XXIII.- CIERRES EN CALDERAS

pfernandezdiez.es

Estanqueidad de la caldera	*877*
Cerramientos con paredes tubulares:	*879*
Paredes membrana	*879*
Paredes membrana con revestimiento refractario	*879*
Paredes de tubos con aletas planas	*880*
Paredes de tubos tangentes	*881*
Mejora de paredes con tubos de aletas y tubos tangentes	*881*
Cerramiento de envolventes	*883*
Tolvas	*883*
Caja de aire	*883*
Cámara de humos de atemperación	*883*
Cobertizo	*884*
Consideraciones de diseño:	*884*
Resistencia a la ceniza en polvo y escoria	*884*
Expansiones	*885*
En unidades apoyadas	*885*
En unidades colgadas	*886*
Soportes	*886*
Explosiones	*886*
Implosiones	*887*
Vibraciones	*887*
Pérdidas de calor	*888*
Materiales para aislamiento térmico	*888*
Lana mineral, bloques y mantas	*888*
Bloques de silicato cálcico	*888*
Pasta plástica para alta temperatura	*888*
Fibras cerámicas	*888*
Cálculos	*889*
Flujo de calor a través de una pared compuesta	*889*
Ventilación y temperatura superficial	*890*
Fugas e infiltraciones	*892*
Corrosión	*892*
Resistencia a la intemperie	*893*
Fabricación y montaje	*893*
Referencias	*895*

XXIII.1.- ESTANQUEIDAD DE LA CALDERA

El sistema de estanqueidad de la caldera (fumistería) comprende todas las paredes de la unidad que están refrigeradas por agua, la carcasa (envolvente interna), el aislamiento, el cubrimiento (envolvente externa) y el cerramiento del hogar. El concepto de cerramiento se puede referir a la totalidad del sistema de estanqueidad o a una parte del mismo.

La fumistería ha experimentado una larga evolución:

- Desde superficies de ladrillo no refrigeradas a paredes refrigeradas por agua configuradas por tubos muy separados respaldados con bloques de aislamiento

- Y desde tubos tangentes cubiertos con refractario, expuestos directamente al proceso de combustión, hasta la construcción actual de los tubos de membrana o paredes membrana

Los sistemas de estanqueidad de la caldera tienen que contener de forma segura, los humos y el aire, presurizados y a altas temperaturas.

Las fugas (infiltraciones) de intercambio con la atmósfera circundante, las pérdidas de calor y el mantenimiento se tienen que reducir a valores aceptables.

A la hora de diseñar estos sistemas de estanqueidad existen una serie de factores a tener en cuenta:

a) Los cerramientos o sistemas de estanqueidad deben soportar los efectos de las altas temperaturas, que alcanzan hasta los 3500°F (1927°C).

b) La acción de la ceniza se debe considerar desde los siguientes puntos de vista:

- Reacciones químicas destructivas entre la escoria y el metal de los tubos o el refractario

- Acumulación de ceniza sobre las paredes de agua, como escoria o polvo, que pueden reducir notablemente la absorción de calor

- Acumulación de ceniza que se puede desprender provocando lesiones al personal y daños al equipamiento de la caldera

- Altas velocidades de las partículas de ceniza en polvo que pueden erosionar las partes a presión y el refractario

c) Se deben tomar medidas para permitir la expansión de los cerramientos y de componentes ligados a los mismos

d) El sistema de vigas estructurales de atado del cerramiento se diseña para que puedan hacer frente a:

- la expansión térmica
- las solicitaciones de presión y temperatura
- las posibles cargas debidas al viento y terremotos exigidas por el lugar de emplazamiento

e) Hay que considerar los efectos de explosiones o implosiones, para reducir la probabilidad de lesiones al personal y de desperfectos en el equipo

f) Hay que limitar las vibraciones debidas a las *- pulsaciones propias de la combustión*
- características del flujo de humos y aire *, a valores aceptables para un normal funcionamiento*

g) El aislamiento de los cerramientos debe limitar las pérdidas hasta un mínimo económico

h) La temperatura de las superficies exteriores de la unidad, y la temperatura del medio ambiente que la rodea, no tienen que causar molestias ni riesgos para el personal

i) Los cerramientos han de ser estancos a gases para minimizar las *- infiltraciones (al interior)*
- fugas (al exterior) *entre el recinto estanco y el medio que lo rodea*

j) Los cerramientos de las unidades pueden requerir lavados periódicos, por lo que tienen que ser estancos al agua; deben incluir accesos para las necesidades de inspección y mantenimiento

XXIII.2.- CERRAMIENTOS CON PAREDES TUBULARES

La estructura básica del cerramiento en las unidades modernas, especialmente en las zonas de alta temperatura del sistema de estanqueidad, se utilizan tubos refrigerados por agua o por vapor.

Los tipos de cerramientos refrigerados por agua, comprenden los tubos:

- Membrana o pared membrana

- Membrana con revestimiento de refractario

- Con clavos, púas planas, o aletas

- Tangentes

PAREDES MEMBRANA.- Las Figs. XXIII.1 representan la pared de hogar correspondientes a dos construcciones de pared membrana. Estas paredes están refrigeradas por agua y se construyen con tubos lisos unidos entre sí mediante unas delgadas varillas metálicas. Las paredes así configuradas son estancas a gases, y no precisan envolvente interna para contener de forma segura los productos de la combustión. En el exterior de la pared se dispone el aislamiento y el revestimiento de chapa (envolvente externa) para proteger el material aislante.

