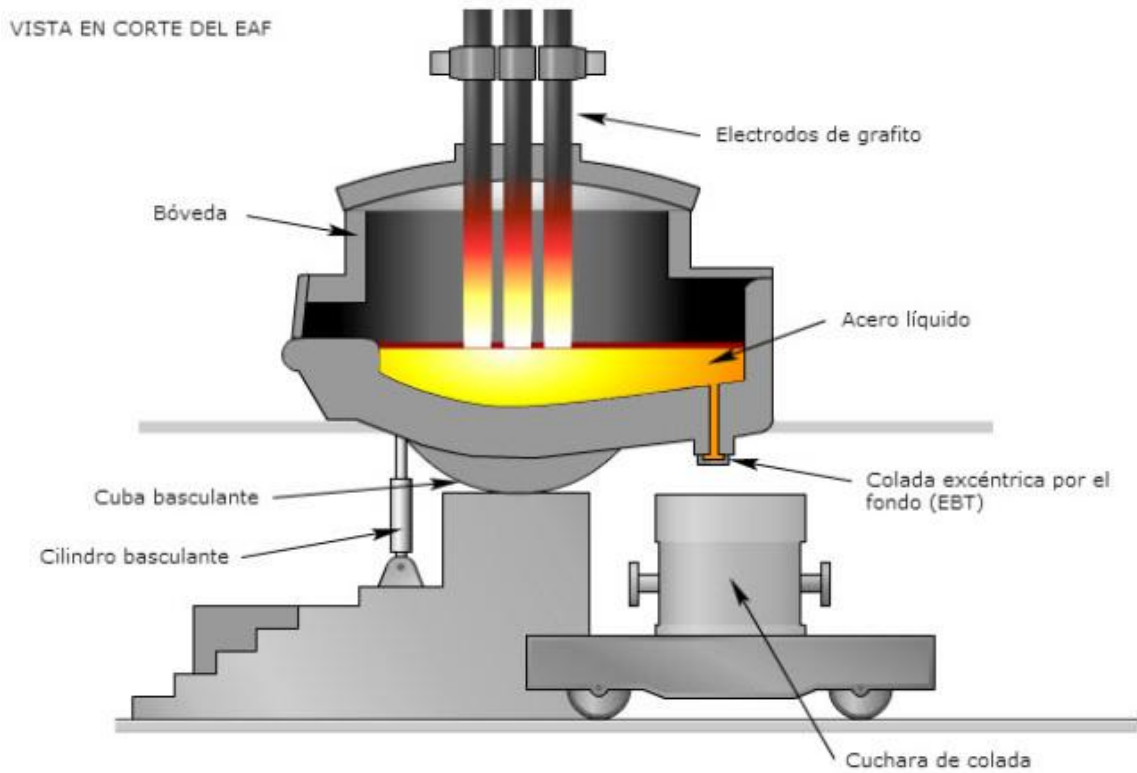


Fig. 5. Partes de Horno de Arco Eléctrico.

2.4.4. HORNO CUBILOTE

Los hornos de cubilote para fundir hierro son tipo cuba vertical de sección cilíndrica, donde se refunde chatarras de hierro y acero, así como lingotes de arrabio utilizando como combustible coque y como fundentes caliza y espato flúor. La combustión del combustible se hace por la inyección de aire a presión, por toberas que se encuentran arriba del crisol, para lo cual se utiliza un soplador.

La carga se hace por una puerta que se encuentra en la parte superior, aproximadamente a la mitad de su altura. Los gases de la combustión suben a través de la carga, que va descendiendo, precalentándola.

En el crisol hay dos piqueras, la superior para salida de la escoria, y la inferior para salida del metal. El refractario de las paredes suele ser ácido y el crisol puede ser de grafito refrigerado por agua. El fondo consiste en arena sílice fuertemente apisonada con

declive hacia la piquera del metal la carga se va haciendo en capas de metal, coque y fundentes sucesivamente.

El coque es un carbono furo, poroso, desprovisto de la mayoría de materia volátil por una combustión incompleta partiendo de carbón mineral, llevada a cabo en compartimientos cerrados en los que se alcanza a temperatura de fusión, enfriándose después bruscamente. Se clasifica por su contenido de carbón fijo, tamaño y uso final, como por ejemplo el coque para fundición.

La mayoría de los cubilotes tienen el fondo con bisagras para facilitar su descarga al terminar la operación o campaña. Existen cubilotes modernos en los cuales se precalienta el aire para combustión, mejorándose en esta forma su eficiencia.

Los cubilotes son:

- Los únicos hornos de fundición en los cuales la salida de metal puede ser continua.
- De alta producción horaria.
- De relativo bajo costo de operación.
- Sencillos de operar.

Sin embargo estos hornos se han ido sustituyendo por hornos de inducción, los cuales permiten un mejor control del análisis químico y temperatura del metal y sobretodo son menos contaminantes.

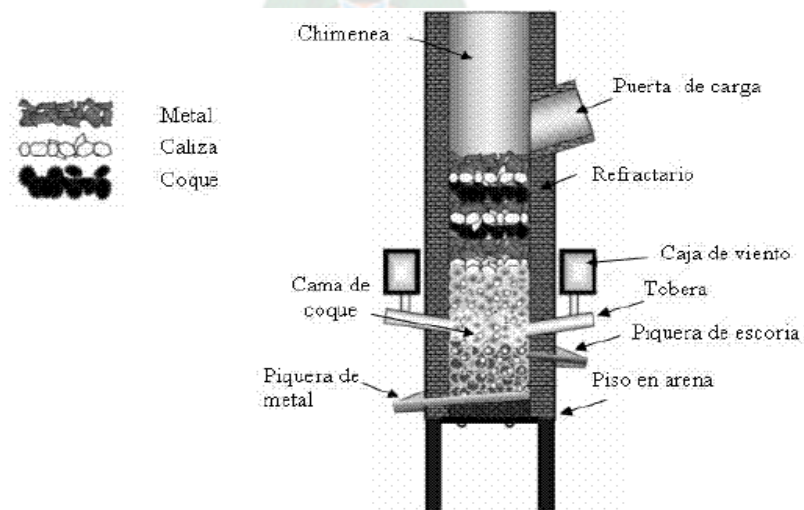


Fig. 6. Partes de Horno de Cubilote.

2.4.5. DEFINICIÓN DE HORNO CRISOL

De manera sencilla un horno de crisol no es más que una recámara a la cual se le suministra energía, almacena calor y promueve la transferencia de este a un metal contenido en un recipiente conductor del calor y resistente a la acción del metal y a las altas temperaturas denominado crisol, el cual permite fundir el metal en su interior para luego ser vertido a un molde previamente preparado.

Los hornos de crisol trabajan por combustión de un elemento como el gas el cual calienta el crisol que contiene el metal fundido. También, puede ser calentado usando energía eléctrica, horno de inducción, en la Fig.7 se puede observar un modelo de horno de crisol removible.

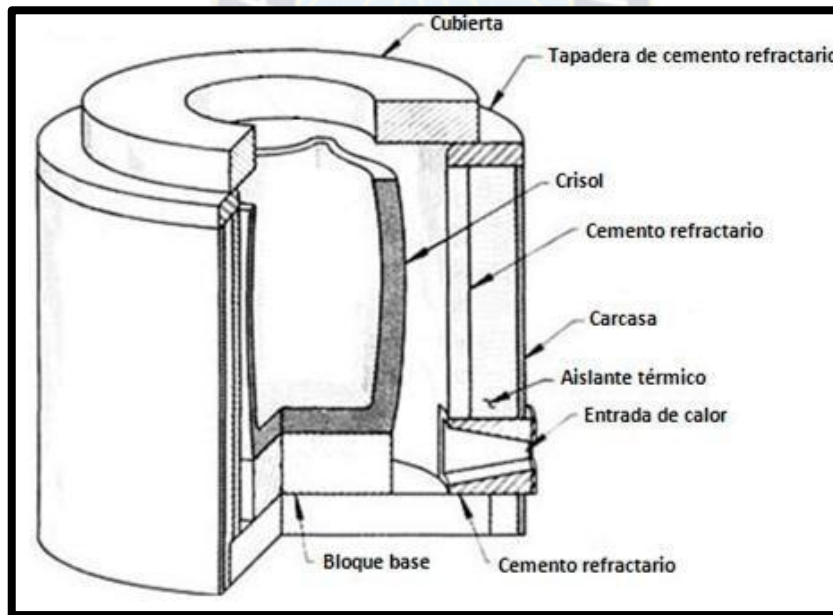


Fig. 7. Versión típica de un horno estacionario con crisol removible

El crisol se apoya sobre la base que está hecha también en material refractario y le da la posición necesaria con respecto a la salida del gas.

Para lograr concentrar el calor alrededor del crisol este está contenido entre unas paredes refractarias que generan una cavidad para el flujo de los gases de combustión.

El crisol es un recipiente que se coloca dentro de los hornos para que reciba el metal fundido. Normalmente está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla y puede soportar materiales a altas temperaturas (ver Fig. 8.), como el bronce fundido, o cualquier otro metal, normalmente a más de 500 °C.

En la actualidad los hornos de crisol ofrecen a la industria una gran flexibilidad y una amplia variedad de opciones con respecto al tipo de metal a fundir, reducción y refinación de metales, el tamaño de la fundición, combustibles y técnicas de procesamiento. Aluminio, latón, bronce, cobre, hierro gris y dúctil, acero, magnesio, níquel, aleaciones refractarias, y otras aleaciones y metales han podido ser elaborados utilizando hornos de crisol. La capacidad del crisol puede variar de apenas unas cuantas onzas para fundiciones de laboratorio hasta 1400 kg (3000 lb) para la fundición de aleaciones de aluminio. Entre las opciones para el combustible figuran el carbón, coque, gases comerciales (natural, propano, etc.) y combustibles oleosos; y también existen hornos de crisol eléctricos.

El horno de crisol puede ser usado, a su vez, como un componente del conjunto de equipos para ajustar la calidad entre el horno fundidor y el de colada, para modificar la composición química y la temperatura del baño que benefician al control de defectos como el contenido de poros antes de la colada. La fundición en crisol es un proceso simple y flexible, generalmente los hornos pueden encenderse o apagarse en cualquier momento.



Fig. 8. Crisoles de grafito utilizados en hornos de crisol

Existen dos tipos de hornos de crisol más utilizados los cuales se pueden definir de la siguiente manera:

2.4.5.1. CRISOL MÓVIL

El crisol se coloca dentro del horno y una vez fundida la carga el crisol se levanta y saca del horno y se usa como cuchara colada.

2.4.5.2. CRISOL ESTACIONARIO.

Es un tipo de horno cuya característica es que el crisol puede removerse del horno para verter el material fundido en los moldes o se extrae de este mediante cucharones (ver Fig.9). Si se trata de un crisol removible se pueden utilizar pinzas y cargadores para levantar y trasladar el crisol hasta los moldes para efectuar la colada, de esta manera se evita la necesidad de transferir el metal fundido a otro contenedor, esto es beneficioso porque se evita el daño potencial del metal en la transferencia. Los hornos de crisol estacionarios son simples, prácticos y fáciles de construir (ver Fig. 9).



Fig. 9. Horno de crisol estacionario.

2.4.5.3. CRISOL BASCULANTE.

Son hornos movibles apoyados sobre un sistema de sustentación. La ventaja aparente que otorga el horno de crisol basculante es la capacidad que tiene este de extraer el metal fundido con mayor facilidad sin la necesidad de exponer a los operarios al calor proveniente de la cámara del horno. Sin embargo, se requiere la fabricación de una base especial, lo suficientemente resistente para soportar el peso del crisol y un sistema que permita el control del giro del horno.

Usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos especiales en que es vaciado directamente en los moldes. Un tipo de horno basculante, con capacidades de 70 a 750 kg de latón, bascula en torno a un eje central (ver Fig. 10 a). Su desventaja es que el punto de descarga acompaña el movimiento basculante. Para superar este inconveniente se desarrolló un horno basculante de eje en la piquera, con capacidad de 200 a 750 kg de latón, y el modelo moderno es basculado por pistones hidráulicos, otorgando la ventaja de un mayor control en la operación de vaciado (ver Fig. 10 b)

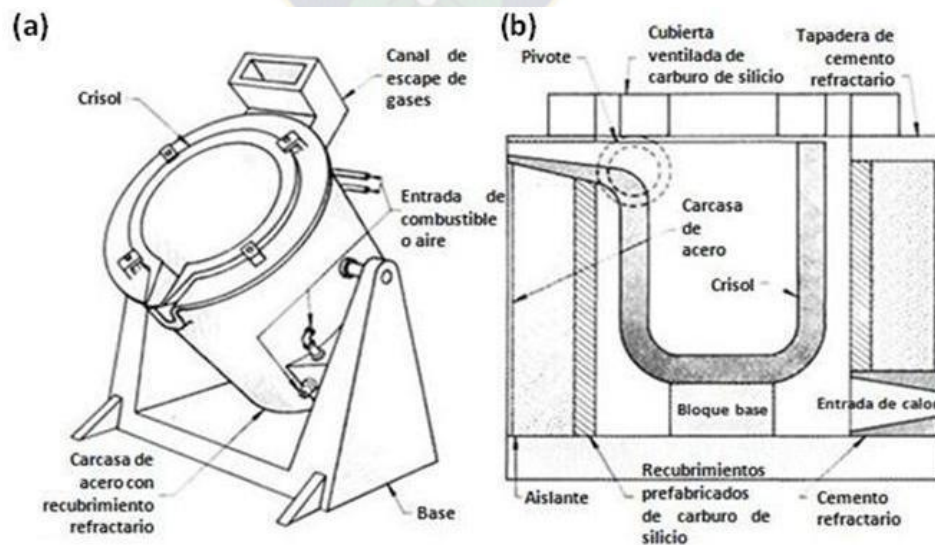


Fig. 10 Horno de crisol basculante:

(a) Eje en el centro de gravedad, y (b) Eje a nivel de la boquilla.

2.5. SELECCIÓN DEL HORNO

Para la selección adecuada del horno se requiere tomar en consideración varios factores que pueden influir de manera significativa en la calidad de las fundiciones, así como la economía de las operaciones de fundición. Dentro de las necesidades de selección de un horno en general depende de los siguientes factores entre otros:

- Consideraciones económicas, como costo inicial, costo de operación y mantenimiento, costo de combustibles.
- La composición y el punto de fusión de la aleación a fundir, así como la facilidad para controlar sus características químicas.
- El control de la atmosfera del horno para evitar contaminación del metal.
- La capacidad y la rapidez de fusión requeridas.
- Consideraciones de tipo ecológico como contaminación del aire y ruido.
- Suministro de energía y su disponibilidad.
- Facilidad de sobrecalentamiento del metal.
- Tipo de material de carga que es posible utilizar.

