

Horno de fusión directa de aluminio.

La eficiencia en la fusión de metales es una de las principales preocupaciones en la industria de fundición, pues las reducciones de costos asociados a los combustibles, costos ambientales y de los revestimientos refractarios son proporcionales a la optimización del proceso y la eficiencia de los hornos. En especial, la forma más efectiva de reducir los costos ambientales es con un proceso limpio y eficiente, en lugar de tratar de remediar los problemas generados por un proceso de baja eficiencia.

En nuestros días las unidades más comunes para la fusión de aluminio son el horno de reverbero (tanto fijo como rotatorio) y el horno de crisol; en donde el horno de reverbero es el más común para la fusión de grandes cantidades de metal. Debido a su propio diseño, en el que el calentamiento del metal se hace a través del calentamiento de las paredes del horno (reverberación), el proceso requiere del calentamiento previo de grandes cantidades de material refractario, con el consiguiente desperdicio de energía que no es utilizada propiamente en el proceso de fusión.

El relativamente bajo punto de fusión del aluminio y sus aleaciones y su capacidad calorífica, lo hacen un candidato ideal para promover un sistema de fusión en donde se aprovechen los gases de combustión tanto para el proceso de fusión como el precalentamiento del metal.

Con estas ideas, un grupo de investigadores de **Azófar**, se han dedicado a un programa de investigación y desarrollo para obtener un equipo con características especiales, y así obtener la mas alta eficiencia en la utilización de combustibles. De acuerdo a los estudios que presentaremos mas adelante, la cantidad de energía requerida para la fusión de una tonelada de aluminio, no representa ni el 20% de la capacidad calorífica del combustible utilizado en los hornos tradicionales de fusión, como son el horno de crisol, reverbero o el horno rotatorio.

Esta situación representa un reto que el grupo de investigación de **Azófar**, inicialmente determinó cuales eran las causas principales de esta pérdida de energía:

1. La mayor parte de los equipos en su parte externa (carcasa) alcanzan una temperatura que va desde los 50° C hasta los 150° C aprox. lo que representa una gran pérdida calorífica si consideramos la gran área expuesta de un horno de reverbero; esto se debe al incorrecto aislamiento térmico o a la falta de mantenimiento del espesor de la capa refractaria, que en determinado momento esta demasiado delgada, lo que acerca la cara de contacto refractario al aislamiento térmico con la consiguiente pérdida de eficiencia. Aun con un aislamiento eficiente, las pérdidas de calor en un horno dependen también de su tamaño, en especial del área total de exposición, el medio ambiente; por lo que un horno de dimensiones menores por lo general será más eficiente.
2. Debido a la dificultad de controlar las variables de combustión, en muchas ocasiones el sistema no opera conforme a una relación estequiométrica que garantice una combustión eficiente. Esto, además de representar altos costos de combustión, genera una gran cantidad de contaminantes difíciles de tratar posteriormente.

3. Así mismo, y asociado al punto anterior, los hornos en los que el baño de metal fundido tiene una gran superficie expuesta a los gases de combustión, producen escorias y arrastre de metal proporcionales a esta superficie. En los hornos de reverbero, con grandes áreas, las mermas llegan a ser del 2% al 3%.
4. Es del conocimiento común de los fundidores la existencia de una gran variedad de quemadores, ya sean de flama corta o larga, de ajuste estequiométrico automático o manuales. Tradicionalmente, la elección de un tipo de quemador particular depende de los precios del sistema depende más de una elección técnica, que a largo plazo tiene un mayor beneficio debido a la reducción del consumo de combustible y mejora en el rendimiento de la unidad.
5. Debido a que en la unidades grandes, como los hornos de reverbero, la instrumentación y colocación de los pirómetros controla la temperatura de una cámara de fusión que depende en mayor medida de la temperatura de las paredes refractarias; la cantidad de calor suministrada no es necesariamente la más óptima si consideramos el proceso de fusión del metal. Esto puede observarse prácticamente: cuando el metal se encuentra ya fundido en un horno de reverbero, la temperatura de los gases de combustión en la chimenea se eleva considerablemente.

AUMENTO DE EFICIENCIA.

En los últimos años la justificación del uso de oxígeno para hacer mas eficientes las operaciones de combustión, se han introducido en los usuarios de hornos, trayendo como consecuencia también grandes beneficios en producción y economía.