Paredes membrana con revestimiento refractario.- En algunos tipos de calderas hay ubicaciones que requieren un revestimiento refractario *- sobre los tubos*
- del lado del hogar, para protegerlos de la erosión o corrosión provocadas por los productos de la combustión, Fig XXIII.2; se utilizan en:

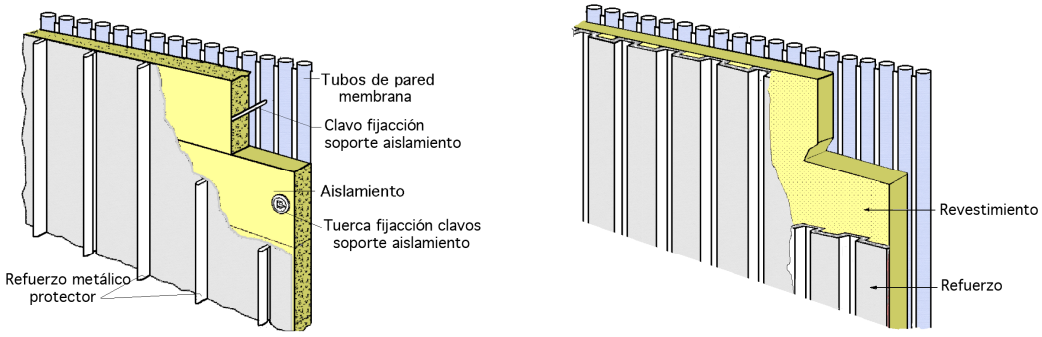


Fig XXIII.1.- Construcción y refuerzos de pared membrana

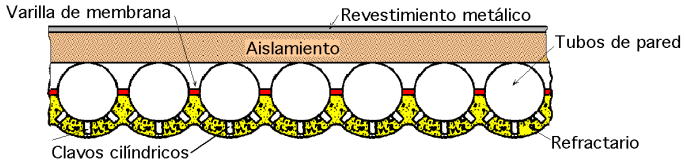


Fig XXIII.2.- Pared membrana completamente claveteada

- El hogar inferior y las paredes del combustor en unidades dotadas con combustores ciclón

- El hogar inferior de calderas con lechos fluidificados circulantes

- El hogar inferior de calderas que queman residuos y basuras

- La garganta de los recintos de fuego (o quemadores) de calderas que queman carbón pulverizado

Para sostener el refractario, en la parte caliente de los tubos se sueldan un conjunto de espárragos cilíndricos o clavos, muy poco espaciados entre sí..

Mediante el revestimiento de la pared, configurado con la aplicación del refractario, se puede incrementar la temperatura del hogar en determinadas zonas, al reducirse la absorción de calor, lo que ayuda a mantener la ceniza del combustible (carbón, turba o lignito) en estado líquido, evitándose las grandes acumulaciones de escoria y facilitando la retirada de la misma.

A causa de problemas de mantenimiento, es preferible evitar la utilización del refractario siempre que técnicamente sea aceptable.

PAREDES DE TUBOS CON ALETAS PLANAS.- Se componen de tubos que tienen soldados, a lo largo de las generatrices, unos pequeñas aletas planas, Fig XXIII.3. Las paredes de los tubos con aletas están realizadas por alguno de los métodos constructivos que se encuentran en los cerramientos de los pasos de convección.

a) En el método normal, los tubos con aletas tienen un respaldo de material refractario recubierto con una carcasa o envolvente interna caliente soldada, que se tapa con aislamiento, que a su vez está cubierto con una envolvente externa (o revestimiento metálico) para protección.

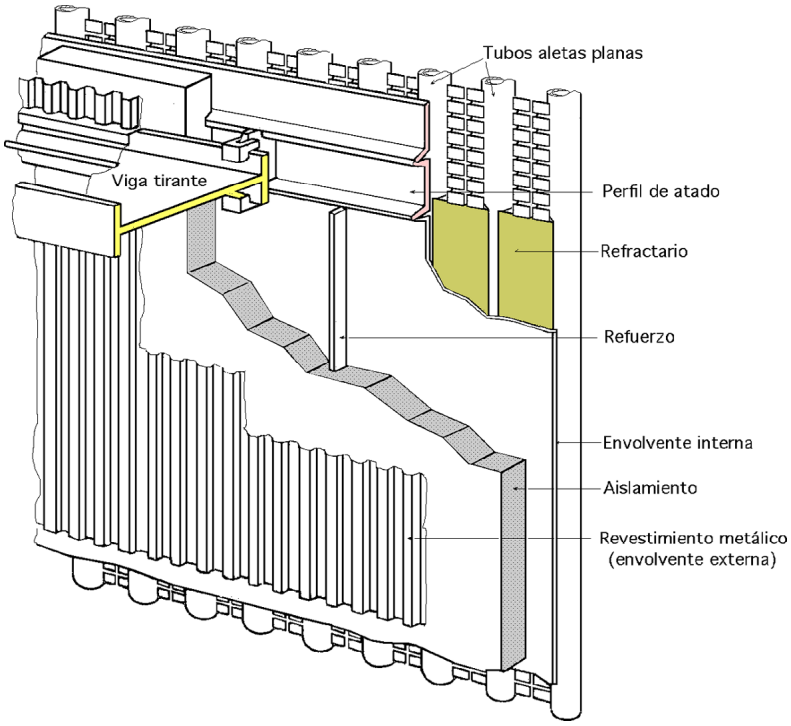


Fig XXIII.3.- Pared de tubos con clavos planos (aletas) mostrando la envolvente interna

La carcasa está sujeta por soldadura a los perfiles de atado, que son unas vigas en U soldadas a los tubos, en cada nivel de vigas tirante. Las paredes se refuerzan con vigas tirante y la carcasa con nervios. El espaciado y dimensionado de estos nervios se establecen según sea la presión de diseño sobre las paredes, entre vigas tirante; este sistema facilita el mejor cierre estanco a gases.

b) Otro método, no utilizado, que se puede encontrar en calderas antiguas todavía en servicio, consiste en que los tubos con aletas planas tienen en su parte posterior un $\begin{cases} \text{- } material\ refractario \\ \text{- } aislamiento\ denso \end{cases}$

El revestimiento externo frío soportado con las vigas de atado, mediante juntas de expansión en los puntos de unión, minimiza las solicitaciones provocadas por las expansiones diferenciales entre la pared caliente de los tubos y el revestimiento frío en el revestimiento

Aunque la construcción de la envolvente se aplica a zonas que tienen refuerzos horizontales de vigas tirante, algunos diseños de calderas industriales requieren revestimientos con perfiles de atado verticales, que se sueldan verticalmente a un perfil ubicado entre los tubos de la pared.