Considerando el medio de calentamiento se tiene:

- Hornos eléctricos: de arco, arco indirecto, inducción y resistencia.
- Hornos de combustión: por el tipo de combustible, sólido (coque), líquido (diesel o petróleo), gas (natural o GLP). Si se considera el grado de contacto de los productos de combustión con el metal a fundir se pueden considerar aquellos sistemas de fusión en que el combustible (coque) está en contacto con el mineral (alto horno) o con el metal como en el cubilote. Por otra parte, en ocasiones los gases de combustión transfieren el calor directamente al metal a fundir, como en el horno reverbero y el de hogar abierto. En otras unidades de fusión el calentamiento es indirecto, como en todos los hornos de crisol.
- El horno de cubilote (cúpola furnace) ha sido empleado desde varios siglos en la producción de hierro gris, las restricciones en cuanto al control de la composición han dado como consecuencia que este se emplee en combinación con hornos de inducción, los que actúan como unidades de mantenimiento de

temperatura y ajuste de composición. El horno de cubilote es una unidad de proceso semi continuo diseñada para trabajar en campañas con duración de 6 horas a varios días, en algunos casos. Estos se encargan por la parte superior y su longitud vertical está limitada para garantizar el calentamiento y fusión del material, almacenándose este en su parte baja denominada crisol.

2.6. MATERIALES NO FERROSOS.

Los metales no ferrosos son aquellos en cuya composición no se encuentra el hierro. Los más importantes son siete: cobre, zinc, plomo, estaño, aluminio, níquel y magnesio. Existen otros elementos que con frecuencia se fusionan con ellos para preparar aleaciones de importancia comercial. También se tienen alrededor de 15 metales menos importantes que tienen usos específicos en la industria. Los metales no ferrosos se clasifican en tres grupos: Pesados: son aquellos cuya densidad es igual o mayor que 5 kg/dm³. Ligeros: su densidad está comprendida entre 2 y 5 kg/dm³. Ultraligeros: su densidad es menor que 2 kg/dm³.

2.6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS METALES NO FERROSOS.

Dependiendo de sus características, estos materiales sustituyen con ventaja a los derivados del hierro en múltiples aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, su proceso de fabricación o fundición resultan más costosos debido a diversas razones, entre las que destacan las siguientes:

- La baja concentración de algunos de estos metales es la corteza terrestre.
- La energía consumida en los procedimientos de obtención, y afino, ya que la mayoría de los casos, se trata de procesos electrolíticos para los que se emplea energía eléctrica.
- La demanda reducida, que obliga a producirlos en pequeñas cantidades.
- Pueden clasificarse de acuerdo a su densidad, esta clasificación se presenta en la figura siguiente (ver Fig. 11).

Los metales no ferrosos de mayor aplicación industrial son el cobre y sus aleaciones, el aluminio y sus aleaciones, el plomo, el estaño y el cinc. Otros como el mercurio y el tungsteno, se aplican en ámbitos industriales muy específicos.

Los demás metales casi nunca se emplean en estado puro sino formando aleaciones, como son para este caso el níquel, cromo, titanio o manganeso.

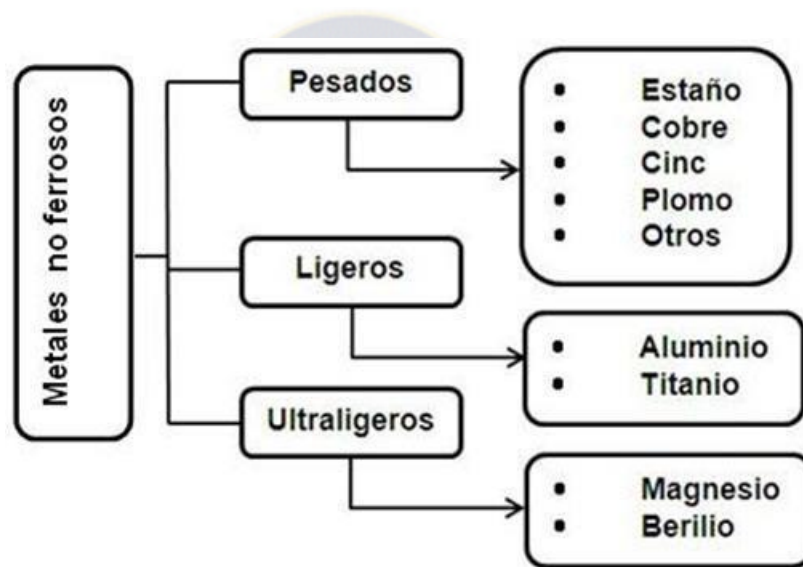


Fig. 11. Clasificación de los metales no ferrosos

2.6.2. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H.C. Oersted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo costo de reciclado y su larga vida útil.

Como metal se extrae del mineral conocido con el nombre de bauxita, primero se transforma en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio mediante electrólisis, el esquema del proceso se presenta en la Fig. 12.

El aluminio posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en las aplicaciones industriales de la ingeniería mecánica, tales como su baja densidad de 2.7 kg/m^3 y su alta resistencia a la corrosión. Mediante la aleación adecuada se puede

aumentar considerablemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa), es buen conductor de la electricidad, se maquina con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello, el aluminio es el metal que más se utiliza después del acero.

También, el aluminio responde satisfactoriamente a algunos mecanismos de endurecimiento. En la Tabla 1., se presentan las propiedades mecánicas del aluminio reconocido comercialmente como puro y de las aleaciones endurecidas mediante diversas técnicas. Unas aleaciones de aluminio pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

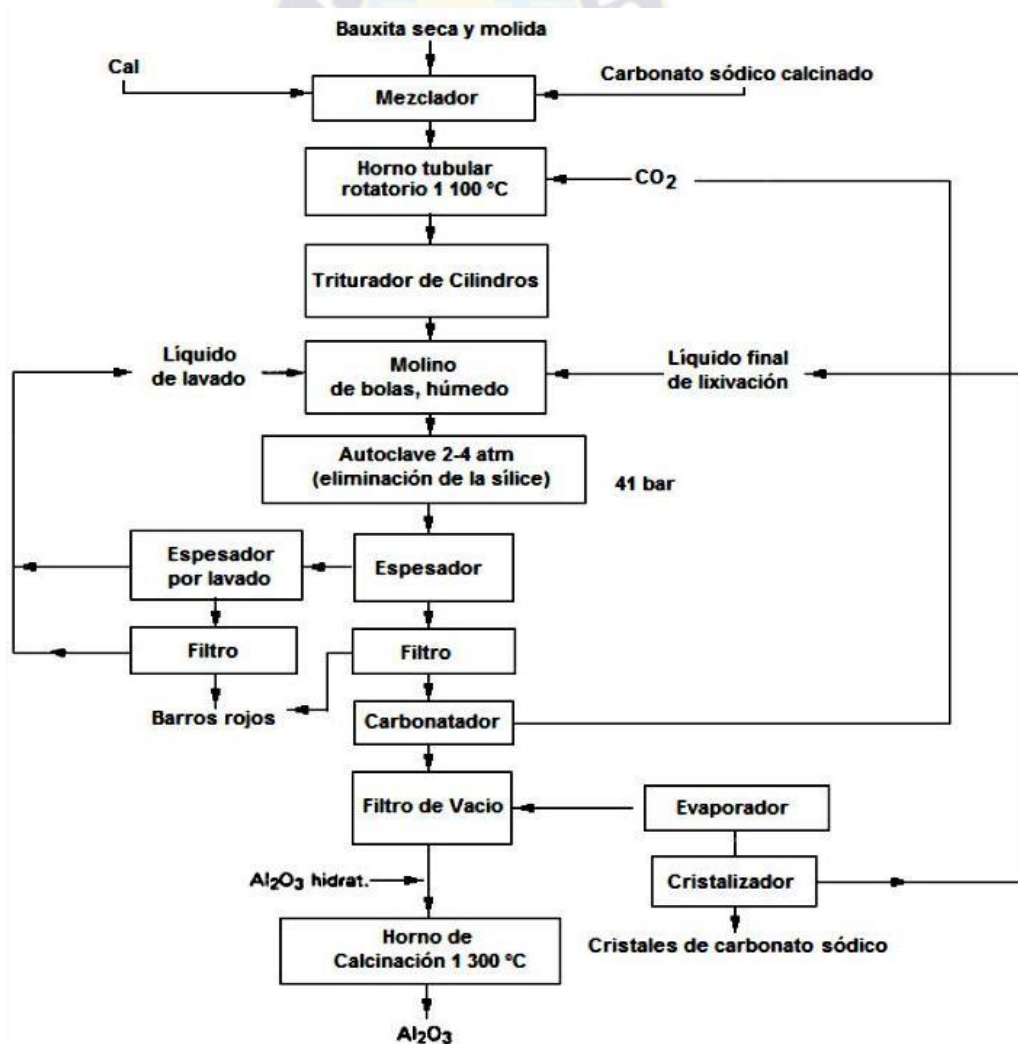


Fig. 12. Esquema de producción de aluminio por el método Bayer

2.6.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las propiedades físicas más importantes del aluminio son alta conductividad eléctrica y térmica, comportamiento no magnético y excelente resistencia a la corrosión. Este elemento reacciona con el oxígeno, incluso a temperatura ambiente, para poder producir una capa extremadamente delgada de óxido de aluminio que protege el metal interno de muchos entornos corrosivos.

Sin embargo, el aluminio no exhibe, un marcado endurecimiento, por lo que puede ocurrir falla por fatiga incluso a esfuerzos bajos. Debido a la baja temperatura de fusión, no trabaja bien a temperaturas elevadas. Finalmente, las aleaciones de aluminio tienen baja dureza, lo que conlleva a una baja resistencia al desgaste.

Tabla 1. Efectos de maquinado en el aluminio y sus Aleaciones

Material	Resistencia a la tensión,	Esfuerzo de cedencia,	Elongación
Aluminio puro	6,500	2,500	60
Aluminio puro Comercial	13,000	5,000	45
Aleación de aluminio endurecida por solución solida	16,000	6,000	35
Aluminio trabajado en frío	24,000	22,000	15
Aleación de aluminio endurecida por dispersión	42,000	22,000	35
Aleación de aluminio endurecida por envejecimiento	83,000	73,000	11

Tabla 2. Resumen de las características físicas del aluminio

Propiedades	Valores
Color	Blanco-plata
Estructura Cristalográfica	Cúbica centrada en las caras
Parámetro reticular a 25 °C	0.40414 nm
Densidad a 20 °C	2.699 g/cm ³
Cambio volumétrico durante la solidificación	6.7%
Temperatura de fusión	660.2 °C
Temperatura de ebullición	2057 °C/ 2480 °C
Calor específico a 20 °C	930 J
Coefficiente lineal de expansión térmico x10 ⁰	23 (20-100 °C)
Conductividad térmica a 0 °C	209.3 W/m·K
Conductividad térmica a 100 °C	207 W/m·K
Resistividad eléctrica a 20 °C	2.69

En la Tabla 2., se presenta un resumen de las propiedades físicas más características del aluminio puro. Algunas de estas propiedades varían según el contenido de impurezas.

2.6.2.2. PROPIEDADES QUÍMICAS

Según el efecto que tienen los elementos aleantes sobre la resistencia a la corrosión del aluminio, éstos se pueden clasificar en:

- Elementos que la mejoran: cromo, magnesio y manganeso.
- Elementos que la disminuyen: cobre, hierro, níquel, estaño, plomo y cobalto.
- Elementos que tienen poca influencia: silicio, titanio, zinc, antimonio, cadmio y circonio.

2.6.2.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Entre las características mecánicas del aluminio se tienen las siguientes:

- Fácil de maquinar.
- Muy maleable y dúctil, permite la producción de láminas muy delgadas y filamentos.
- Material blando (escala de Mohs: 2 a 3).
- Forma aleaciones con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas.
- Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.
- Soldable.

En la Tabla 3., se presenta el cambio de las propiedades mecánicas del aluminio en función del porcentaje de trabajado en frío aplicado, para un aluminio con pureza del 99.999%.

Tabla 3. Propiedades de tracción en función del % de trabajo en aluminio

Cantidad de trabajo en frío, %	Resistencia a la tracción, MPa	Resistencia a la fluencia, MPa	Elongación en 50 mm, %
0 (Recocido)	40-50	15-20	50-70
4	80-90	50-60	15-20
7	90-100	65-75	10-15
9	120-140	100-120	8-12

Las propiedades mecánicas del aluminio, varían de acuerdo a la pureza de éste, como se pueden observar en la Tabla 4 y en la Fig. 13.

Es importante destacar que una pequeña variación en el porcentaje de pureza del aluminio, influye en las propiedades de éste, si a esto se le agrega un tratamiento térmico o trabajado en frío, dicho esfuerzo cambiará significativamente.

Tabla 4., Propiedades mecánicas del aluminio puro a temperatura ambiente.

Pureza %	Esfuerzo de fluencia		Esfuerzo de tracción		Elongación en 50 mm, %	
	MPa	ksi	MPa	ksi		
99.99	10	1.4	45	6.5	50	65
99.80	20	2.9	60	8.7	45	55

2.6.2.4. CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio se pueden dividir en dos grupos de importancia para forja y para fundición, dependiendo de su método de manufactura. Las aleaciones para forja que se conforman mediante deformación plástica tienen composiciones y microestructura significativamente distintas de las creadas para fundición, lo cual refleja los distintos requerimientos del proceso de manufactura.

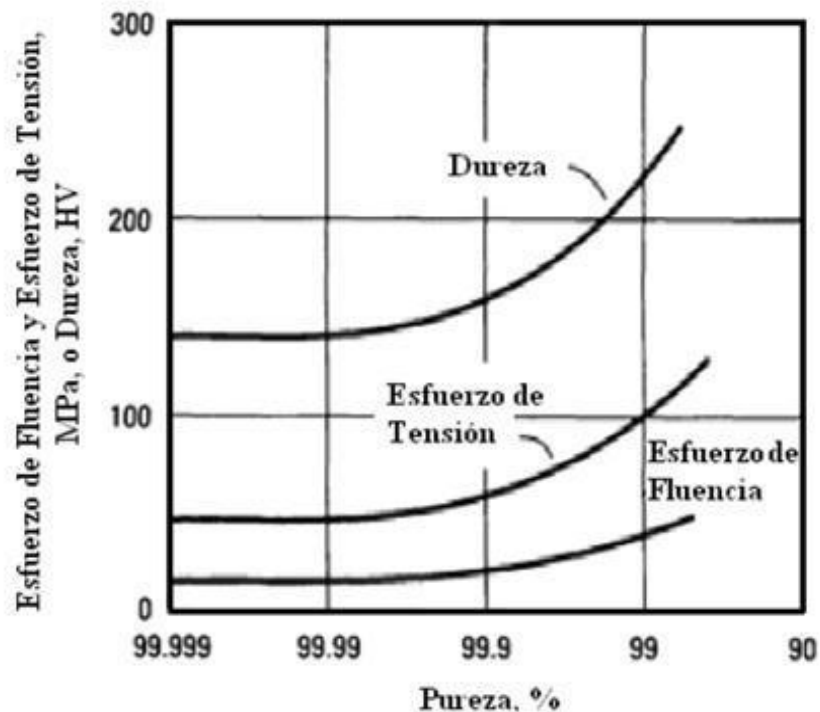


Fig. 13. Propiedades mecánicas en función de la pureza del aluminio

2.6.2.5. FUNDICIÓN DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio son en general las más manejables. El punto de fusión del aluminio puro es 600 °C por consiguiente, las temperaturas de vaciado para las aleaciones de aluminio son bajas comparadas con las de las fundiciones de hierro y acero. Las propiedades que hacen atractivas a estas aleaciones para la fundición son: su peso ligero, su amplio intervalo de propiedades de resistencia que se pueden obtener a través de tratamientos térmicos y su facilidad de maquinado.

Las piezas moldeadas de aleación de aluminio son económicas en muchas aplicaciones. Se utilizan tanto en las industrias automovilísticas, construcción de máquinas, aparatos y estructuras, como también utensilios de cocina, cubiertas y carcasas para equipos electrónicos, y en otras áreas.