La conservación del medio ambiente es uno de los retos de mayor importancia en los más diversos sectores de la industria mundial; esto también ha generado un gran interés en los distintos productores de oxígeno, que actualmente ofrecen la modificación de quemadores de gas natural o LP, para trasformarlos en oxiquemadores e incluyen la instalación sin costo del equipo de almacenamiento de oxígeno. Los promotores del uso de oxígeno o mezclas de aire enriquecidas han comprobado que las técnicas de aplicación de oxígeno tienen efectos directos en el decremento de las emisiones de NO_x , por lo que su utilización correcta nos ayuda a disminuir la formación de este agente contaminante. Así mismo, una mezcla enriquecida incrementa la temperatura de la flama, por lo que el tiempo de fusión se acorta por lo que el proceso se hace más rápido y eficiente y menos contaminante. A mayor cantidad de oxígeno en el aire, el volumen de nitrógeno disminuye y la temperatura de la flama aumenta. Las ventajas obtenidas son las siguientes:

1. Temperatura de la flama mayor.
2. Pérdidas por calentamiento de gases de arrastre menores.
3. Tiempo de fusión menores.
4. Disminuir los volúmenes de NO_x .

Conforme a las observaciones anteriores el departamento de ingeniería de ARM diseñó un horno de combustión directa que resuelve de forma eficiente los aspectos anteriores.

Azófar, ya ha puesto en marcha dos hornos de fusión directa conforme a diseños especiales para las necesidades del usuario:

Descripción del equipo.

1. Es un horno con características similares a un horno de túnel, de aproximadamente 3 metros de largo por 2 de ancho y una altura máxima de 90 cms. Provista de un cono de carga de 1 mt de altura por 1.5 mt de largo y 0.75 mt de ancho.
2. Arriba del cono de carga se coloca la campana de medidas equivalentes a las anteriores, compuerta de carga de 1.5 mt de altura y 1.5 mt de ancho, reduciéndose en la parte superior a una chimenea de 60 cms.
3. El horno se carga con lingote o chatarra. Cuando se carga con lingote, el cono de carga mantiene sus dimensiones, cuando se carga chatarra, el cono de carga aumenta su altura en 2 mt ya que la chatarra tiene un volumen mayor y requiere el precalentamiento de la carga.
4. Dependiendo de la forma de la chatarra o pacas, también el ancho de garganta del cono de carga (que en el punto 1 es de 0.75 mt) puede aumentar o disminuir de acuerdo a las características de la carga.
5. El horno al cual nos referimos es para una capacidad de fusión de 4 toneladas por hora de aluminio en lingote o de 3 toneladas en chatarra suelta o en pacas, esto se debe a que cuando se carga lingote, por ser material sólido, al cono de carga le cabe mayor cantidad de material de carga, mientras que cuando se carga chatarra o paca es menor, por consiguiente el precalentamiento con los gases residuales es mas eficiente con lingote que con chatarra o paca.
6. En este ejemplo, el horno esta provisto de 3 quemadores de consumo de 1.5 millones de BTU cada uno, alimentados con gas natural y aire proveniente de un turboventilador de 7.5 hp suministrando 70,500 CFH y 30" columna de agua (WC).
7. Los quemadores están colocados de tal forma que los abanicos de las flamas sean continuos para formar uno solo, que abarque el área completa de contacto de 1.5 mt, donde esta expuesta la carga para que la flama sea directa, para que escurra el metal fundido por el plano inclinado del horno.
8. Para aumentar o disminuir la capacidad de fusión del horno, únicamente habrá que variar el ancho del horno, el shaft o cono de carga y la cantidad de quemadores, de tal forma que cada uno formara un abanico de flama de no menos de 50 cm. continua para formar un solo que abarque el área completa de contacto, y sobretodo se deberá tomar en cuenta el tipo de carga ya sea lingote o chatarra suelta o en paca, así como los diversos tipos de contaminantes que puede traer la misma.

Todo el diseño podrá apreciarse en los planos estructurales, planos de instalación refractaria, de sistema de combustión y eléctrico.

¿En que consiste la fusión directa?