PAREDES DE TUBOS TANGENTES.- Se construyen con tubos lisos colocados muy próximos entre sí, con una separación de 0,03” (0,76 mm). Estas paredes se encuentran en el área del hogar de antiguos diseños de calderas, Fig XXIII.4.

Mejora de paredes con tubos de aletas y tubos tangentes.- Para facilitar un mejor sellado del cerramiento se han utilizado dos métodos distintos:

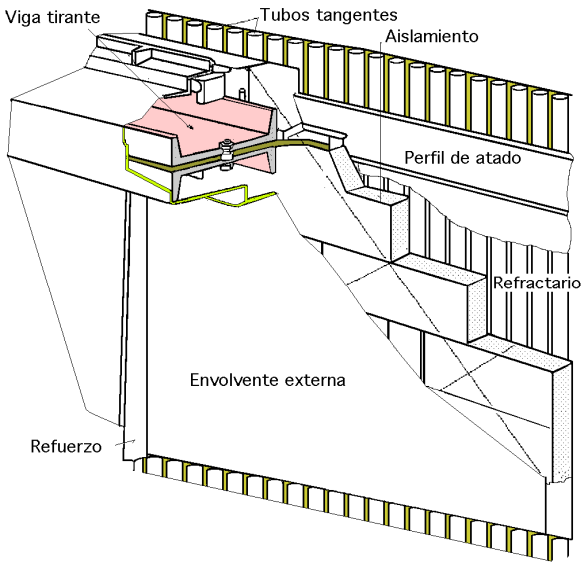


Fig XXIII.4.- Construcción de pared de tubos tangentes mostrando la envolvente externa

- Para áreas de cerramiento de calderas con tubos tangentes en unidades cuya estanqueidad se conseguía con una carcasa caliente o envolvente interna, el sellado consiste en soldar una barra redonda entre cada dos tubos, a lo largo de los mismos, Fig XXIII.5.

- Para áreas de cerramiento de calderas con tubos dotados con aletas planas y, por tanto, muy separados entre sí, en unidades que conseguían la estanqueidad con una envolvente exterior fría, el sellado se obtiene mediante pletinas que se sueldan entre tubos adyacentes, justamente detrás de las aletas, a lo largo de los mismos, Fig XXIII.6.

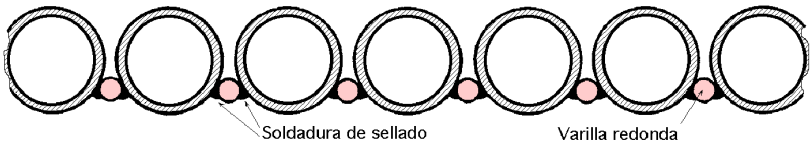


Fig XXIII.5.- Tubos tangentes con barras redondas de cerramiento

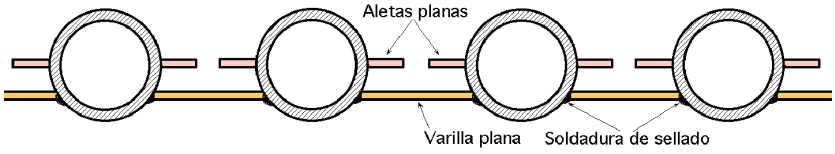


Fig XXIII.6.- Tubos muy espaciados con aletas y con pletinas de cerramiento

Estos métodos han sido efectivos en muchas calderas, facilitando un sellado mejorado frente a gases, con un mantenimiento menor y vida más larga, en comparación con los valores correspondientes al cierre mediante envolvente, al que sustituían. La mayor desventaja de ambos métodos radica en su alto coste de instalación, ya que para colocar el nuevo aislamiento y el sistema de cubierta, hay que desmontar la envolvente interna y el aislamiento existentes.

XXIII.3.- CERRAMIENTO DE ENVOLVENTES

La envolvente es una placa reforzada con nervios, para soportar las presiones y temperaturas de diseño, unida a las partes a presión como $\begin{cases} \text{- } soporte \\ \text{- } aislamiento \\ \text{- } cerramiento\ estanco\ a\ los\ gases \end{cases}$

Los cerramientos son las envolventes del cenicero, caja de aire, cámara de atemperación de humos y cámara muerta superior; se diseñan para soportar temperaturas relativamente altas, al tiempo que mantienen sus superficies exteriores a niveles que permitan minimizar las pérdidas de calor, protegiendo al personal de la planta.

Cuando la envolvente está ligada directamente a las paredes del hogar, hay que prever elementos de expansión para facilitar la expansión térmica entre los tubos y la envolvente.

Tolvas.- Los cerramientos de tolvas para unidades de ceniza seca se utilizan en varias zonas de la fumistería de la caldera, que incluyen las tolvas de $\begin{cases} \text{- } el\ economizador \\ \text{- } el\ hogar \\ \text{- } la\ recogida\ de\ las\ aguas\ de\ lavado \end{cases}$

El cerramiento que facilita la envolvente de la tolva puede servir también como cámara para la recirculación de los humos que:

- Salen de la tolva del economizador, a través de unas portillas

- Entran en el hogar, a través de aberturas practicadas entre los tubos que configuran la tolva del hogar

Caja de aire.- Es un cerramiento configurado por una caja metálica reforzada, unida a la pared del hogar, que aloja los recintos de fuego (quemadores) y distribuye el $aire_{comburente}$.

La caja de aire puede estar ubicada en una pared del hogar, o en todas las paredes del mismo presentando una configuración envolvente

Las uniones de la caja al hogar tienen que ser estancas a los gases y deben facilitar la expansión térmica entre tubos y envolvente

Para calderas de gran potencia, la caja de aire está compartimentada para obtener un mejor control del $aire_{comburente}$, y sólo se posiciona en las paredes anterior y posterior del hogar.