La mayoría de los metales reaccionan con los gases oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, los tres de importancia principal en las operaciones de fusión ya que estos causan problemas de porosidad.

Seybolt y Burke (1969) reportaron que las aleaciones de aluminio presentan problemas de porosidad de gas, causada por el hidrógeno. También, estos autores, reportaron una técnica para reducir el contenido de hidrógeno, la cual consiste en permitir que el metal fundido se solidifique en el crisol antes de colarlo, expulsando luego el hidrógeno en exceso por límite de solubilidad en sólido.

Para la mayoría de los metales, la transformación desde el estado líquido al estado sólido se acompaña de una disminución en el volumen. En aleaciones de aluminio, la contracción volumétrica de solidificación comprende un intervalo de 3.5 al 8.5%.

Otro problema que presentan las aleaciones de aluminio es la fisuración en caliente la cual se origina durante la solidificación, cuando se produce la mayor cantidad de contracción y cuando la fundición es menos resistente a los esfuerzos impuestos por las limitaciones geométricas del molde. Este tipo de agrietamiento, es siempre inter granular y es una característica en cierta medida de todas las aleaciones de fundición.

Los problemas de fisuración en caliente pueden minimizarse mediante la selección apropiada del proceso de fundición, el diseño apropiado de moldes, control de la solidificación y el refinamiento de grano.

El diseño de moldes inadecuado es una causa frecuente de fisuración en caliente. Es importante evitar cambios bruscos de sección y ángulos o esquinas redondeadas a un radio inadecuado o fileteado.

Los moldes utilizados para fundir estas aleaciones de aluminio, son generalmente arena seca y otros materiales, tales como yeso y perfiles metálicos. La elaboración, la planificación y el control de la solidificación a través del molde diseñado son necesarios para lograr la estructura y solidez requeridas para suministrar piezas de fundición dentro de la especificación.

2.6.3. EL COBRE

El descubrimiento del cobre fue en el año 6000 a.C. La primera edad del cobre se inició en Egipto y fueron quienes lo extendieron a África y el Mediterráneo durante su colonización. Los egipcios aprendieron a utilizarlo y extraer los minerales, principalmente el oro. Posteriormente se descubrieron las aleaciones, la primera fue la del cobre con estaño, para producir bronce, hecho que tuvo gran trascendencia.

Los primeros trabajadores del cobre descubrieron que éste podía ser martillado y laminado con facilidad, para poder darle otras formas. Posterior al descubrimiento del bronce fue posible fundir gran variedad de piezas.

Durante la edad media se descubrieron las propiedades de corrosión del cobre, bronce y latón haciendo que éstos metales, además de su uso decorativo, tuvieran más usos funcionales.

Gran Bretaña fue el mayor productor de cobre durante un gran período del siglo XIX, lo cual alentó a otros países, como Estados Unidos y Chile, a la búsqueda de nuevos yacimientos.

Según la riqueza de los minerales empleados se pueden utilizar dos técnicas en el proceso de obtención de dicho cobre, las cuales son:

- La vía húmeda; se emplea cuando el contenido en cobre es bajo. Consiste en disolver el material con ácido sulfúrico y recuperar después el cobre mediante electrólisis.
- La vía seca; es la técnica más habitual de obtención de cobre bruto, pero solo se puede utilizar si la riqueza del mineral supera el 10%.

El mineral se somete a un proceso de trituración y molienda hasta reducirlo a polvo. Después, se procede a la separación por flotación del mineral de cobre: éste flota mientras la ganga se deposita en el fondo, en la Fig. 1.9 se puede observar un diagrama del proceso de extracción del cobre.

El mineral húmedo es sometido a un proceso de tostación en un horno; en este proceso se elimina el azufre y se forman óxidos de hierro y de cobre. A continuación, el óxido de cobre sufre un proceso de calcinación en un horno de

reverbero. Los óxidos de hierro se combinan con la sílice y forman la escoria mientras se produce la mata blanca (sulfuro de cobre). La mata blanca se somete a un proceso de reducción en un convertidor similar a los empleados en siderurgia y se obtiene cobre bruto, mezclado con algo de óxido de cobre.

- Afino; El proceso de afino del cobre se lleva a cabo en dos fases: la fase térmica y la fase electrolítica.

En la fase térmica, el cobre bruto se introduce en hornos especiales de afinación, en los que se reduce el óxido de cobre residual mediante gas natural. El cobre que sale del convertidor se vierte en moldes especiales para obtener las planchas que luego serán utilizadas como ánodo en la cuba electrolítica.

En la fase electrolítica, se produce el afino final. El ánodo procede de los moldes de la fase anterior, mientras que el cátodo está formando por finas planchas de cobre puro. Al pasar la corriente, el cobre bruto se disuelve y va colocándose sobre las planchas del cátodo. En el fondo de la cuba se depositan unos barros electrolíticos que contienen pequeñas cantidades de otros metales, como oro y plata, que pueden ser recuperados.

De este modo se consigue cobre electrolítico con una pureza superior al 99.85%.

2.6.3.1. APLICACIONES DEL COBRE

Gracias a su elevada conductividad para el calor y la electricidad, uno de los principales campos de aplicación del cobre es la fabricación de recipientes como calderas, serpentines y alambiques (industria química).

2.6.3.2. ALEACIONES DE COBRE

Las aleaciones de cobre, presentan una mayor resistencia y por ello no pueden utilizarse en aplicaciones eléctricas, no obstante, su resistencia a la corrosión es casi tan buena como la del cobre puro y son de fácil manejo. Las dos aleaciones más importantes son una aleación con cinc (latón) y una aleación con estaño (bronce). A menudo, tanto el

cinc como el estaño se funden en una misma aleación, haciendo difícil una diferenciación precisa entre el latón y el bronce, ambos se emplean en grandes cantidades; también se usa el cobre en aleaciones con oro, plata y níquel, y es un componente importante en aleaciones como el molibdeno, el bronce de cañón y la plata alemana o alpaca.

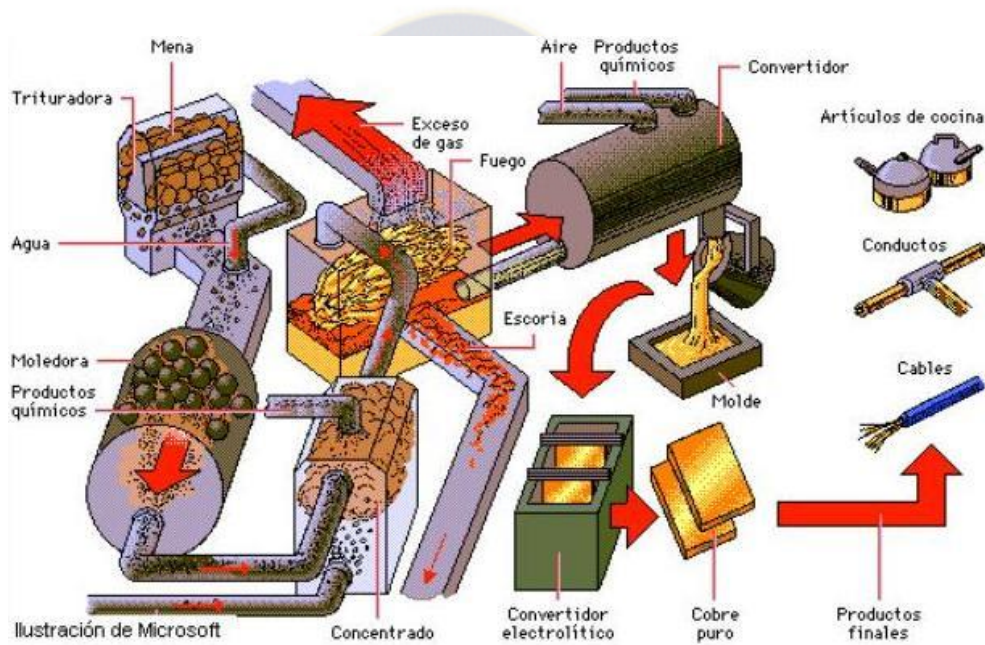


Fig. 14. Esquema de extracción de cobre.

Para tener buena conductividad térmica o eléctrica se debe usar cobre comercialmente puro; si se requiere mayor resistencia mecánica combinada con alta conductividad, se utilizan aleaciones que contienen zirconio u otros elementos. La aleación de cobre más barata es el latón con alto contenido de zinc y por lo común es el que se utiliza salvo cuando se requiere alta resistencia a la corrosión sometida a esfuerzo o a las propiedades mecánicas especiales de otras aleaciones. Cuando se desean buenas propiedades para trabajo en frío, tal como en operaciones de estirado profundo, o formado, se utiliza cuando debe realizarse mucho maquinado, en particular en el trabajo con máquinas automáticas para hacer tornillos.

Los bronce al estaño se utilizan para obtener una alta resistencia con buena ductilidad. Las aleaciones de cobre con aluminio silicio o níquel son buenas por su resistencia a la corrosión.

2.6.3.3. LOS COBRES DÉBILMENTE ALEADOS

Son aquellos que poseen bajo contenido de elementos de adición (menos del 1%) y se utilizan cuando alguna de las propiedades de los cobres propiamente dicha es insuficiente. Como por ejemplo cuando se requiere mejor:

- Resistencia mecánica a temperaturas relativamente elevadas.
- Resistencia a la corrosión
- Soldabilidad
- Resistencia al reblandecimiento y
- Maquinabilidad.

Las composiciones de cobres débilmente aleados son:

- Cobre desoxidado con fósforo o con arsénico.
- Cobre tenaz con plata.
- Cobre exento de oxígeno con plata, Cobre con azufre, y
- Cobre con telurio

2.6.3.4. FUNDICIÓN DEL COBRE

La fundición es el proceso de remover el metal de un mineral calentando para quemar el azufre y otras impurezas y crear un óxido en el proceso. Este mineral oxidado es reducido usando coque o carbón, removiendo el óxido y dejando el metal. La fundición del cobre ha sido una parte de la civilización humana por diez milenios, haciéndolo uno de los primeros metales recolectados y usados para varios propósitos, moviendo a la humanidad más allá de la época neolítica.

2.7. MATERIALES REFRACTARIOS

El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. Los refractarios son materiales inorgánicos, no metálicos, porosos y heterogéneos, compuestos por agregados minerales termoestables, un aglomerante y aditivos. Las principales materias primas empleadas en la elaboración de estos materiales son óxidos de: silicio, aluminio, magnesio, calcio y circonio; y algunos refractarios no provenientes de óxidos como los carburos, nitruros, boratos, silicatos y grafito.

Los materiales refractarios deben mantener su resistencia y estructura a altas temperaturas, resistir los choques térmicos, ser químicamente inertes, presentar baja conductividad térmica y bajo coeficiente de dilatación. Los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y, magnesio (magnesita) son los materiales refractarios más importantes.

Las propiedades de mayor peso en los refractarios son: composición química, estabilidad dimensional, porosidad, densidad, resistencia a la compresión en frío, cono pirométrico equivalente (PCE, por sus siglas en Inglés), refractariedad bajo condiciones de alta temperatura, deformación por fluencia lenta a alta temperatura, estabilidad volumétrica a alta temperatura (expansión y contracción) y conductividad térmica.

Normalmente, los refractarios no tienen una temperatura de fusión específica. Sin embargo, llega a una temperatura en donde el material empieza a reblandecerse. El cono pirométrico equivalente se refiere a la cuantificación de la transición de fase que tiene lugar dentro de un intervalo de temperaturas en donde se lleva a cabo dicho fenómeno. Este es medido a partir de la caída de la punta de un cono elaborado de material refractario sometido a incrementos controlados de temperatura; la caída se expresa en grados.

2.7.1. TIPOS DE REFRACTARIOS

2.7.1.1. PREFABRICADOS

Según este criterio los materiales refractarios prefabricados se clasifica en:

Materiales conformados Ladrillos normales (rectos), ladrillos de arco, en cuña, bloques y formas especiales.

Estos ladrillos son piezas refractarias obtenidas por cualquiera de los métodos de conformado, principalmente por prensado, y luego sometidas a un proceso de cocción a alta temperatura, generalmente en un horno túnel, para lograr su aglomeración.

Los ladrillos refractarios representan la mayor parte de producción de refractarios por su versatilidad, costo y aplicación. Dentro de esta categoría se encuentran:

➤ LADRILLOS DE ARCILLA REFRACTARIA

Estos representan hasta un 75% de la producción de refractarios. Estos ladrillos, en esencia, están compuestos de silicatos de aluminio hidratados y otros minerales en menor proporción. Las composiciones típicas varían entre $\text{SiO}_2 < 78\%$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 < 44\%$.

Este tipo de refractarios son extremadamente versátiles y los más baratos de todos los ladrillos refractarios. Se utilizan con frecuencia en la industria ferrosa y no ferrosa.

Las categorías estándar de ladrillos de arcilla refractaria según la ASTM son: “superduty”, “high-duty”, “medium-duty”, “low-duty” y semi-silica, sus composiciones químicas se presentan en la Tabla 5. Estas categorías representan las temperaturas que pueden soportar sin perder sus propiedades de acuerdo a la prueba del cono pirométrico equivalente.

Tabla 5. Intervalo de composición química y temperatura típica de operación para las diferentes clases de ladrillos de arcilla refractaria.

Ladrillos	% SiO_2	% Al_2O_3	Otros const.	PCE, °C
SuperDuty	49-53	40-44	5-7	1750-1760
High Duty	50-80	35-40	5-9	1690-1750
Medium Duty	60-70	26-36	5-9	1635-1690
LowDuty	60-70	23-33	6-10	1520-1595
Semi-silica	65-80	18-30	3-8	1620-1680

➤ LADRILLOS CON ALTO CONTENIDO DE ALÚMINA

Los refractarios fabricados de óxido de aluminio y pequeñas trazos de otros materiales son los cerámicos ingenieriles mejor desarrollados. La alúmina es uno de los óxidos conocidos más estables químicamente que ofrece una excelente dureza, resistencia mecánica y resistencia al exfoliado. Son insolubles en agua, en vapor sobrecalentado y en la mayoría de ácidos inorgánicos y álcalis. Los refractarios con alto contenido de alúmina llevan las propiedades de las arcillas refractarias a mayores temperaturas, lo que permite que los hornos puedan operar a temperaturas de hasta 1850 °C sin ningún problema. También, posee gran resistencia en atmósferas oxidantes y reductoras.

La ASTM clasifica a estos ladrillos acorde a la cantidad de alúmina presente en ellos.

- i. **Ladrillos de Mullita:** Están compuestos por ~72% de alúmina y 28% sílice. Estos poseen una excelente estabilidad volumétrica y resistencia a altas temperaturas. El uso de estos ladrillos es apropiado para techos de hornos eléctricos y altos hornos.
- ii. **Ladrillos de Corindón:** Son refractarios compuestos por 99% alúmina, estos materiales constan de una sola fase policristalina. Su uso se justifica cuando se requiere excelente resistencia y estabilidad a temperaturas extremas (1850 - 1900 °C).

Los costos de fabricación y, por ende, el precio final se incrementa rápidamente con el contenido de alúmina. Por ello es esencial determinar, experimentalmente o mediante instalaciones de prueba, el contenido de alúmina más económico para cada proceso.