1. La carga se precalienta con los gases de combustión al introducirse por la chimenea del horno, utilizando al máximo la capacidad calorífica de los gases de combustión en todo su recorrido.¹
2. Los quemadores se colocan formando un solo abanico de flama al dirigirlos directamente sobre la parte baja de la carga, incidiendo sobre metal que al fundirse fluirá sobre el piso del horno construido en plano inclinado que lo hace fluir rápidamente a un holder de retención, sin producir oxidación y por tanto pérdidas de metal.
3. En una comparación entre los hornos de reverbero tradicionales y el horno de fusión directa **Azófar**, se puede notar que en el primero se obtienen escorias de aproximadamente el 10% del metal fundido, mientras que en el caso del horno de fusión directa no se llega ni al 0.1%² debido a que al no haber grandes superficies de metal expuestas existe menos oxidación y la utilización de fundentes es mínima.
4. La construcción refractaria de un horno tradicional reverbero para fundir 24 ton de aluminio diarias requiere de una instalación refractaria de aproximadamente 200 toneladas, mientras que un horno de fusión directa para fundir 96 toneladas diarias con lingote y 72 toneladas cuando se trata de chatarra o paca, requiere únicamente de un arreglo refractario de aproximadamente 14 toneladas, por lo que en el horno de fusión directa únicamente tendremos que calentar 14 toneladas de refractario en lugar de 200 ton como es el caso del horno tradicional.
5. El mantenimiento refractario anual normalmente consiste en reponer la sexta parte del peso del horno aproximadamente, y como es de suponer el costo siempre será menor en un horno de 14 toneladas que en uno de 200 toneladas.

Eficiencia del horno de fusión directa.

La eficiencia depende principalmente de la completa combustión de los gases, la cantidad de calor producida por los gases de combustión, la eficiencia del aislamiento, efectividad del revestimiento refractario, las técnicas adecuadas de operación, el tipo de carga a fundir (lingote, chatarra suelta o en paca) y el contenido de otros metales, suciedad, aceites, pintura, tierra, etc.

La fusión en hornos directos con tecnología **Azófar**, se hace mas eficiente atacando directamente a cada uno de los factores anteriores, como por ejemplo:

¹ Este punto es de vital importancia ya que de no seguirse esta recomendación, los gases residuales saldrán libres y la campana no esta diseñada para soportar altas temperaturas, con las consiguientes deformaciones de la carcasa.

² Siempre y cuando se cargue lingote, chatarra o paca de aluminio, esta no contenga otros metales y el metal este libre de grasa, pintura, tierra, óxidos, etc.

Eficiencia de combustión- La combinación de la tecnología de nuestra compañía en combinación con las tecnologías investigadas en conjunto para la aplicación del sistema de combustión, hemos obtenido una mayor eficiencia, ya que de acuerdo a un diseño de modificaciones efectuadas a los quemadores con la incorporación de oxígeno, aumentan la temperatura de la flama aportando una mayor cantidad de calor en comparación con los sistemas aire combustible.

En algunos casos se puede utilizar un sistema duplex que utilice oxígeno en las operaciones de fusión y aire durante el mantenimiento del metal fundido.

En conjunto con estos sistemas **Azófar**, ha desarrollado refractarios especiales que soporten estas condiciones mas severas provocadas por la utilización de oxígeno. La temperatura de los gases de combustión y la atmósfera oxidante fuerzan la utilización de refractarios de mayor calidad.

Eficiencia de aislamiento- Hemos tenido un amplio cuidado en el acomodo del aislamiento térmico, en el que hemos considerado la instalación de una capa de fibra cerámica de 1" de espesor cubriendo en su totalidad el área de la carcasa del horno, esta considerado la instalación de tabique aislante **A23** en un espesor de 4 ½"

Efectividad del revestimiento refractario- La instalación de un refractario especial diseñado para la fusión de aluminio en la que se ha utilizado oxido de aluminio electrofundido de 95% de alta pureza, en el que se ha incorporado compositos que impidan la penetración de metal, así como cementantes especiales que endurezcan rápidamente este concreto.

Eficiencia de operación- Este equipo esta dotado con la instalación de un PLC en el cual podemos programar todos los requerimientos para obtener una alta eficiencia de operación. Está instalado 1 pirómetro que indica la temperatura de la flama, de tal manera que cuando ya no existe metal en el cono de carga la flama se va y choca ya no contra la carga sino contra el refractario, que detecta el PLC que da instrucciones para que suba otra carga automáticamente.³

El horno debe mantenerse siempre con carga en el cono, con la finalidad de mantener carga en precalentamiento y mantener los gases de salida de combustión en una temperatura que no exceda el rango entre 150° C y 200°. De esto dependerá en gran medida, mantener el volumen de fusión en tonelaje constante y cuidar cualquier deformación en la campana de salida de gases residuales con el consiguiente aumento de contaminantes.