Cámara de humos de atemperación.- Este cerramiento se instala para la distribución e inyección de los humos que se emplean para atemperar los gases del hogar y para controlar el ensuciamiento de las superficies termointercambiadoras por la ceniza.

Su construcción es similar a la caja de aire, aunque está revestida en su parte interior con escudos de acero inoxidable opuestos a las portillas de humos.

Cobertizo.- El cerramiento del cobertizo forma un volumen destinado a albergar todas las partes a presión ubicadas por encima de los techos correspondientes al hogar y al paso de convección. El cerramiento se compone de paneles de chapas reforzados, soldados entre sí al perímetro superior de las partes a presión del hogar.

En las penetraciones que atraviesan las paredes y el techo del cobertizo y los tubos del techo del hogar se utilizan diversos sistemas de sellado, como:

- Fuelles cilíndricos o vasos flexibles que sellan los colgantes de suspensión

- Cierres de pliegues grandes alrededor de las tuberías de vapor

- Sellos de refractario o envolvente interna alrededor de penetraciones de tubos de superficies termointercambiadoras a través de los tubos del techo

En algunas calderas industriales, en la parte superior de los tubos del techo se utiliza una cubierta estanca a gases, como sello principal de gases.

Los cobertizos se pueden diseñar como cerramientos estancos a presión, con un aire de sellado que presuriza el interior de los mismos.

XXIII.4.- CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Resistencia a la ceniza en polvo y escoria.- La ceniza en polvo y escoria tiene tendencia a separarse de las superficies metálicas refrigeradas por agua o vapor, particularmente cuando su temperatura es bastante inferior a la de su punto de ablandamiento. Los sopladores de pared son capaces de retirar la ceniza en zonas de alta temperatura, en las que tiende a adherirse a las paredes. Se tienen que evitar las grandes superficies de refractario expuestas a la ceniza, ya que ésta tiende a adherirse al refractario y, si la acumulación es grande, puede caer en el hogar dañando el equipo o lesionando al personal; cualquier irregularidad en una pared de tubos se tiene que diseñar de forma que se evite la acumulación de ceniza del tipo que sea.

La erosión de las partes a presión se puede reducir a niveles aceptables, limitando la velocidad de los humos a través de la unidad; se pueden mantener altas velocidades locales en zonas donde los humos bipasan deflectores o superficies termointercambiadoras, aunque estas zonas es mejor eliminarlas mediante un diseño adecuado.

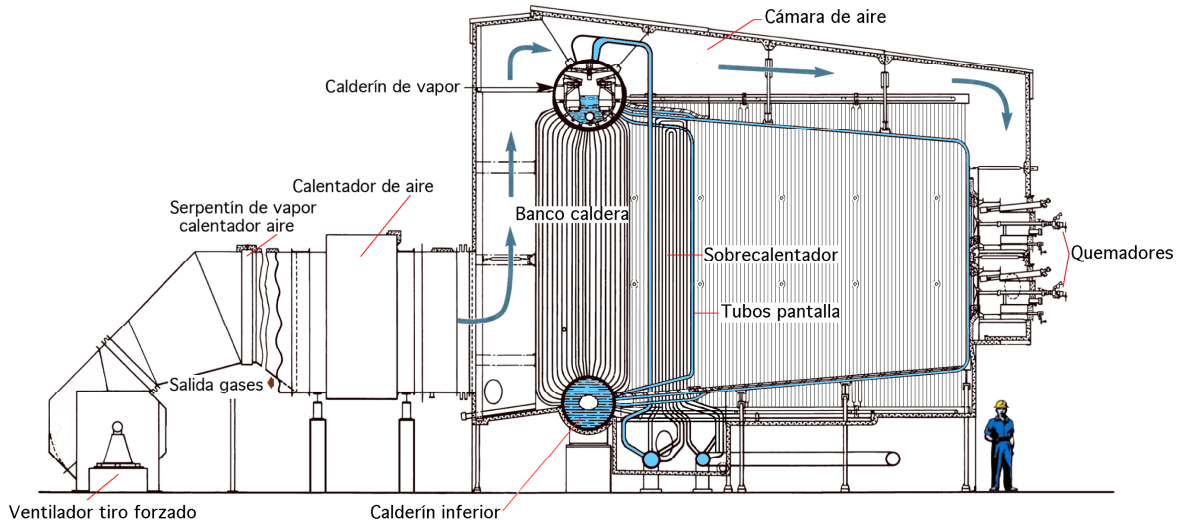
Algunos diseños de unidades, como los de $\begin{cases} \text{- } \textit{recuperación de calor de procesos} \\ \text{- } \textit{incineración de basuras} \\ \text{- } \textit{las calderas de lecho fluidificado circulante} \end{cases}$, requieren grandes extensiones de refractario sobre las superficies tubulares, que se diseñan para eliminar los efectos de la corrosión y/o erosión sobre las partes a presión, minimizando siempre la reducción de la absorción de calor por las partes a presión.

Expansiones.- En unidades con envolvente interna, Fig XXIII.3, durante la puesta en servicio se presentan diferencias de temperatura entre la envolvente y los tubos.