➤ LADRILLOS DE SÍLICE

Es un material refractario que posee como mínimo 93% de sílice. Desde el punto de vista de volumen de producción, estos se encuentran en segundo lugar bajo los ladrillos de arcilla refractaria. La sorprendente propiedad de la sílice es la excelente resistencia mecánica a temperaturas próximas a la temperatura de fusión. Esto contrasta con la

mayoría de los refractarios que empiezan a fundirse y a fluir a temperaturas considerablemente menores a las de su temperatura de fusión.

Sin embargo, poseen un gran defecto y este es su tendencia a exfoliarse a temperaturas por debajo de los 650 °C luego de haber alcanzado altas temperaturas. Generalmente, para procesos en donde los hornos deben ser enfriados a casi la temperatura ambiente a intervalos frecuentes en su operación normal, los ladrillos de sílice no son prácticos.

➤ **LADRILLOS DE MAGNESITA**

Los refractarios de magnesita son químicamente básicos, contienen al menos 85% de óxido de magnesio. Estos están fabricados de magnesita ($MgCO_3$) y sílice (SiO_2) encontrados en la naturaleza. Las propiedades físicas de este tipo de ladrillo son generalmente pobres y su valor principal radica en la capacidad de resistir escorias básicas. Estos ladrillos constituyen el grupo más importante de refractarios para la fabricación de acero en condiciones básicas.

➤ **LADRILLOS DE DOLOMITA**

La dolomita natural de doble carbono ($CaCO_3-MgCO_3$) puede ser convertida en dolomita refractaria ($CaO-MgO$) al cocinarse a altas temperaturas. La dolomita de alta pureza puede superar el 97% de $CaO + MgO$. Se ha encontrado que los refractarios de dolomita son los materiales más compatibles con los hornos kiln de las cementeras ya que poseen gran resistencia al choque térmico y al ataque químico con álcalis.

La tabla 6., muestra valores promedio de los refractarios comerciales encontrados en la industria.

➤ **REFRACTARIOS MONOLÍTICOS**

Son mezclas refractarias que pueden ser usadas directamente en el estado que se suministran, como es el caso de las masas plásticas o bien después de la adición de un

líquido apropiado, como es el caso de los hormigones o cementos refractarios (ver Fig. 15)

La composición de un refractario moldeable depende del uso final pero están presentes los óxidos de Al_2O_3 , CaO y SiO_2 , en mayor o menor proporción, con otros componentes como impurezas de TiO_2 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 y otros aditivos que pueden modificar las propiedades físicas del refractario en función de su uso.

Tabla 6. Propiedades típicas de los refractarios.

Propiedad	Refractarios de alta Densidad	Refractarios de baja densidad (fibra cerámica)
Conductividad térmica (W/m·K)	1.2	0.3
Calor específico (J/kg·K)	1000	1000
Densidad (kg/m³)	2300	130



Fig. 15. Mezcla monolítica (Concreto refractario Ultra-70).

Las propiedades físicas de estos materiales dependen del empaquetamiento de sus constituyentes, siendo el objetivo principal que se persigue en la fabricación de estos

materiales, para una composición dada, el obtener la máxima compactación con la menor cantidad de agua. Las propiedades de los refractarios moldeables están gobernadas por el tipo de agregado y matriz, así como por la cantidad de cemento usado, ya que estas variables determinan la cantidad de agua requerida.

Los refractarios monolíticos están desplazando con gran rapidez al tipo prefabricado en muchas aplicaciones, incluso en los hornos industriales. Las más importantes ventajas son:

- i. Elimina las uniones, las cuales resultan ser una inherente debilidad de los prefabricados.
- ii. La forma de aplicarlos resulta ser más rápida y fácil.
- iii. Las propiedades resultan mejores que la de los ladrillos.
- iv. El manejo y transporte es más simple.
- v. Ofrece una efectiva reducción del espacio en bodega y elimina las formas especiales.
- vi. Poseen mejor resistencia a la fluencia lenta y mayor estabilidad volumétrica.
- vii. Pueden instalarse mientras el horno aún está caliente.
- viii. Reducen los tiempos de mantenimiento.

Algunos tipos de refractarios monolíticos son:

- **Arcillas refractarias.** Estos se mezclan con agua y luego se calientan para que las partículas (generalmente alúmina o sílice coloidal) se transformen o volatilicen para fomentar la unión cerámica entre ellas. Estos materiales generalmente se cuelan, y se conocen como concretos refractarios.
- **Refractarios plásticos.** Son mezclas preparadas que se encuentran en una condición rígida, generalmente en bloques envueltos en polietileno. Cuando se aplican, deben ser cortados en piezas y luego son compactados neumáticamente. Pueden, fácilmente, ser compactados a cualquier forma y contorno.
- **Mezclas para compactado.** Son materiales muy similares a los refractarios plásticos pero son aún más rígidos. Estos se encuentran como una

mezcla seca que debe hidratarse con un poco de agua antes de ser aplicados. Otras mezclas pueden ya encontrarse en su forma húmeda para su uso inmediato. Estos deben instalarse con una compactador neumático.

- **Recubrimientos refractarios.** Usualmente son empleados cuando se quiere proteger la superficie de alguna herramienta en contra del ataque químico. Su propósito es únicamente cubrir la superficie de trabajo, por ello, estas se encuentran en capas delgadas.
- **Mortero refractario.** Este producto también pertenece a los refractarios monolíticos adecuado para la colocación, anclaje y pegado de ladrillos refractarios, partes pre-manufacturadas (componentes) y productos aislantes; también para cubrir irregularidades de la superficie de las paredes de los hornos y para prevenir que la escoria ingrese a las uniones. La composición de este mortero varía dependiendo del grado específico de ladrillo o propósito de aplicación. Esos están compuestos de aditivos de grano fino y aglutinantes. Estos morteros son suministrados secos o listos para ser usados.

2.7.1.2. AISLANTES REFRACTARIOS

Los materiales aislantes reducen considerablemente la pérdida de calor a través de las paredes de los hornos. Una baja transferencia de calor se puede alcanzar al colocar capas de material con baja conductividad térmica entre la superficie interna caliente de un horno y la superficie externa, haciendo que esta última se mantenga a una baja temperatura.

La razón de su baja conductividad se debe a la alta cantidad de poros dentro del material, los cuales están llenos de aire y por lo tanto impiden una alta tasa de transferencia de calor. Estos materiales usualmente son muy ligeros. Materiales con una porosidad entre 75 y 85% se consideran muy livianos, y por arriba de ese porcentaje se vuelven materiales ultra-livianos.

Los materiales con alto porcentaje de poros resultan poseer una resistencia mecánica muy baja y deben manejarse con mucho cuidado. Además, gases, humos y líquidos pueden penetrar fácilmente estos materiales, por ello no deben emplearse en hornos donde puedan entrar en contacto directo con ellos.

Entre los aislantes refractarios se pueden encontrar:

- Ladrillos aislantes.
- Cementos aislantes.
- Fibra cerámica.
- Silicatos de calcio.
- Recubrimientos cerámicos.

Debe tenerse en cuenta que el calor excesivo afecta a todo material aislante de manera adversa, sin embargo, la temperatura a la cual el material empieza a deteriorarse varía considerablemente de acuerdo al tipo de material seleccionado. Por lo tanto, al escoger un material aislante se debe tener en seria consideración la temperatura de operación. Algunas propiedades de los refractarios aislantes son mostradas en la Tabla 7, en ella no se incluye la fibra cerámica.

Tabla 7., Propiedades físicas de materiales aislantes.

Tipo	Conductividad térmica, 400	Máxima temperatura de seguridad, ° C	Resistencia a la compresión en frío, kg/cm	Densidad, kg/m
Diatomita de alta densidad	0.025	1000	270	1090
Diatomita porosa	0.014	800	110	540
Arcilla	0.030	1500	260	560
Alta alúmina	0.028	1500-1600	300	910
Sílice	0.040	1400	400	830

2.7.2. SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA: EL QUEMADOR

El quemador resulta ser el elemento crítico en el horno. Sin un quemador no existirá transferencia de energía y sin energía no se producirá la fusión del material.

El quemador es un dispositivo que permite la mezcla del combustible con el aire (en el caso de los quemadores a base de hidrocarburos). El combustible es inyectado a través

de una boquilla y este es mezclado con el aire proveniente del exterior o de algún ventilador mediante el tubo de mezcla.

El principio de funcionamiento es muy sencillo, pero para poder entenderlo se requiere de conocer qué es la combustión y qué implica.

2.7.2.1. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego.

En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente es oxígeno en forma de O_2 gaseoso.

En una reacción completa todos los elementos que forman el combustible se oxidan completamente. Los productos que se forman son el dióxido de carbono (CO_2) y el agua; el nitrógeno no reacciona y por lo tanto se mantiene invariable en los productos.

Los requerimientos de aire u oxígeno para diferentes combustibles para que estos alcancen la combustión estequiométrica son descritos en la Tabla 8. Sin embargo, una combustión completa no puede alcanzarse en la realidad ya que los reactivos y reactantes están compuestos de otras moléculas que al reaccionar forman productos ajenos a la combustión completa, estos productos pueden ser monóxido de carbono, hidrógeno, óxidos de azufre (si el combustible posee azufre), carbón (en forma de hollín o ceniza) y, si la temperatura es alta, óxido de nitrógeno. En la combustión incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada.

Para la mayoría de combustibles, como el aceite diésel, carbón o madera, una reacción de pirolisis ocurre antes de la combustión. En la combustión incompleta, los productos de la pirolisis del combustible permanecen sin quemarse y contaminan el humo con partículas dañinas y gases.

Tabla 8. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica de algunos combustibles.

Sustancia	Producto	En peso, kg de comburente/kg de combustible		En volumen, m ³ de comburente/m ³ de combustible	
		Oxígeno	Ai	Oxígeno	Ai
Carbono	CO	1.33	5.75	Sólido	Sólido
Carbono	CO ₂	2.66	11.51	Sólido	Sólido
Hidrógeno	H ₂ O	7.94	34.30	0.5	2.39
Metano	CO ₂ + 2H ₂ O	3.99	17.24	2.0	9.57
Etano	2CO ₂ +	3.72	16.07	3.5	16.75
Propano	3CO ₂ +	3.63	15.68	5.0	23.95
Butano	4CO ₂ +	3.58	15.46	6.5	31.14
Acetileno	2CO ₂ + H ₂ O	3.07	13.26	2.5	11.96
Azufre	SO ₂	1.00	4.32	Sólido	Sólido
Azufre	SO ₃	1.00	6.48	Sólido	Sólido

Para iniciar la combustión de cualquier combustible, es necesario alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición, que se define como la temperatura, en °C y a 1 atm (101.325 kPa) de presión, a la que los vapores de un combustible arden espontáneamente.

La temperatura de ignición, en °C y a 1 atm, es aquella a la que, una vez encendidos los vapores del combustible, éstos continúan por sí mismos el proceso de combustión.

2.7.3. LLAMA

La llama es la manifestación visual de la reacción de combustión. La llama es provocada por la emisión de energía de los átomos de algunas partículas que se encuentran en los gases de la combustión, al ser excitados por el intenso calor generado en este tipo de reacciones.

El color y la temperatura de la llama son dependientes del tipo de combustible involucrado en la combustión. Con respecto a los hidrocarburos, el factor más importante que determina el color de la llama es el suministro de oxígeno y el alcance que tiene la pre-mezcla oxígeno-combustible, este último también determina la tasa de combustión y la temperatura de la reacción.

Para ilustrar este efecto se describirá los distintos cambios por los que atraviesa una llama en un mechero Bunsen (Fig. 16).

- i. Bajo condiciones normales de gravedad y mientras la válvula de oxígeno está cerrada, la llama del mechero tiene un color amarillo (también llamada flama de seguridad) cuya temperatura está alrededor de los 1000 °C. Se generan partículas de hollín que quedan suspendidas en el aire.
- ii. A medida que la válvula se abre levemente, la mezcla oxígeno-butano se lleva a cabo, se reduce el hollín producido debido a que existe una combustión más completa, y la reacción genera la suficiente energía para ionizar las moléculas de gas en la flama, lo cual deriva en un cambio notable del color de la llama de amarillo a anaranjado.
- iii. Cuando la válvula se encuentra medio abierta o un poco más, mayor cantidad de oxígeno se ve mezclado con el combustible y la llama empieza a tomar un color azul, disminuyendo aún más el hollín e incrementando la temperatura de la llama.
- iv. Finalmente, la llave está completamente abierta y la mezcla oxígeno-combustible alcanza la estequiometría, llegando a elevar la temperatura de la llama al máximo (1600 °C).

La combustión estequiométrica (combustión completa) del combustible con el aire genera la mayor temperatura de la llama. Exceso de aire/oxígeno la reduce al igual que la falta de este.

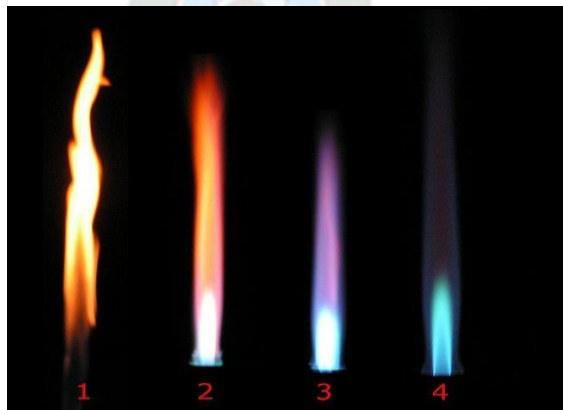


Fig. 16. Diferentes tipos de llama en un mechero Bunsen

2.7.4. PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un combustible queda definido por el número de unidades de calor liberadas por la unidad de masa o de volumen del combustible, quemada en un calorímetro en condiciones previamente establecidas; es decir:

- i. Combustible sólido y líquido por unidad de masa, se expresa en kcal/kg o kJ/m^3 .
- ii. Combustibles gaseosos por unidad de volumen en condiciones normales (a 0 °C de temperatura y 760 mm de Hg), se expresa en kcal/m^3 o kJ/m^3

2.7.4.1. PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Es la cantidad total de calor de un combustible, incluyendo el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en dicho combustible.

2.7.4.2. PODER CALORÍFICO INFERIOR

Es la cantidad de calor que resulta al restar del poder calorífico superior el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en el combustible. Una vez se ha establecido los principios básicos de la combustión, se procede a profundizar en el quemador.

2.8. CONSERVACIÓN DEL CALOR DENTRO DEL HORNO

Uno de los retos a vencer en el diseño y fabricación de hornos es la economía en el uso de combustible, la cual debe equilibrarse con los costos de fabricación y la resistencia térmica de los materiales. Se habla de economía porque a medida que el horno posee una mayor capacidad para evitar las fugas de calor a través de sus recubrimientos, el consumo de combustible disminuye y la rapidez de calentamiento aumenta, por lo tanto, el suministro de energía (que resulta ser uno de los mayores costos de operación de un horno) se ve grandemente reducido.