El horno cuenta con un programa para saber en que momento la puerta de carga deba abrirse o cerrarse. Cuando por alguna razón el carro de suministro de carga no ha sido acercado al elevador de carga, suena una alarma que indica que el operador del horno no ha cumplido con el requerimiento establecido.

Esto traerá como consecuencia un alargamiento en el tiempo de fusión debido a que la carga no fue previamente calentada, por lo anterior **Azófar**, Proporciona a los usuarios de estos equipos servicios de asesoramiento, seminarios de uso y operación, capacitación, visitas técnicas continuas de ingenieros expertos en materia de combustión, metalurgia y refractarios.

³ Esto se logra cuando se trata de fusión de lingote, retornos o chatarra sólida, debido a que estas cargas son uniformes en cuanto a peso y volumen. No es posible con chatarra que sea variable en estas características.

Tratamiento metalográfico- Sin duda se sabe que la utilización de fundentes, desgasificantes, refinadores, modificadores, etc. Es nociva para el revestimiento refractario, sin embargo son algunos de los males necesarios para obtener fusión de metal que cumplan ampliamente con las normas requeridas, por lo cual también **Azófar**, se dio a la tarea de desarrollar productos para la obtención de ligas de calidad en la fusión de metales, ocasionando los mínimos daños al revestimiento y por lo cual ha diseñado productos especiales que además de utilizarse en bajo porcentaje no provoquen gran cantidad de humos y gases que ocasionen altas contaminaciones y están diseñados especialmente para la operación de este tipo de hornos.

Evaluación económica.

En la presente evaluación tomamos información sobre las condiciones actuales de dos compañías una utilizando el horno reverbero para fusión de 30 toneladas de aluminio y otra usando un horno reverbero basculante para fusión de 40 toneladas de aluminio diarias, en comparación con los hornos de fusión directa que actualmente se encuentran en funcionamiento.

| Concepto | Horno reverbero 30 toneladas diarias de fusión | Horno reverbero basculante de 40 tons de aluminio | Horno de fusión directa |
|---|--|---|--------------------------------------|
| Horno reverbero 30 toneladas diarias de fusión | Planta B | Planta C | Planta A |
| Consumo facturado de mt ³ de gas natural | 511,140 mt ³ (4715.4 gkal) | 327,578.8 mt ³ (3022 Gkal) | 98,890 mt ³ (912.28 Gkal) |
| Precio de Gkal (PEMEX) | \$82.71 | \$82.71 | \$82.71 |
| Costo de consumo mensual | \$390,000.00 | \$250,000.00 | \$75,455.00 |
| Producción mensual | | | |
| Fusión | 900 tons de aluminio | 1,200 tons de aluminio | 624 tons de aluminio |
| Retención | 900 tons de aluminio | 0 | 624 tons de aluminio |
| Cuchareo | 0 | 0 | 624 tons de aluminio |
| Total fusión y matto. | 1,800 tons de aluminio | 1,200 tons de aluminio | 1,872 tons de aluminio |
| Costo por ton fundida | \$216.67 | \$208.33 | \$40.31 |
| Ahorro de combustible | | | B = 81.0% C = 80.6% |
| Mermas | 3% | 2% | 0.1% |
| Disminución de contaminantes | | | B = 81.0% C = 81.0% |
| Refractario instalado | 200 tons aprox. | 200 tons aprox. | 14 tons aprox. |
| Ahorro en inversión por refractarios | | | 93% en tonelaje |
| Turbo ventilador instalado | 20 hp | 20 hp | 7.5 hp |
| Consumo en Kw | 16,092 kw | 16,092 kw | 9,785 kw |
| Costo Kw | \$1.25 | \$1.25 | \$1.25 |
| Costo total Kw | \$20,115.00 | \$20,115.00 | \$12,231.00 |
| Ahorro de energía | | | 60% |

Estudio de gases residuales.