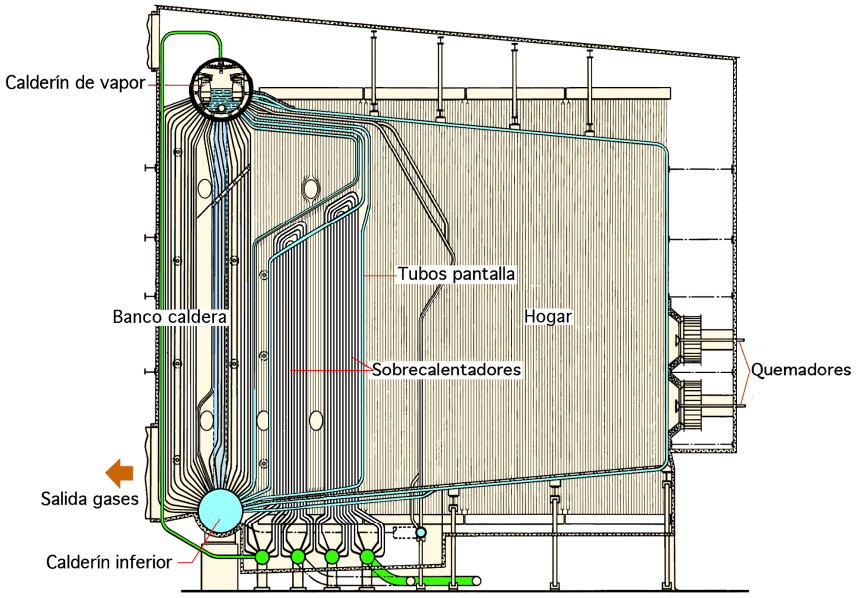
- Las expansiones en sentido horizontal de la pared dependen de la temperatura del perfil de atado, que es igual a la de la envolvente interna, por lo que se pueden soldar entre sí.

- Las expansiones verticales se absorben por la doblez de los bordes de la envolvente interna en los extremos superior e inferior de cada sección.

En ***unidades apoyadas***, (soportadas por su parte inferior), tal como las calderas de hogar integrado de las Fig XXIII.7a.b, que están diseñadas para combustión presurizada, la estructura se fija en un punto ubicado en uno de los extremos del calderín inferior. Las holguras, cierres y soportes se diseñan para expansiones definidas en todas direcciones.



XXIII.7a.- Caldera PFI (B&W) apoyada por su parte inferior



XXIII.7b.- Caldera PFT (B&W) apoyada por su parte inferior

En ***unidades colgadas***, la expansión tiene lugar hacia abajo, a partir de una cota determinada; si la estructura soporte está fijada a una pared, la expansión tiene lugar siempre desde el centro de la unidad hacia fuera.

Los conductos de humos y de aire, las tuberías, los tanques de ceniza y las líneas a quemadores se diseñan con juntas de expansión que hagan frente a los desplazamientos en:

- *Conductos de aire y humos se emplean fuelles metálicos flexibles o acoplamientos de elastómero*

- *Tuberías se emplean manguitos metálicos, acoplamientos deslizantes o articulados*

En el caso de grandes unidades, la expansión en algunas zonas puede ser del orden de 12" (30,5 cm), y aún así las juntas deben seguir siendo estancas a la presión.

En general, es más económico $\begin{cases} \text{- soportar las unidades más pequeñas por su parte inferior} \\ \text{- colgar las unidades mayores por sus partes más altas} \end{cases}$

Para unidades soportadas por su parte inferior, el cerramiento se soporta normalmente en la misma fundación de la caldera, tal como se observa en las Fig XXIII.7a.b.

Para unidades colgadas por su parte superior, los cerramientos forrados (no refrigerados) se soportan desde las partes a presión, con excepción del cerramiento del cobertizo (cámara muerta superior), que se soporta directamente desde la estructura de acero por medio de colgantes.

Explosiones.- En el diseño de los sistemas de estanqueidad hay que tener presentes los efectos de posibles explosiones, con el fin de eliminar lesiones al personal y daños al equipo.

En unidades con combustibles fluidos o fluidificados, hay que tener cuidado en evitar los pequeños soplidos del hogar que pueden ocurrir durante la puesta en servicio, debido a la utilización de una mezcla inadecuada de combustible y $aire_{comburente}$. Las solicitaciones durante la operación normal debidas a estos soplidos y a presiones positivas o negativas en el hogar, se soportan mediante barras o perfiles soldados a los tubos, conformando una banda alrededor del sistema de cerramiento.

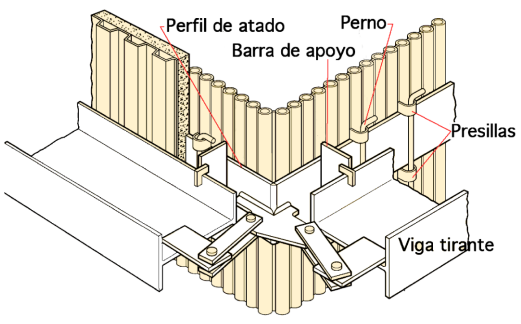


Fig XXIII.8.- Disposición de perfil de atado y viga tirante en una esquina de hogar

En el caso de una explosión en el hogar, el diseño debe facilitar el fallo de los clavos de las uniones y de soldaduras, antes que el fallo de la pared de tubos, lo que minimiza la liberación de grandes cantidades de vapor o de humos del hogar.

Las vigas tirante se ligan a los perfiles de atado, mediante conexiones deslizantes, y mantienen las paredes sin curvarse hacia el exterior ni hacia el interior.

Como las vigas tirante están por la parte exterior del aislamiento, se requieren conexiones en las esquinas parra permitir la expansión de las paredes, Fig XXIII.8.

Las fuerzas generadas por las explosiones se concentran en las conexiones de las esquinas, que deben garantizar la estanqueidad durante la puesta en servicio de la unidad, cuando las paredes aún no se han expansionado por completo, y durante el funcionamiento normal con la expansión completada.

El espacio de tubo comprendido entre dos vigas tirante actúa como una viga que resiste la presión interior del hogar. Cuanto mayor es el diámetro y el espesor de la pared de los tubos, tanto más se pueden separar las vigas tirante, cuyo tamaño se determina por la flexión permitida y la carga a considerar.