Ahora bien, para determinar las potenciales pérdidas de calor en un horno es primordial definir en qué momento ocurren esas pérdidas. Para ayudarnos a encontrarlas, se dividirá la operación del horno en etapas de calentamiento, las cuales pueden ser:

- i. **Etapas de pre-calentamiento.** El horno empieza a calentarse hasta la temperatura de trabajo; en este momento el mayor consumo energético es empleado para calentar el recubrimiento refractario.
- ii. **Etapas de operación.** En esta etapa, el mayor consumo de energía es utilizado para fundir la carga. La cantidad de combustible empleado en esta etapa dependerá del metal a fundir y las pérdidas del horno a través de las paredes.
- iii. **Etapas de mantenimiento.** El horno ya ha fundido la carga y la energía empleada es utilizada para mantener el baño mientras empieza la operación de colado. El consumo de combustible se reduce y debe ser lo suficiente para mantener una temperatura estable.
- iv. **Etapas de enfriamiento.** Una vez el horno a finalizado su ciclo de trabajo este es apagado y el calor es disipado con una rapidez que depende del recubrimiento del horno y el ambiente circundante.

Dentro de estas etapas, las pérdidas de calor al exterior se dan por diversos factores, dentro de los cuales encontramos:

- i. **Pérdidas en los gases de combustión.** Una parte de la energía aún permanece en los gases de combustión al salir por la chimenea. Esta pérdida también se llama pérdida por gases de escape.
- ii. **Pérdida por humedad en el combustible.** El combustible contiene, usualmente, un poco de humedad y una pequeña parte de la energía es utilizada para evaporar esa humedad como también la humedad dentro del horno.
- iii. **Pérdidas por hidrogeno en el combustible.** En la reacción de combustión parte de la energía es empleada para que el hidrogeno pueda dar paso a la formación de agua.

- iv. **Pérdidas a través de aberturas en el horno.** Las pérdidas de calor por radiación más significativas suceden cuando existen aberturas al ambiente en el horno, especialmente para hornos que trabajan a temperaturas mayores de 540°C. Otras pérdidas son debidas a la infiltración de aire debido al arrastre de los gases de escape hacia la atmosfera, lo que genera una presión negativa dentro del horno y por ende fomenta el ingreso de aire frío del exterior a través de ranuras o cuando la puerta del horno es abierta.
- v. **Pérdidas a través de las paredes.** La transferencia de calor por las paredes resulta ser una substancial pérdida de combustible si no es considerada apropiadamente. La extensión de las pérdidas dependen de:
- **Emisividad de las paredes.** El ladrillo refractario posee un alto valor de emisividad (0.9-0.95), esto quiere decir que refleja muy poco la radiación y por lo tanto tiende a absorber la energía radiante y almacenarla para posteriormente radiarla en todas direcciones al incrementarse la temperatura. Por ello es que en la etapa de pre-calentamiento la mayor parte del combustible es empleado para calentar el ladrillo hasta la temperatura de operación.
 - **Conductividad del refractario.** La conductividad térmica de las paredes es un parámetro importante a considerar. Entre mayor sea la conductividad, mayor será la pérdida de calor al ambiente.
 - **Espesor de la pared.** Si la pared del refractario es delgada, el recorrido del calor a través de esta es más corto y por lo tanto hay un mayor flujo de calor al ambiente.
 - **Velocidad y temperatura del aire.** La transferencia de calor se ve favorecida con un flujo de aire turbulento característico de altas velocidades de flujo de aire y por los gradientes de temperatura existente entre el exterior del horno y el aire circundante.
 - **Si el horno es operado de manera continua o intermitente.** Un horno operado de manera continua posee ciclos de trabajo largos, en

donde las mayores pérdidas de calor se dan en las etapas de operación y mantenimiento, mientras que en un horno intermitente la mayor pérdida de calor se da en la etapa de enfriamiento y por ende el mayor consumo de combustible se da por calentar el horno en frío hasta la temperatura de operación.

- **Otras pérdidas.** Existen muchas otras pérdidas, aunque cuantificar estas pérdidas resulta dificultoso, entre estas se incluyen:
 - a. **Pérdidas debido a la manipulación.** Al introducir herramientas, como pinzas, cucharones, etc. Estas absorben calor y las pérdidas dependerán de la frecuencia y el tiempo en que estas permanezcan en el horno.
 - b. **Pérdidas por combustión incompleta:** Calor es perdido de esta forma debido a las partículas de combustible que no se quemaron o debido a productos de la combustión incompleta que absorben energía.
 - c. **Pérdidas por la formación de escamas en el refractario:** En este sentido, al diseñar el horno debe hacerse análisis de transferencia de calor para conocer la magnitud de las pérdidas estimadas que proveerán el consumo de combustible teórico del horno.

Ahora bien, el diseñador debe saber que las mayores pérdidas de calor en un horno pueden controlarse al:

- Instalar aislante térmico para conservar el calor.
- Incrementar el espesor del ladrillo refractario (lo cual no resulta ser muy efectivo pues incrementa considerablemente el costo de construcción del horno).

Es importante advertir que la aplicación del aislamiento térmico debe realizarse luego de una cuidadosa consideración de las consecuencias que este puede causar en las temperaturas del refractario.

2.9. CRISOL

El crisol es el recipiente utilizado para albergar metales a ser fundidos en un horno y es utilizado para soportar las altas temperaturas encontradas en la fundición metálica. El material del crisol debe tener una alta temperatura de fusión, mucho mayor que la del metal a fundir, resistente al ataque químico del metal y, además, debe tener una excelente resistencia en caliente.

Los tipos de crisol que ofrece la industria vienen en tamaños muy variados, generalmente son numerados acorde a la cantidad de aluminio que puedan contener y si se multiplica el valor por 3 se obtiene la cantidad de bronce que puede contener; aunque, cabe aclarar, que cada fabricante posee su propia denominación y no necesariamente se sigue esta norma. Como ejemplo del sistema de denominación, un crisol # 6 puede contener 6 lb de aluminio o 18 lb de bronce.

Para el aluminio y sus aleaciones se utilizan crisoles de arcilla grafitada, carburo de silicio y de hierro fundido. Mientras que el crisol de arcilla grafitada y carburo de silicio se usa, preferentemente, para la fusión, la conservación de calor y la colada, los crisoles de hierro fundido solo se usan para la conservación del calor y la colada. Según la aplicación se les exigen las siguientes condiciones: resistencia frente a la acción del aluminio líquido y los medios de tratamiento del fundido, buena conductividad, resistencia térmica y mecánica y a la vez resistencia a los cambios de temperatura.

Los crisoles de arcilla grafitada, están formados por una mezcla de grafito y arcilla aglutinante. Estos tienen una capacidad entre 50 y 300 kg de aluminio. Utilizándose últimamente crisoles con una capacidad de aproximadamente 500 y 800 kg. Estos crisoles pueden usarse para la fusión, la conservación del calor y la colada. Su comportamiento con respecto al aluminio fundido es neutro.


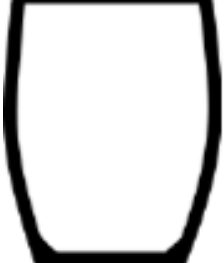
La duración de los crisoles de grafito depende tipo de horno, y por lo tanto, del tipo de calentamiento, de la aleación que se funde y de su temperatura de fusión, a la vez del tratamiento al que se someta el caldo. Por término medio se puede calcular en unas 60 a 80 fusiones y para los de conservación del calor una vida de 2 a 2 ½ meses

Con respecto al crisol de arcilla grafitada el de carburo de silicio presenta la ventaja de que la conductividad calorífica y el rendimiento de fusión permanecen constantes. Por eso no tiene límite su duración respecto a la conductividad. Tiene, además, una mayor resistencia a los cambios de temperatura. Los crisoles de carburo de silicio cuando se les trata con cuidado, tienen una duración mayor que los de arcilla grafitada; también son más caros que aquellos. El comportamiento de los crisoles de carburo de silicio frente al aluminio líquido es neutro.

Las formas de los crisoles son muy variadas y generalmente dependen de la aplicación. En la Tabla 9., se presentan las formas más comunes de los crisoles.

Es importante mencionar que no existe ningún crisol que pueda satisfacer todas las características deseables para la aplicación. El desempeño de un crisol usualmente involucra intercambios de propiedades. Por ejemplo, el crisol con la mejor conductividad térmica puede no ofrecer la mejor protección al shock térmico. Por ello, al seleccionar un crisol, es importante priorizar aquellas propiedades que resultan más importantes para la aplicación

Tabla 9. Formas comunes de crisoles para fundir metales

Denominación de forma	Aplicación	Forma
A	Horno de crisol estacionario y de crisol removible	
B (Bilge)	Horno de crisol removible	

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

Para la construcción ideal del horno se debe realizar un cálculo, que beneficiara para diferentes esquemas, por tanto brindara un panorama de las exigencias constructivas posteriores y parámetros de funcionamiento esperados.

Implica entonces, determinar dimensiones, establecer materiales, evaluar requerimientos energéticos, realización de mantenimiento y establecer parámetros de seguridad en la manipulación.

3.1. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

Al realizar la construcción del horno de crisol, ciertas consideraciones deben tomarse en cuenta para que este pueda operar de manera óptima:

- Los hornos cilíndricos son más eficientes que los hornos cuadrados.
- El horno debe ser dimensionado acorde al crisol a emplear.
- El diámetro de la cámara interior debe ser entre 50 y 200 mm, superior que el diámetro del crisol.
- La altura de la cámara junto con su recubrimiento, debe tener en cuenta el bloque base en el cual se colocará el crisol para evitar que la flama del quemador incida directamente sobre él, además, debe permitirse un espacio entre 20 y 50 mm entre el borde superior del crisol y la tapa.
- El orificio del quemador debe colocarse en el fondo del horno por debajo del crisol y debe ser tangente a la pared de éste.
- El componente más crítico de la construcción de un horno de crisol es su recubrimiento refractario. Este permite calentamientos uniformes y baja tasa de pérdida de calor.

3.2. PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL

Se llaman parámetros de construcción a aquellos elementos cuya selección permite el adecuado funcionamiento del horno. Generalmente la selección de los parámetros de construcción está bajo el criterio del diseñador, su experiencia y presupuesto. Los parámetros de construcción no son fijos y solo sirven como base para el diseño, estos parámetros pueden cambiar si los resultados no son los esperados.

En el horno de crisol se identifican los siguientes parámetros para su construcción:

- Metal a fundir.
- Crisol a emplear.
- Temperatura máxima de operación.
- Tiempo de operación.
- Ubicación y Flujo de aire.

El metal a fundir para el presente trabajo es Aluminio y Cobre, para fines investigativos y educativos de los estudiantes de la materia de Tecnología de los Materiales como se definió anteriormente.

3.3. ELECCIÓN DEL CRISOL.

Como ya se presentó en la parte de marco teórico los diferentes tipos de crisoles y características para la elección, el presente trabajo de aplicación que tiene la función de fortalecer la investigación y práctica en el proceso de fundición y construcción de hornos de crisol tipo estacionario, se analizó para una elección ideal, de tal manera se vio conveniente elegir el CRISOL DE GRAFITO O ARCILLA GRAFITADA TIPO AFG 10 30K, para hornos de crisol estacionario y crisol removible.

El crisol se selecciona tomando en cuenta la cantidad de metal a fundir y la necesidad de que este no reaccione con el metal, los fundentes y desgasificadores. Crisoles de grafito resultan ser adecuados por ser neutros y no reaccionar con el aluminio ni el cobre.

La temperatura máxima de operación se define por el metal cuyo punto de fusión es el más elevado. En este caso el cobre determina la temperatura de operación máxima donde es 1085°C y del aluminio es 660,3°C.

El tiempo de operación, al ser este un horno didáctico y de investigación, y cuyo uso será eventual se selecciona como intermitente y no más de 8 horas por día (lo que toma en cuenta el precalentamiento del horno).

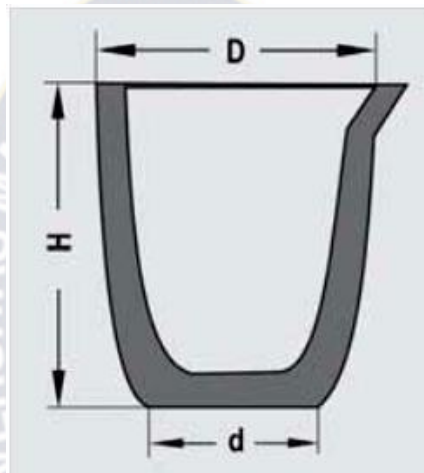


Fig. 17. Dimensiones de referencia del crisol.

La ubicación del horno será en el laboratorio de Tecnología de los materiales en el área de soldadura. Así, dentro del recinto el aire estará quieto a temperatura ambiente.

El resumen de los parámetros de diseño se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de construcción para el horno de crisol.

Parámetro	Valor	
Densidad	2698,4 Kg/m ³ Al	8960 Kg/m ³ Cu
Carga a fundir	Volumen, m ³ /Lts	Masa, m ³ /Lts
Aluminio	0.0043/4,32	11.655/25,69
Cobre	0.0043/4,32	38.7006/85,32
Crisol		
Tipo/material	AGF 10/grafito	
Dimensiones (Fig. 17)	H: 196 mm x D: 170 mm x d: 116mm	
Temperatura Máxima de operación	1600°C	
Tiempo de funcionamiento máx.	<8 h	
Ubicación prevista	Recinto cerrado	
Flujo de aire en el recinto	Aire quieto	

3.4. DIMENSIONES DEL HORNO DE CRISOL

Instaurados los parámetros de construcción se procede a determinar el tamaño del horno.

3.4.1. CALCULO DE DIÁMETRO INTERIOR Y ALTURA INTERIOR.

- Diámetro interior del horno = D (int.)

$D(\text{int.}) = \text{Diametro del crisol} + \text{Espacio libre sugerido}$

$D(\text{int.}) = D + 90 \text{ mm}$

$D(\text{int.}) = [170 + 90] \text{ mm}$

$D(\text{int.}) \approx 260 \text{ mm}$

- Altura interior del horno = H (int.)

$H(\text{int.}) = \text{Altura de crisol} + \text{pedestal} + \text{Espacio libre sugerido}$

$H(\text{int.}) = [196 + 80 + 70] \text{ mm}$

$H(\text{int.}) \approx 346 \text{ mm}$

En el caso de la construcción de hornos de crisol tipo estacionario de crisol removible se debe tener muy en cuenta que se requiere de un PEDESTAL O BASE para soportar el crisol y evitar que la flama del quemador incida directamente en este. El pedestal estará hecho de cemento refractario y la altura se establece en 70 [mm]. recomendable. Este valor es arbitrario y estimado suficiente para proteger el crisol de la llama.

Para determinar las dimensiones exteriores es necesario establecer el recubrimiento interior y el espesor de la carcasa o plancha de recubrimiento.

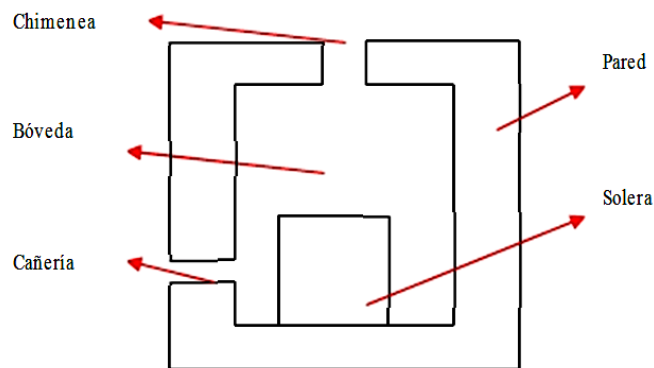


Fig. 18. Boceto de horno Crisol

3.5. ELECCIÓN Y DIMENSIÓN DEL LADRILLO REFRACTARIO.

3.5.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA REFRACTARIOS

Al construir un horno de fundición generalmente se comete el error de no darle la suficiente atención a la selección del refractario, lo que hace que la vida útil de éste disminuya considerablemente y sea una fuente de costos de mantenimiento futuros que podrían evitarse.