Enterprise haciendo equipo con el personal técnico de **Azófar**, realizó varias combinaciones de ajuste estequiométrico al quemador **Eclipse TU150**, tomando como variables de ajuste presiones y volúmenes, tanto en aire como en gas, logrando una flama estequiométricamente eficiente. Esto se logró mediante la medición de gases residuales en la chimenea de salida, con la puerta de carga abierta, semi abierta y cerrada, tanto como con carga y si ella, habiéndose tenido la oportunidad de medir las diversas variables que pueden presentarse en el manejo habitual del horno y por consecuencia aumentar o disminuir la producción del horno de fusión directa **Azófar**.

Esta tecnología de combustión, en combinación con el diseño del horno, como los refractarios y aislamientos diseñados para este equipo, hacen que el resultado sea un horno de características nunca antes logradas.

El horno sin contar con un equipo adicional anticontaminante, por si solo disminuye las emisiones de gases hasta en un 80% y el 20% restante queda dentro de los parámetros.

| Descripción | Sin carga | Con carga |
|---------------------------------|-----------|-----------|
| Contenido de O ₂ (%) | 3.7 | 3.1 |
| Contenido de CO (ppm) | 414 | 0 |
| Contenido NO (ppm) | 72 | 0 |
| Temperatura de humos ° C | 900.6 | 165.4 |
| Temperatura ambiente ° C | 26.4 | 26.4 |
| Per. Por humos % | 48.7 | 6.5 |
| Contenido de CO ₂ | 9.8 | 10.2 |
| Exceso de aire | 1.21 | 1.17 |
| Contenido de NOx (ppm) | 75 | 0 |
| Valor CO ₂ max. | 11.9 | 11.9 |
| CO corregido (ppm) | 503 | 0 |
| Rendimiento % | 51.0 | 93.5 |
| Pérdida en BTU/hr | 735,000 | 97,500 |
| Perdida en BTU/hr (%) | 49.0 | 6.5 |

Estudio de cargas y eficiencia.

| Lugar de carga | Material de carga | | |
|-------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| | Lingote | Chatarra suelta | Chatarra en paca |
| Carga en el cono | 3,000 Kg. | 800 Kg. | 600 Kg. |
| Altura del cono | 1 mt | 1 mt | 1 mt |
| Modificación del cono | 1 mt | 2 mt | 2 mt |
| Carga en el cono | 3,000 Kg. | 1,600 Kg. | 1,200 Kg. |
| Capacidad de fusión /hr | 4,000 Kg. | 3,500 Kg. | 3,500 Kg. |
| Impurezas en carga | 0.09 % | 10% | 10% |
| Producción de escorias | 0.10% | 10.10% | 10.10% |
| Recargas por hora | 4 de 1 ton/ 15 min. | 12 de 250 Kg. / 5 min. | 12 de 250 Kg. / 5 min. |
| Temp. gases residuales | 150° C | 300° C | 400° C |
| BTU /hr | 4,500,000 | 4,500,000 | 4,500,000 |
| Eficiencia combustión | 100% | 88% | 88% |

Conclusiones.

En algunas otras partes del mundo se esta investigando sobre la técnica de fusión directa, aún cuando a la fecha tiene algunos equipos similares, no cuentan con la eficiencia térmica y de diseño adecuados, por lo que el consumo en combustible es mayor en 100%, en comparación a la tecnología desarrollada por **Azófar**. Independientemente del precio de otros equipos que representa mas del 500% en comparación a los hornos directos de tecnología **Azófar**, fabricados orgullosamente en México.

Con lo anteriormente expuesto nuestra empresa continuara con una amplia difusión a nivel nacional e internacional, para dar a conocer las cualidades tan especiales de este equipo que sin duda alguna debido a la gran cantidad de características positivas y especiales , no dudamos en que los usuarios fundidores le provocará amplio interés en el uso de estos equipos, que como se demuestra en la evaluación económica que con el ahorro de alrededor de 6 meses en combustibles, energía y disminución de escorias estaríamos en condiciones de amortizar el coste total del equipo, independientemente de la disminución en contaminantes de mas del 70%

EN LA ACTUALIDAD ESTAMOS FABRICANDO HORNOS DE FUSIÓN DIRECTA CON CAPACIDADES DE FUSIÓN DESDE 500 KG/HR A 4,000 KG/HR Y EL COSTO DEPENDE DE LOS REQUERIMIENTOS DE AUTOMATIZACIÓN, SEMI AUTOMATIZACIÓN U OPERADOS DE FORMA MANUAL.