Implosiones.- Normalmente se deben a una:

- Inadecuada operación de cortatiros en unidades con ventiladores de tiro inducido de elevada presión estática

- Caída súbita de la presión del hogar, provocada por una pérdida instantánea del suministro de combustible

El control de los ventiladores de tiro inducido se especifica para:

- Minimizar posibles errores de operación y regulación

- Limitar las oscilaciones del tiro del hogar tras un disparo de combustible

Vibraciones.- La excesiva vibración del cerramiento puede provocar fallos en el aislamiento, en la envolvente y en los soportes; las vibraciones se originan por:

- Equipos rotativos exteriores, como turbinas y ventiladores, que las transmiten al sistema de estanqueidad a través del acero estructural del sistema de tuberías y conductos

- Pulsaciones en el hogar, que son consecuencia de una irregular combustión del combustible o combustibles utilizados

- Turbulencias en las corrientes de los flujos de aire y de humos, creadas en los respectivos conductos y en los bancos tubulares

Las paredes y conductos de aire y humos se diseñan para limitar la vibración durante las condiciones normales de funcionamiento.

- Para las paredes se selecciona el módulo de elasticidad de la sección de vigas tirante para limitar la flecha de la pared, en su punto medio; en general se acepta el valor de 1/16" (1,6 mm) para una variación de presión de 1" wg (6.900 Pa).

- De forma similar, los conductos de aire y humos y la envolvente se refuerzan con barras y perfiles estructurales

Estos refuerzos son necesarios en las secciones de conductos de aire y humos en los que el flujo es muy turbulento, como sucede en la zona de descarga de un ventilador.

Hay que eliminar todas las fuentes de vibraciones severas, como son:

- Los equipos rotativos desequilibrados

- Las combustiones pobres

- Los flujos de aire o humos muy turbulentos o desequilibrados

XXIII.5.- PÉRDIDAS DE CALOR

Las pérdidas de calor a través del sistema de estanqueidad de una caldera se reducen instalando un aislamiento que forma parte del cerramiento de la caldera. Para la mayoría de las unidades generadoras de vapor, el sistema de aislamiento se diseña para garantizar la seguridad del personal de operación y la mínima pérdida de calor.

Los ***materiales para aislamiento térmico*** que se usan con más frecuencia son:

a) Lana mineral.- Está compuesta por escoria fundida y cristal o roca, soplados en fibras por chorro de vapor o aire, o centrifugados a alta velocidad.

Bloques de lana mineral.- Las fibras de lana mineral junto con arcilla, moldeadas a temperatura y presión dadas, se utilizan para aislar $\begin{cases} \textit{paredes tubulares de membrana} \\ \textit{envolventes de caldera} \end{cases}$, hasta temperaturas de: $\begin{cases} \textit{850°F, 1200°F y 1900°F} \\ \textit{454°C, 649°C y 1038°C} \end{cases}$, según sea la calidad del material.

Mantas de lana mineral.- Las fibras de lana mineral, comprimidas en forma de mantas y reforzadas con tela metálica, se utilizan para $\begin{cases} \textit{todos los cerramientos con envolvente externa} \\ \textit{tuberías interiores a cerramientos no refrigerados} \end{cases}$; la temperatura límite es de 1200ºF (649ºC).

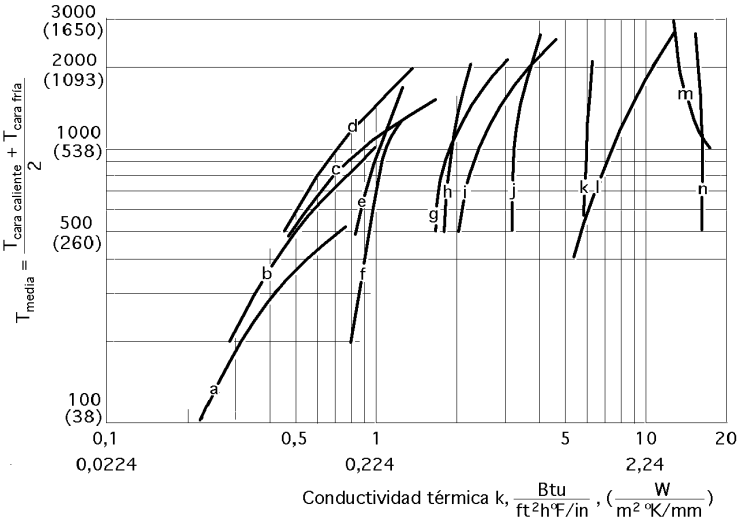
b) Bloques de silicato cálcico, hidratados y estabilizados, se utilizan en cerramientos y tuberías, generalmente por debajo de 1200ºF (649ºC).

c) Pasta plástica para alta temperatura.- El cemento aislante hecho con fibra de vidrio, procesado en nódulos y mezclado con arcilla, forma un aislamiento monolítico resistente cuando se seca por completo; se utiliza en $\begin{cases} \textit{válvulas y accesorios que tienen configuraciones irregulares} \\ \textit{el rellenado de juntas entre bloques de aislamiento} \end{cases}$; se puede emplear hasta 1900ºF, (1038ºC).

d) Fibras cerámicas.- Son de alta pureza, con punto de fusión superior a 3000ºF (1650ºC), y se usan ocasionalmente en el sellado de cerramientos de tubos.

CÁLCULOS

Flujo de calor a través de una pared compuesta.- Las conductividades térmicas de algunos materiales comerciales de refractarios y aislamientos, a las temperaturas para las que son adecuados se presentan en la Fig XXIII.9.

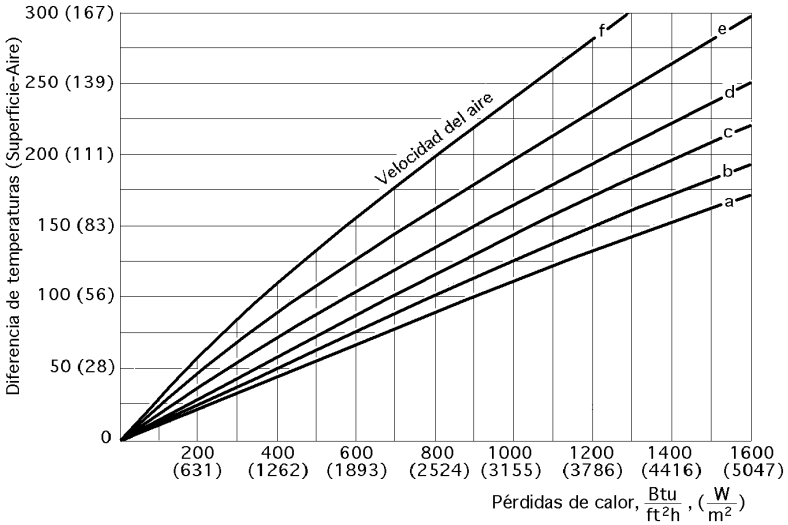


a) Fibra de vidrio
b) Bloque de media temperatura
c) Bloque de alta temperatura
d) Fibra vulcanizada cerámica
e) IFB K-20
f) Aislante moldeable 1600
g) IFB K-26
h) Aislante moldeable 2500
i) IFB K-30
j) Aislante moldeable 3000
k) Denso moldeable
l) Alta calidad FB
m) 90% alúmina moldeable
n) De gran resistencia