Al seleccionar el mejor material debe tomarse en cuenta el metal a fundir, las temperaturas a alcanzar, el tiempo de fundición, cuánto tiempo se mantendrá el metal en el horno, que aditivos o agentes aleantes se utilizarán y la forma en que recubrirán las superficies. Por lo tanto, la selección del refractario se basa en lo que se considera ser el factor más crítico en relación al patrón de desgaste bajo los parámetros de operación normal del horno con el objetivo de poder alcanzar el mejor ahorro económico. La selección correcta no sólo otorga una mayor vida útil sino también reduce el tiempo en que el horno está fuera de servicio.

En este sentido, es importante que se consideren las condiciones de utilización. Por ejemplo, los materiales refractarios ácidos no se pueden utilizar en presencia de una base química y viceversa dado que se produciría corrosión. El circonio, la chamota y el dióxido de silicio son ácidos, la dolomita y la magnesita son básicas, mientras que el óxido de aluminio, la cromita, el carburo de silicio o el carbono son neutros. El fallo en la correcta selección del material puede producir una acelerada disminución de la vida útil del refractario. En el caso de aleaciones no ferrosas se recomienda el uso de materiales básicos como la magnesita, dolomita o cromita.

Finalmente, el factor económico es el que incide enormemente en el proceso de selección. El costo de la instalación, de mantenimiento, de reparación y reemplazo del refractario deben mantenerse al mínimo. Sin embargo, no debe caerse en el error de seleccionar un material refractario únicamente por su bajo precio y facilidad

de instalación, las consideraciones anteriores deben tomarse en cuenta para no incidir en pérdidas innecesarias.

3.5.2. ELECCIÓN DE LADRILLOS REFRACTARIOS.

Como ya se expresó anteriormente en el marco teórico de los tipos de ladrillos refractarios en el punto 2.7.1., se analizó y eligió el REFRACTARIO DE ALTO CONTENIDO DE ALÚMINA, por sus diferentes características técnicas y necesidades que se requiere para el presente trabajo de aplicación.

Sus características son:

- Son los cerámicos mejor desarrollados.
- La alúmina es uno de los óxidos conocidos más estables químicamente.
- Excelente dureza y resistencia mecánica.
- Son insolubles al agua
- Coeficiente de dilatación muy bajo
- Soporta temperatura elevadas hasta 1850 °C

3.5.3. DIMENSIONES DE LADRILLOS REFRACTARIOS.

Para el recubrimiento interior se utilizará ladrillos refractarios de 55 milímetros de espesor. El espesor del recubrimiento basta para proteger al aislante y darle rigidez a la estructura.

El tipo de ladrillo refractario será de tipo arco o cuña como se ve en la fig. 19.

Además, del recubrimiento de ladrillo refractario se colocará una manta cerámica aislante (Chamota), que rodeará a este por la cara fría. Para la aplicación se recomiendan 2 pulgadas de espesor aproximadamente (espesor provisto de fábrica) siendo esta una configuración económica y apropiada para la aplicación.

De tal manera la manta cerámica aislante (chamota), que se vio pertinente instalar es de 45 mm, próxima a la recomendación que sugiere el diseño y fabricantes de hornos de crisol.



Fig. 19. Ladrillo refractario

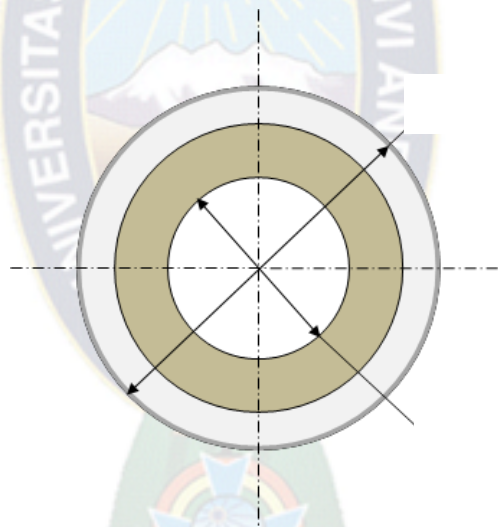


Fig. 20. Diagrama que muestra el diámetro interior y exterior del horno. Notar las diferentes capas que conforman el recubrimiento.

3.6. ELECCIÓN DE LA CARCASA

Finalmente, para el espesor de la carcasa se selecciona lámina o plancha de 2 mm de espesor.

Con respecto a la altura del horno, debe tomarse en cuenta la base hecha de cemento refractario de 50 mm de espesor. La tapadera y la cubierta del horno se

fabricarán de cemento refractario y manta cerámica respectivamente. El espesor adecuado se determinará mediante un análisis de transferencia de calor, sin embargo, para un estimado se establece de 35 mm la tapadera y 55 mm la cubierta. Por lo tanto, la forma final se presenta en la Fig. 21.

Estas medidas básicas servirán de parámetro para realizar los diferentes cálculos, por lo tanto, se entiende que estas medidas están sujetas a cambio y dependientes de los resultados.

Una vez constituidas las dimensiones se procederá a efectuar los requerimientos energéticos del horno mediante la deducción del calor requerido para la fusión del metal.

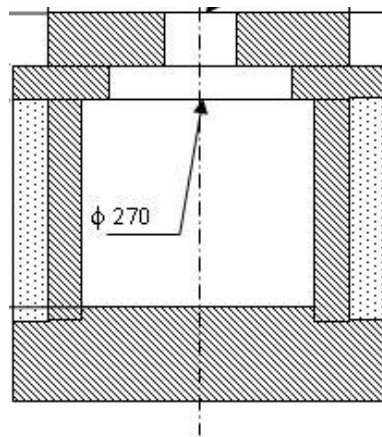


Fig. 21. Esquema de un corte transversal del horno

3.7. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS.

3.7.1. ENERGÍA REQUERIDA PARA LLEVAR A CABO LA FUSIÓN DEL METAL

La energía necesaria para fundir cualquier metal puede simplificarse si se supone que su conductividad térmica no varía en cierto intervalo de temperaturas.

Para el cálculo se toma en cuenta los diferentes calores específicos de los elementos en sus diferentes estados así como el calor latente de fusión requerido para cambiar de estado el material. El procedimiento y los resultados se presentan a continuación.

➤ **PARA EL ALUMINIO**

Mediante el cambio de temperatura del elemento en análisis se puede determinar el calor necesario para fundir el material, para ello se ocupa la ecuación 1.

$$Q(Al1) = m(Al) * Cp_{Als} * \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

- Q(Al 1)** **Calor requerido (J)**
- m (Al)** **masa de aluminio (Kg)**
- Cp (Als)** **Calor especifico de aluminio solido (J / Kg*°C)**
- ΔT** **Variación de Temperatura (°C)**

$$* Cp (Als) = 0,215 \frac{cal}{g \text{ } ^\circ C} = 900 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$$

Calor requerido para llegar al punto de fusión: Ecuación (1)

$$Q (Al1) = m(Al) * Cp_{Als} * \Delta T$$

$$Q (Al1) = 11,655 Kg(Al) * 900 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C} * (660 - 27)^\circ C$$

$$Q (Al1) = 6639.85 [KJ]$$

Por lo consiguiente se calcula el calor suministrado: Para el cambio de estado de Solido a Liquido.

$$Q(Al2) = m(Al) * h (Alf) \dots\dots\dots (2)$$

- Q(Al 2)** **Calor suministrado (J)**
- m (Al)** **masa de aluminio (Kg)**

h (Alf) Calor latente de fusión del aluminio (J / Kg*°C)

$$* h (Alf) = 399.63 \frac{KJ}{Kg}$$

Calor suministrado requerido: Ecuación (2).

$$Q (Al2) = m(Al) * h(Alf)$$

$$Q (Al2) = 1,035 Kg(Al) * 399.63 \frac{KJ}{Kg}$$

$$Q (Al2) = 413.62 [KJ]$$

Si se sobrecalienta el aluminio hasta llevarlo a la temperatura de colada de 750°C:

$$Q(Al3) = m(Al) * Cp_{Als} * \Delta T \quad \dots\dots\dots(3)$$

Q(Al 3) Calor requerido (J)

m (Al) masa de aluminio (Kg)

Cp (Als) Calor específico de aluminio solido Max. (J / Kg*°C)

ΔT Variación de Temperatura (°C); (Tc-Tf)

$$* Cp (Als) = 0,260 \frac{cal}{g \text{ } ^\circ C} = 1089 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$$

Calor requerido para llegar a temperatura de colada: Ecuación (3)

$$Q (Al3) = m(Al) * Cp_{Als} * \Delta T$$

$$Q (Al3) = 11,655 Kg(Al) * 1,089 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C} * (750 - 660)^\circ C$$

$$Q (Al3) = 1142.31 [KJ]$$

Por lo tanto, el calor total demandado para la fundición del aluminio es:

$$Q (Al) = Q(Al1) + Q(Al2) + Q(Al3)$$

$$Q (Al) = 6639.85 [KJ] + 413.62 [KJ] + 1142.31 [KJ]$$

$$Q (Al) = 8195.78 [KJ]$$

➤ **PARA EL COBRE**

Calor requerido para llegar al punto de fusión

$$Q(Cu1) = m(Cu) * Cp_{Cu s} * \Delta T \dots\dots\dots(4)$$

- Q (Cu 1)** **Calor requerido (J)**
- m (Cu)** **masa del Cobre (Kg)**
- Cp (Cu s)** **Calor especifico de Cobre solido (J / Kg*°C)**
- ΔT** **Variación de Temperatura (°C)**
- * Cp (Cu s) = 0,093 $\frac{cal}{g \text{ } ^\circ C} = 390 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$**

Calor requerido para llegar al punto de fusión: Ecuación (1)

$$Q (Cu1) = m(Cu) * Cp_{Cu s} * \Delta T$$

$$Q (Cu1) = 38,70 \text{ Kg}(Al) * 390 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C} * (1080 - 27)^\circ C$$

$$Q (Cu1) = 15892.9 [KJ]$$

Por lo consiguiente se calcula el calor suministrado: Para el cambio de estado de Solido a Liquido.

$$Q(Cu2) = m(Cu) * h (Cuf) \dots\dots\dots (2)$$

- Q(Cu 2)** **Calor suministrado (J)**
- m (Cu)** **masa del Cobre (Kg)**
- h (Cuf)** **Calor latente de fusión del Cubre (J / Kg*°C)**
- * h (Cuf) = 206.3 $\frac{KJ}{Kg}$**

Calor suministrado requerido: Ecuación (2)

$$Q (Cu2) = m(Cu) * h(Cuf)$$

$$Q(Cu2) = 38,70 \text{ Kg}(Cu) * 206.3 \frac{KJ}{Kg}$$

$$Q(Cu2) = 7983.8 [KJ]$$

Si se sobrecalienta el cobre hasta llevarlo a la temperatura de colada de 1100°C:

$$Q(Cu3) = m(Cu) * Cp_{Cus} * \Delta T \dots\dots\dots(3)$$

- Q(Cu 3) Calor requerido (J)
- m (Cu) masa del Cobre (Kg)
- Cp (Cus) Calor especifico del Cobre solido Max. (J / Kg*°C)
- ΔT Variación de Temperatura (°C); (Tc-Tf)

$$* Cp (Cu s) = 0,385 \frac{cal}{g \text{ } ^\circ C} = 1,611 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$$

Calor requerido para llegar a temperatura de colada: Ecuación (3)

$$Q(Cu3) = m(Al) * Cp_{Als} * \Delta T$$

$$Q(Cu3) = 38,70 \text{ Kg}(Cu) * 1,611 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C} * (1100 - 1080)^\circ C$$

$$Q(Cu3) = 1246.9 [KJ]$$

Por lo tanto, el calor total demandado para la fundición del aluminio es:

$$Q(Cu) = Q(CU1) + Q(Cu2) + Q(Cu3)$$

$$Q(Cu) = 15892.9 [KJ] + 7983.8 [KJ] + 1246.9 [KJ]$$

$$Q(Cu) = 25123.6[KJ]$$

Esta es la cantidad de energía mínima necesaria para fundir el metal dentro del horno. Sin embargo, para conocer la energía a proporcionada no basta con conocer estos

valores ya que dentro del horno existen muchas pérdidas a través de las paredes que impiden que la energía proveniente de la reacción del combustible sea transferida completamente al metal. Esto implica mayor consumo de combustible por el horno.

3.8. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL HORNO DE CRISOL ESTACIONARIO.

Una vez obtenido los parámetros de construcción más relevantes para el horno de crisol se procede a la construcción tomando en cuenta las consideraciones y requerimientos de material iniciando con la adquisición del mismo y clasificando cada etapa de construcción como es la los ladrillos refractarios, el proceso de fraguado del concreto refractario y elaboración de carcasa y ensamble.

A continuación se describe detalladamente cada etapa constructiva del horno de crisol.

3.8.1. CILINDRADO DE LA CARCASA

Para el inicio del cilindrado de la plancha se adquirió las dimensiones requeridas, el caso del espesor es de 2 [mm] como se estableció en el proceso de construcción.

Para el cálculo exacto del cilindrado de la plancha se realiza de la siguiente forma.

➤ **Longitud requerida de plancha;**

$$L = \pi * D$$

Dónde:

L: Longitud requerida de plancha

D: Diámetro exterior requerido de la carcasa (460 mm)

Entonces;

$$L = \pi * D$$

$$L = \pi * 460$$

$$L = 1445.13 [mm]$$

➤ **Ancho o altura de plancha requerida;**

La altura de la plancha se realiza en función de diferentes factores internos del horno:

Altura interna requerida ===== 346 [mm] “Establecida en el punto

3.4.1.”

Altura de tapadera ===== 45 [mm]

<i>H ext. = 391 [mm]</i>

Una vez obtenida las dimensiones requeridas se realiza el corte de la plancha y preparación para realizar el cilindrado correspondiente.

3.8.2. UNIÓN DE PLANCHA Y SOPORTES

Una vez ya realizado el cilindrado de la pieza se realiza la unión de los extremos de la plancha.

- Para evitar lo menor posible de pérdidas de temperatura en el interior del horno, se realiza un cordón de soldadura uniendo los extremos de la plancha.
- Se realiza la unión de la base con el perímetro de la plancha cilindrada y soldada.
- Se realiza la unión de 3 soportes para que el horno se encuentre estable y en equilibrio.
- Para que ingrese el quemador al interior del horno se realiza una perforación en la carcasa.
- La perforación para el ingreso del quemador es de 2 ½” de Ø.



Fig. 22. Unión de soportes de estabilidad

3.8.3. ADQUISICIÓN DE LADRILLOS REFRACTARIOS

Como ya se especificó en el punto 3.5.2., las características técnicas y las propiedades que presentan el LADRILLO REFRACTARIO DE ALTO CONTENIDO DE ALÚMINA, son ideales para el propósito del presente trabajo de aplicación.