Fig XXIII.9.- Conductividad térmica de algunos materiales refractarios

Las pérdidas combinadas de calor (radiación + convección), referidas a la unidad de superficie exterior se presentan en la Fig XXIII.10, para diversas:

- *Velocidades del aire ambiente*
- *Diferencias de temperatura entre la superficie y el aire*



Velocidad del aire
a) 30 ft²/seg (9,1 m/seg)
b) 25 ft²/seg (7,6 m/seg)
c) 20 ft²/seg (6,1 m/seg)
d) 15 ft²/seg (4,6 m/seg)
e) 10 ft²/seg (3 m/seg)
f) 5 ft²/seg (1,5 m/seg)

Fig XXIII.10.- Pérdida de calor de superficies de paredes (radiación+convección)

El ábaco de pérdidas por radiación de la American Boiler Manufacturers Association (ABMA) facilita una rápida aproximación de las pérdidas por radiación, expresadas como porcentaje del aporte global de calor, Fig XXIII.11.

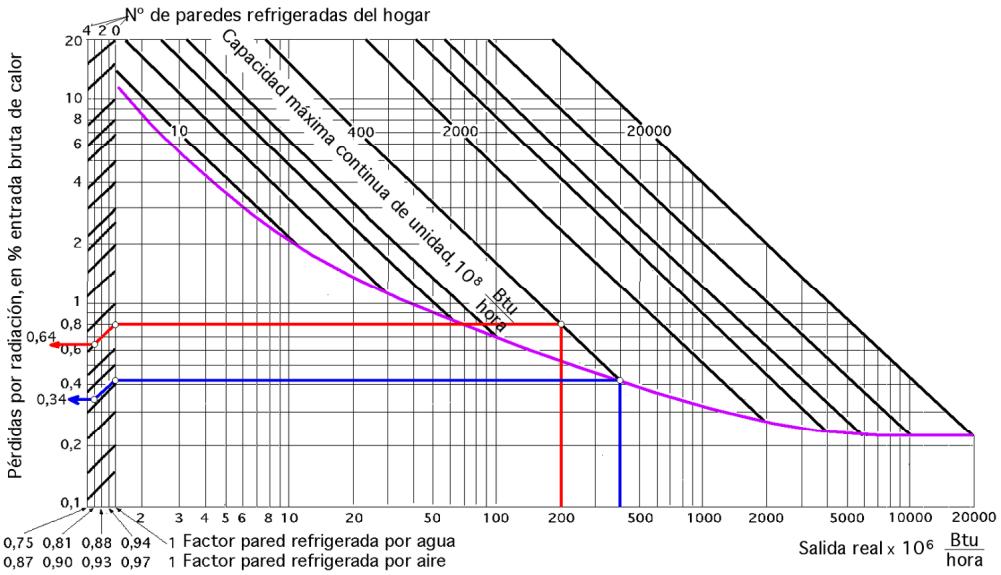


Fig XXIII.11.- Pérdida por radiación como porcentaje del aporte bruto de calor (ABMA)

Los valores de las pérdidas por radiación obtenidos con este diagrama se basan en el supuesto de una diferencia de temperaturas entre la superficie y el medio ambiente de 50ºF, para una velocidad del aire sobre la superficie de 100 ft/min.

Una pared de hogar debe tener, al menos, un tercio de su superficie proyectada, cubierta con superficie refrigerada por agua para poder reducir las pérdidas por radiación; para reducir estas pérdidas, el aire que atraviesa las paredes refrigeradas se utiliza en la combustión. A título de ejemplo, si se presenta una unidad para salida máxima continua de (400×10^6 Btu/h) con 3 paredes refrigeradas por agua, los porcentajes de pérdidas por radiación para una salida real continua de

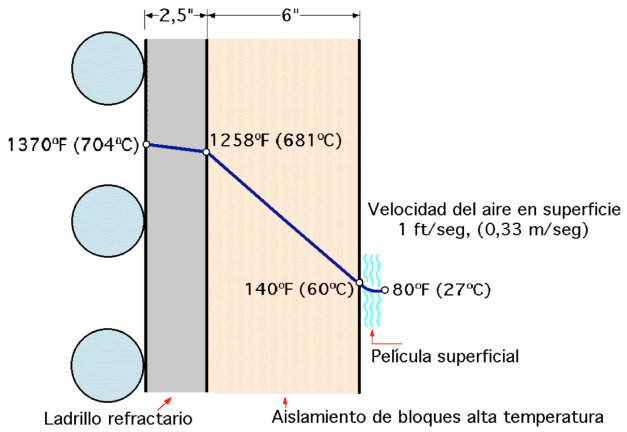
$$\begin{cases} 400 \text{ son del } 0{,}34\% \\ 200 \text{ son del } 0{,}64\% \end{cases}$$

Ventilación y temperatura superficial.- Para mantener satisfactoriamente las condiciones de trabajo en los alrededores de una caldera, se suele aceptar una temperatura superficial de la cara exterior fría entre $\begin{cases} 130°F \div 150°F \\ 54°C \div 66°C \end{cases}$; las pérdidas de calor que corresponden a estas temperaturas, varían entre $\begin{cases} 90 \div 130\ Btu/ft^2 h \\ 284 \div 410\ W/m^2 \end{cases}$, y se pueden absorber fácilmente por la circulación de aire existente en las actuales salas de caldera.