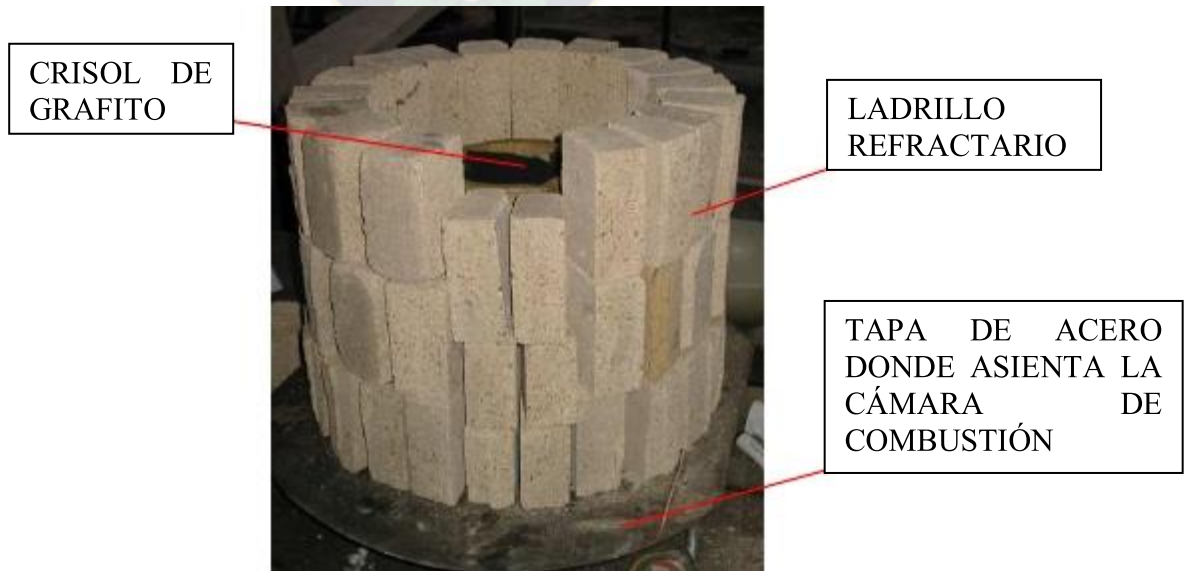


Fig. 23. Armado de ladrillos refractarios

3.8.4. MOLDEADO DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS.

Para este proceso se requiere materiales refractarios adicionales como ser:

- Arena refractaria
- Cemento refractario
- Chamota o Bauxita (Ladrillo refractario molido)
- Agua



Fig. 24 Arena refractaria



Fig. 25. Bauxita, ladrillo refractario molido

Para la mezcla de los materiales adicionales que permitirán proporcionar mayor rigidez y solides en los ladrillos refractarios, además que cubrirán las partes que no empalmaron en su totalidad, se debe realizar una mezcla adecuada.

Proceso de la mezcla de materiales.

- ❖ La proporción de la mezcla recomendada es, una pala de cemento refractario por media pala de arena refractaria o de silicio, media pala de chamota o bauxita y proporcionar agua hasta que se vuelva mezcla.

- ❖ Para que la arena refractaria no contenga impurezas se debe lavar por lo menos tres veces hasta que no existe algún elemento extraño o grumos, que podrían afectar en el proceso de colado.
- ❖ Una vez verificado que no existe elemento extraño y posterior realizar la mezcla de los tres elementos con abundante agua, se debe realizar el mejoramiento del horno.
- ❖ Antes de incorporar la mezcla se recomienda echar agua a los ladrillos refractarios para una mejor sujeción de la mezcla.
- ❖ Posterior de realizar el moldeado del horno se de dejar secar en un ambiente seco y donde llegue abundante aire, por lo menos se debe dejar una semana secando.



Fig. 26. Moldeado de ladrillo refractario

3.8.5. CONSTRUCCIÓN DE LA CUBIERTA

Para la construcción de la cubierta se realizara dos procesos de las cuales son:

- **CILINDRADO DE PLETINA.**

Para la construcción de la cubierta es necesario que contenga mayor solides por que será manipulado con mayor frecuencia para la extracción del crisol, de tal manera se realizara el borde de pletina de 4 mm de espesor y manteniendo el diámetro calculado de 460 [mm].

➤ **ARMADO DE LA CUBIERTA**

El armado de la cubierta es con ladrillos refractarios y se realiza el mismo proceso de la mezcla de los elementos refractarios como se realizó en el punto 3.8.4., donde se detalla el proceso de mezcla.

En el caso de cubierta se debe realizar una chimenea, donde se pueda expandir los gases que pueda provocar y a la vez poder observar el interior del horno, tomando en cuenta las medidas de seguridad que sean necesarias.



Fig. 27. Armado de la cubierta con los ladrillos refractarios

3.8.6. INSTALAR LANA DE VIDRIO

La lana de vidrio es un producto compuesto por un entrelazado de filamentos de vidrio aglutinados mediante una resina ignífuga. Por sus características básicas se puede afirmar que se trata de un producto que contiene gran capacidad de aislamiento térmico y acústico.

Características:

- ❖ Es un buen aislante térmico, porque la porosidad del material evita que la temperatura del exterior no penetre en el interior por convección, radiación y conducción.
- ❖ La lana mineral cabe decir que se trata de un material hidrófugo y no capilar, es decir, no capta ni transmite la humedad por el interior de sus poros.
- ❖ Es un material que repela el fuego.

La instalación de la LANA DE VIDRIO O MANTA REFRACTARIA, se debe realizar una vez que la mezcla de los elementos refractarios haya llegado al punto de encontrarse sólido.

Este elemento refractario se encuentra en el intermedio de la carcasa y los ladrillos refractarios, donde envuelve todo el perímetro de la carcasa del horno.



Fig. 28. Instalación de lana de vidrio o manta refractaria.

3.8.7. INSTALAR LA TAPADERA

La tapadera se encuentra en la parte superior del horno, donde se debe de cubrir con mezcla refractaria para cubrir la lana de vidrio y soportar la cubierta.

El proceso es la misma que el punto 3.8.4., de mezcla de elementos refractarios.

3.8.8. INSTALACIÓN DE TURBINA Y QUEMADOR

El quemador es el que se encuentra entre la turbina y el horno, su función es realizar la combustión del propano con el aire. El sistema del quemador utilizado es denominado quemador sellado mecánico, caracterizado por poseer entradas intencionales de aire libre alrededor de la tobera. El flujo de entrada de aire es controlado por un ventilador de inyección (venterol) que impulsa el aire a través de la caja de aire. Este tipo de quemador suele tener un una mayor caída de presión del aire en la tobera, de modo que la velocidad del aire es mayor y por tanto se produce una mejor mezcla y el control de la configuración de la flama.



Fig. 29. Instalación de turbina o venterol con el quemador



Fig. 30. Turbina o venterol seleccionada

El venterol es utilizado para generar una mejor combustión en la bóveda del horno, puesto que utilizando únicamente la combustión de GLP, no se tendría las condiciones deseadas para generar el funcionamiento del prototipo a temperaturas mayores de 900°C por ese motivo es justificado alimentar la manera artificial por el medio de una turbina la combustión de la cámara. Por otro lado el horno funciona como una cámara cerrada y la turbina es el elemento que suministra el oxígeno para mantener la combustión.

3.8.8.1. CARACTERÍSTICAS DE MOTOR

Las principales características del motor seleccionado son:

Tabla. 11. Características de motor para turbina

Característica	Cantidad
Potencia	1.5 HP
Voltaje	220-380 V
Velocidad	1500 RPM
Grado de protección	IP 55
Frecuencia	50/60 HZ



Fig. 31. Turbina conectado con su motor

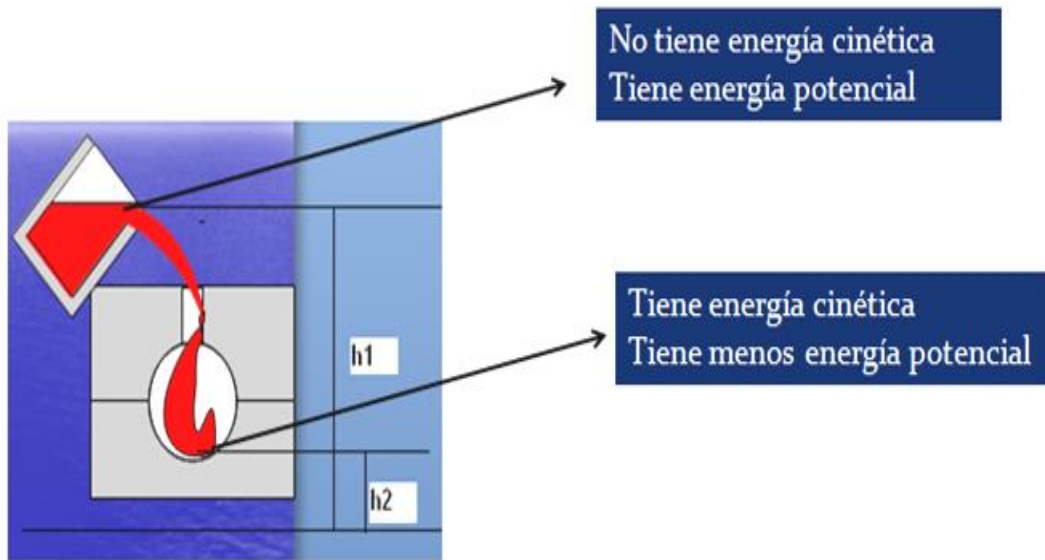


Fig. 32 Flujo de colada de una pieza

TABLA 12. Influencia de condiciones de Venterol en la temperatura.

Tiempo (min)	Presión Gas (bar)	Temperatura Exterior horno (°C)	Temperatura interior horno (°C)	Condiciones
0	0,1	22	24	Venterol cerrado
20	0,5	21	530	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
25	0,5	23	600	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
30	0.4	23	650	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
35	0.4	23	680	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
40	0.4	31	700	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
70	1	39	780	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
75	1	35	820	Venterol abierto 50%; válvula-gas 25%

Tabla 13. Temperaturas en las paredes del horno

Temperatura exterior Horno (°C)	Temperatura exterior Ladrillo (°C)	Temperatura interior Horno (°C)	Diferencia de Temperatura en el ladrillo refractario (%)	Diferencia de Temperatura en la manta aislante (%)
18	18	18		
18	65	360	81,9	72,3
20	100	420	75.6	80,0
24	120	500	74.5	80,0
24	150	565	71.4	84,0
25	150	670	74.6	83,3
25	240	750	61.9	89,6
30	220	840	68.6	86,4
30	205	1032	65.8	85,4
32	230	1100	64.1	86,1
34	240	1150	63.6	85,8
40	290	1200	61.8	86,2
Gradiente promedio			69,4	83,6


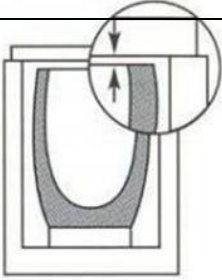
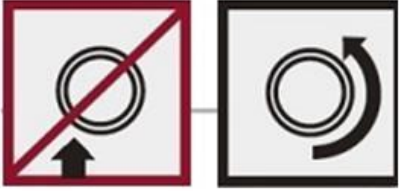


Fig. 33. Ensamble del HORNO CRISOL

3.8.9. INSTALACIÓN DE CRISOL

Para una correcta operación del crisol y protección del mismo se deben tomar en cuenta ciertas recomendaciones en cuanto a su instalación y condiciones de uso dentro de la cámara del horno las cuales se detallan en la tabla 13 en la cual se indica la instalación correcta del crisol dentro de la cámara del horno.

Tabla 14. Instalación correcta del crisol dentro de cámara de horno

INSTALACIÓN	
<p>1) Utilizar la base apropiada para el crisol y del tamaño adecuado. Nunca acuñar los crisoles, se tiene que permitir la expansión y contracción del crisol.</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>El crisol debe colocarse dentro de la cámara del horno en una base plana adecuada.</p>
<p>2) Evitar esfuerzos por carga; la tapa del horno o el anillo nunca deben descansar sobre el borde del crisol.</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Debe existir una distancia entre la tapa del horno y el borde superior del crisol.</p>
<p>3) Mantenga el revestimiento interior del horno en buenas condiciones; con una pared uniforme y concéntrica manteniendo la disposición tangencial del eje del quemador. Esto evitara la desviación de la flama y asegurara una fusión apropiada.</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Se debe mantener una pared interior uniforme para que no se pierda la trayectoria de la llama.</p>

3.9. COSTO DE PRODUCCIÓN.

Tabla 15. Costos de construcción de horno crisol

COSTO DE CONSTRUCCIÓN DE HORNO CRISOL					
N°	MATERIAL	UNID	CANT.	PREC. UNIT (Bs)	PREC. TOT. (Bs)
1	CRISOL DE GRAFITO AFG 10 - 30K	PZA.	1	1400,00	1400,00
2	LADRILLO REFRACTARIO TIPO CUÑA O CÓNICO	PZA.	58	18,00	1044,00
3	LADRILLO REFRACTARIO CUADRADO BASE Y TAPA	PZA.	5	30,00	150,00
4	PLANCHA DE 2 MM	PZA.	1	185,00	185,00
5	QUEMADOR	PZA.	1	300,00	300,00
6	CEMENTO REFRACTARIO	KG	10	8,00	80,00
7	ARENA REFRACTARIA	KG	10	4,00	40,00
8	BAUXITA O CHAMOTA	KG	15	5,00	75,00
9	LANA DE VIDRIO O MANTA REFRACTARIA	MTS.	2	150,00	300,00
10	PLETINA DE 4 MM x 2"	MTS	4	30,00	120,00
11	TURBINA Y MOTOR	PZA.	1	1450,00	1450,00
12	MANGUERA	MTS	2	26,00	52,00
13	ELECTRODO	KG	2	25,00	50,00
14	UNIÓN UNIVERSAL DE 2"	PZA.	1	35,00	35,00
15	DISCO DE CORTE	PZA.	1	25,00	25,00
		TOTAL			5306,00

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

Con la propuesta Trabajo de Aplicación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Que toda la investigación recopilada mediante la investigación fue de suma importancia para comprender el funcionamiento, métodos de construcción y parámetros de elaboración de los diferentes elementos que componen un horno de crisol. Esto permitió que el horno llegara a diseñarse acorde a la necesidad para el proceso de enseñanza aprendizaje en la materia de Tecnología de los Materiales de la carrera de Mecánica Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés.
- Las pruebas realizadas en el momento de funcionamiento permiten validar los parámetros de construcción presentados al obtener temperaturas de 1600 °C, en el interior del horno sin carga de fundición, temperatura suficiente para la fundición de materiales no ferrosos, tal el caso de Aluminio y Cobre; sin embargo, cabe recalcar, que esta temperatura fue únicamente para probar la capacidad del conjunto horno quemador, y no se mantuvo por mucho tiempo. No obstante, resulta poco seguro, tanto para la integridad del horno como para los operarios, llevar la operación del horno a estas temperaturas. Estas pruebas nos proporcionaron datos importantes de comprobación de la correcta selección de los materiales refractarios y aislantes; debido a que el horno aun a las temperaturas antes mencionadas mantiene en su exterior un nivel de temperatura seguro para los presentes.
- El proceso de construcción mostró la necesidad imperativa de las habilidades técnicas para la elaboración de moldes para las paredes y bases del horno, estructuras de soporte y correcto ensamble de las piezas; concluyéndose entonces que de no haber tenido a disposición de colaboradores y asesores técnicos oportuna para realizar el trabajo, este hubiera presentado problemas en

el funcionamiento a corto plazo. Bajo este concepto, se brindó un parámetro de construcción, que posteriormente incluyó nuevos elementos acorde a necesidad y experiencia, llegaron a ser los pequeños detalles que mejoraron el funcionamiento, confiabilidad y utilidad del horno.

- Con respecto a la evaluación de la puesta en marcha, esta llegó a ser satisfactoria, dando a conocer datos muy valiosos que permiten comparar el funcionamiento real con respecto al simulado, estos datos mostraron que el horno cumplió los parámetros esperados de operación y, que los elementos seleccionados y dimensionados, cumplieron su propósito.

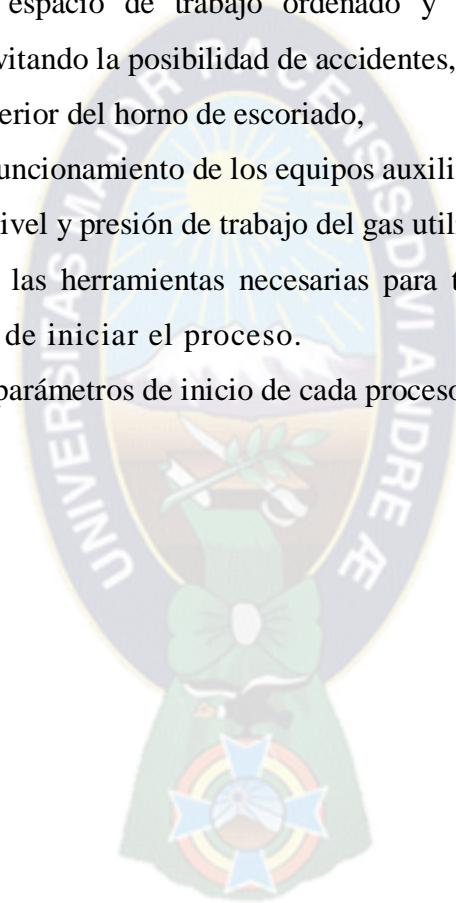


RECOMENDACIONES

Se deberá iniciar el trabajo verificando los elementos de seguridad personal según las normas vigentes de seguridad y salud ocupacional para fundición.

Para la operación se deberá de cumplir con la guía siguiente:

- Mantener el espacio de trabajo ordenado y limpio, aplicando criterios de seguridad y evitando la posibilidad de accidentes,
- Limpiar el interior del horno de escoriado,
- Controlar el funcionamiento de los equipos auxiliares,
- Controlar el nivel y presión de trabajo del gas utilizado
- Verificar que las herramientas necesarias para todo el proceso estén en buen estado antes de iniciar el proceso.
- Registrar los parámetros de inicio de cada proceso de fundición.



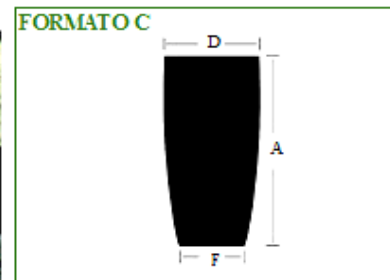
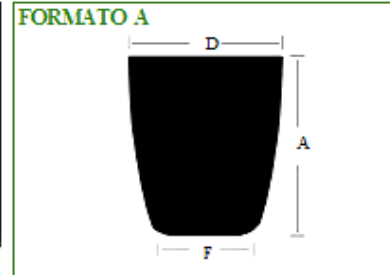
ANEXOS

ANEXOS 1 Crisol elegido AFG 10 en formato A

SALAMANDER GF

CADINHOS DE GRAFITE LIGADO A CARBONO

QUALIDADE, TECNOLOGIA, TRADIÇÃO, PERFORMANCE, SATISFAÇÃO



FORMATO A

Capacidade aprox.

Referência	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Fundo (mm)	Vol. (L)
AGF1	97	78	53	0.1
AGF2	114	106	75	0.25
AGF3	135	105	75	0.35
AGF4	145	125	85	0.45
AGF5	153	125	86	0.6
AGF6	172	143	99	0.75
AGF8	186	142	99	0.9
AGF10	196	170	116	1.3
AGF13	223	170	115	1.55
AGF16	234	205	144	2.15
AGF20	249	200	140	2.5
AGF25	249	225	154	3.5
AGF30	300	230	155	4.6
AGF40	326	260	178	6.2
AGF50	343	256	176	7
AGF60	362	290	200	10
AGF70	388	290	201	10.8

* AGF1 até AGF10 são fornecidas com pequeno bico
 * TGF para vazamento pelo topo em formas basculantes
 * TGF cadinhos com bico para formas basculantes
 * Capacidade 90% em litros

Referência	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Fundo (mm)	Vol. (L)
AGF80	391	324	232	14
AGF100	426	326	235	15.8
AGF120	435	362	253	22
AGF150	487	365	255	25
AGF200	532	420	295	34
AGF250	590	420	293	40
AGF300	584	456	327	47
AGF400	667	505	300	61
AGF500	671	534	338	70
AGF600	733	534	340	80
AGF1000	837	615	425	133

FORMATO C

Referência	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Fundo (mm)	Vol. (L)
CGF200	627	379	275	33
CGF300	685	432	290	47
CGF400	784	435	295	60
CGF500	954	440	290	72
CGF800	987	555	370	126



MORGANITE BRASIL LTDA

Avenida do Taboão, no. 3265 - Taboão - S.B.C. - SP - Brasil - CEP 09656-000 • Fones: (11) 4075 0400 / 4178 1999 • www.morganite.com



ANEXO 2

GUÍA DE CAPACITACIÓN LABORAL EN SEÑALIZACIÓN DE SEGURIDAD¹

SEÑALIZACIÓN DE SEGURIDAD: **COLORES, SEÑALES Y CARTELES DE SEGURIDAD PARA LOS** **LUGARES DE TRABAJO**

1. INTRODUCCIÓN.

Es el conjunto de estímulos que informa a un trabajador o individuo, acerca de la mejor conducta a seguir ante unas circunstancias que conviene resaltar.

2. PROPÓSITO DE LOS COLORES Y DE LAS SEÑALES DE SEGURIDAD.

El propósito de los colores y de las señales de seguridad es de llamar rápidamente la atención sobre objetos y situaciones que afecten la seguridad y la salud para lograr una comprensión rápida de un mensaje específico.

Las señales de seguridad deben ser usadas únicamente para dar instrucciones que estén relacionadas con la seguridad y la salud.

3. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES.

Para que toda señalización sea eficaz y cumpla su finalidad debe emplazarse en el lugar adecuado a fin de que:

- Atraiga la atención de quienes sean destinatarios de la información.
- De a conocer la información con suficiente antelación para poder ser cumplida.
- Sea clara y con una interpretación única.
- Informe sobre la forma de actuar en cada caso concreto.
- Ofrezca la posibilidad real de cumplimiento.

¹ Elaborado con base en la Norma Boliviana NB – 55001 del Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA).

- La señalización debe permanecer en tanto persista la situación que la motiva.

4. TIPOS DE SEÑALES.

Las señales de Seguridad e Higiene se clasifican en señales de **Prohibición, Advertencia o Precaución, Obligación e Información.**

Ejemplos de estos tipos de señales se muestran a continuación:

a) SEÑALES DE PROHIBICIÓN (ROJO).



b) SEÑALES DE OBLIGACIÓN O MANDATORIOS (AZUL).



USAR ANTEOJOS PROTECTORES.

Se colocaran en aquellas áreas de trabajo o talleres donde se desarrollen actividades con desprendimiento de partículas, luz intensa o gases que puedan lesionar a los trabajadores.



USAR PROTECTOR AUDITIVO.

Se colocaran en la entrada y en el interior de aquellas áreas de trabajo o talleres donde el ruido generado cause molestias o exista la posibilidad de provocar lesiones auditivas a los trabajadores.



USAR CASCO PROTECTOR.

Se colocaran en la entrada y en el interior de aquellas áreas de trabajo donde se desarrollen actividades o existan objetos que puedan lesionar la cabeza de los trabajadores.

c) SEÑALES DE PRECAUCIÓN (AMARILLO).



CUIDADO PELIGRO DE FUEGO.

Se colocaran a la entrada de lugares en los que exista el riesgo de que se provoque el fuego.



CUIDADO ALTO VOLTAJE.

Se colocaran a la entrada de lugares que en su interior tengan interruptores, tableros de distribución, centros de control de motores y subestaciones, que por la tensión manejada sea un riesgo para los trabajadores.

d) SEÑALES DE INFORMACIÓN (VERDE).



SALIDA DE EMERGENCIA.

Se colocaran en las zonas cercanas a las escaleras, cuando estas no sean visibles desde el interior de las oficinas, para indicar la ubicación de una escalera de emergencia.



SENTIDO DE EVACUACIÓN.

Se colocaran en el interior de todas las oficinas o sus instalaciones, para indicar la dirección de una ruta de evacuación en el sentido requerido.

5. MARCADO DE LA SEÑALIZACIÓN DE SEGURIDAD.

a) Los colores para el marcado de la señal de seguridad, que indique la localización de un peligro deben ser de una combinación de amarillo y el contraste con el negro, como se muestra a continuación:

- Combinación de colores: Amarillo y contraste con negro.



Fig. Marcado de la señalización de seguridad para indicar la localización del peligro.

b) Los colores para el marcado de la señal de seguridad que indique la prohibición o localización del equipamiento de protección contra incendios deben ser una combinación del rojo y el contraste con blanco, como se muestra.

- Combinación de colores: Rojo y contraste con blanco.



Fig. Marcado de la señalización de seguridad para indicar la prohibición o localización de los equipos de protección contra incendios.

c) Los colores para el marcado de la señal de seguridad que indique una instrucción obligatoria deben ser de una combinación de azul y el contraste con el blanco, como se muestra.

- Combinación de colores: Azul y contraste con blanco.

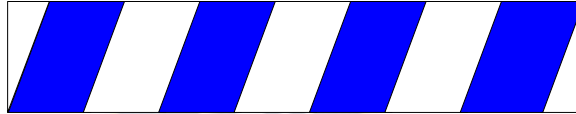


Fig. Marcado de la señalización de seguridad para indicar instrucción obligatoria.

d) Los colores para el marcado de la señal de seguridad que indica una condición segura, deben ser una combinación del verde y el contraste con blanco como se muestra.

- Combinación de colores: Verde y contraste con blanco.



Fig. Marcado de la señalización de seguridad para indicar condición segura.

6. MATERIALES.

Los carteles serán de un material que resista, lo mejor posible, los golpes, las inclemencias del tiempo y las agresiones medioambientales, podrán estar fabricados de materiales metálicos (chapa de aluminio, acero, etc.), plástico (metacrilato, policarbonato, PVC, ABS, etc.) o cualquier otro que cumpla las especificaciones de esta norma. A solicitud del comprador, el fabricante definirá el material de la placa.

7. SEÑALIZACIÓN BAJO LA NORMA BOLIVIANA 55001.

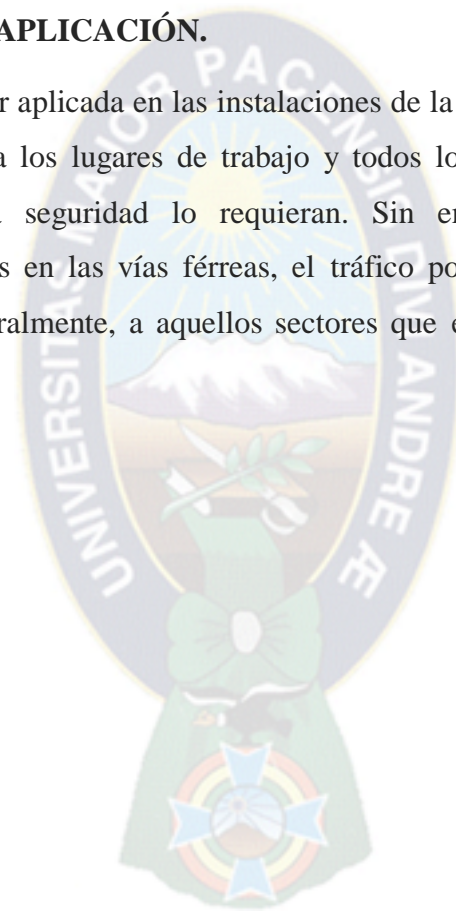
Existe la necesidad de normalizar un sistema que transmita una información sobre la seguridad y que podamos reducir a un mínimo el uso de palabras para lograr el

entendimiento. La carencia de normalización en este sentido puede conducir a la confusión y quizás a accidentes.

Aunque los colores y señales de seguridad son esenciales para cualquier sistema de información sobre la seguridad ello no reemplaza el uso de métodos de trabajo propios, instrucciones ni las medidas y el adiestramiento para la prevención de los accidentes.

7.1 CAMPO DE APLICACIÓN.

Esta es la norma a ser aplicada en las instalaciones de la Empresa en todos sus aspectos, y es aplicable solo a los lugares de trabajo y todos los sectores donde las cuestiones relacionadas con la seguridad lo requieran. Sin embargo no se aplican a las señalizaciones usadas en las vías férreas, el tráfico por carreteras, ríos, tráfico aéreo como fluvial y generalmente, a aquellos sectores que estén sujetos a otros tipos de regulaciones.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. ASM committee. (1998). ASM Handbook - Casting (Vol. 15). ASM International
- II. BUÑAY. J. 1989. Diseño y construcción de un horno de crisol. (tesis)
- III. Haan, E. R. (1964). Horno de Fundición. Mecánica Popular.
- IV. Heine, R. W., Loper, C. R., & Rosenthal, P. C. Principles of Metal
- V. Horno de Reverbero 2011: <http://www.emison.es/>
- VI. http://www.mtec.or.th/images/users/78/FAQ_refractoryMetal/m158content.pdf
- VII. J. J. Medina Cia. Ltda. (s.f.). Recomendaciones para la instalación y secado de hormigones refractarios.
<http://jjmedina.com.ec/Instalacion%20de%20Hormigones%20Refractarios.pdf>
- VIII. Ladrillo Refractario: <http://lima-distr.all.biz/ladrillo-refractario-g43466>
- IX. Manual del Fundidor. Barcelona - España: Gustavo Gili S.A.
- X. Metalinsumos. Uso y cuidado de crisoles.
<http://www.metalinsumos.com/descarga/art3.pdf>.
- XI. Morales, A. M. Revestimientos Refractarios Monolíticos para Calderas.
<http://boletines.secv.es/upload/196504495.pdf>.
- XII. Obtención del Cobre. Slide Share: [http:// es.slideshare.net/arian1881/obtencion-del-cobre](http://es.slideshare.net/arian1881/obtencion-del-cobre).
- XIII. Refractarios Proyectados.
<http://www.byronruizg.com/airenic/Concretos%20Refractarios%20Proyectados.pdf>
- XIV. Refractory Engineering (Segunda edición ed.). Essen, Alemania: Vulkan-Verlag.
- XV. SALVI. Giuliano 1975.: quemadores de combustión teoría y aplicaciones.
- XVI. Seybolt, A. U., & Burke, J. E. (1969). Técnicas de metalurgia experimental. México.
- XVII. Tecnología de la Fundición. Barcelona - España: Gustavo Gili S.A.
- XVIII. Usos y propiedades del aluminio. <http://aluminio.org/?p=821>

XIX. Wikipedia. Material Refractorio. Wikipedia the free encyclopedia:

http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractorio

XX. www.emison.com