El hecho de aislar la caldera para reducir las pérdidas de calor a una cantidad que se pueda absorber fácilmente por el volumen total de aire de la sala de caldera, no asegura unas confortables

condiciones de trabajo. Se precisa también de una buena circulación de aire alrededor de todas las partes de la caldera, para impedir cualquier acumulación de calor en zonas frecuentadas por el personal.

Para ello se puede hacer uso de
- *Suelos de rejillas en lugar de suelos macizos*
- *Amplios espacios aislados entre calderas adyacentes*
- *Ventiladores que ayuden a la circulación de aire alrededor de la caldera*
- *Equipos de acondicionamiento de aire que aseguren su renovación*



XXIII.12.- Gradientes de temperatura a través de las paredes de un tubo y aislamiento

Una buena ventilación no incrementa mucho las pérdidas globales de calor.

La velocidad del aire afecta al coeficiente de película de transferencia de calor.

La conductancia superficial es sólo una parte pequeña de la resistencia global al flujo de calor.

A título de ejemplo, un incremento de la velocidad del aire de $\begin{cases} 1 \div 10\ ft/s \\ 0{,}3 \div 3\ m/s \end{cases}$, para las condiciones dadas en la Fig XXIII.12, incrementa el régimen de pérdidas a través de la pared sólo en un 2%.

En el caso que se presenta en la Fig XXIII.13, en el que dos paredes de similar temperatura están relativamente próximas, la transferencia de calor por radiación desde cada pared es despreciable.

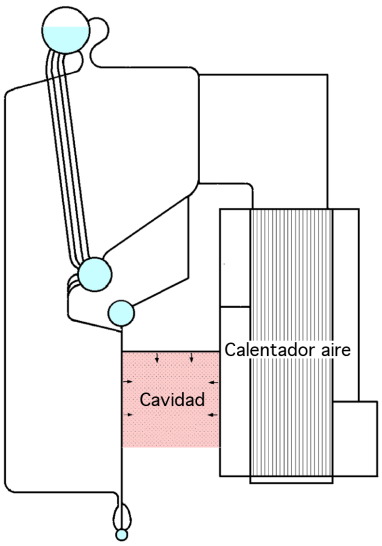
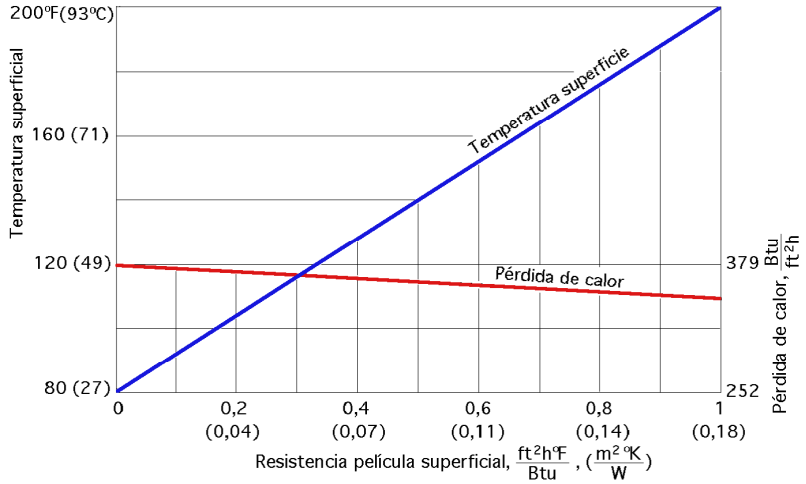


Fig XXIII.13.- Situación de una cavidad

La circulación natural del aire en una cavidad, es inadecuada para refrigerar las paredes hasta una temperatura aceptable para el personal de la planta que trabaje cerca de ella, ya que el efecto cavidad aumenta la temperatura de las paredes.

En el caso de la cavidad que se presenta, aunque se incremente el espesor de aislamiento, la temperatura superficial no se reduce significativamente; si fuese necesario, para reducir la temperatura del aire ambiente en la cavidad, habría que instalar conductos de ventilación.

En la Fig XXIII.14 se puede comprobar que un cambio importante en la resistencia de película superficial produce una gran modificación en la temperatura del revestimiento, que no afecta a la pérdida de calor a través de la pared, cualquiera que sea su extensión.



XXIII.14.- Efecto de la resistencia de la película superficial sobre la temperatura de superficie y la tasa de pérdida de calor

Fugas e infiltraciones.- Incrementan el caudal de los humos y el calor perdido en la chimenea y, por tanto, $\begin{cases} \textit{disminuyen el rendimiento de la caldera} \\ \textit{aumentan la potencia absorbida por el ventilador de tiro inducido} \end{cases}$

Corrosión.- Una de las ventajas más importantes que tienen las paredes membrana respecto a otros tipos de pared, es que eliminan la corrosión de los humos sobre la cara fría de las superficies del cerramiento. La mayoría de los humos contienen S, por lo que las partes metálicas del sistema de estanqueidad deben mantenerse $\begin{cases} \textit{- por encima del punto de rocío} \\ \textit{- fuera del contacto con los gases de combustión} \end{cases}$

El punto de rocío de los humos varía entre $\begin{cases} \textit{150°F÷250°F} \\ \textit{66°C÷121°C} \end{cases}$, y depende del:

- Tipo de combustible y de su contenido en S

- Método de combustión que se utilice

Los *conductos de humos de salida* a baja temperatura, se aislan por su superficie exterior para evitar la corrosión, lo que es necesario para unidades a la intemperie.

Los *serpentines de refrigeración* se tienen que mantener por encima de la temperatura del punto de rocío de los gases; requieren agua a temperatura por encima de 150ºF (66ºC).

El cerramiento, aunque está en la parte exterior al aislamiento, está sujeto a la influencia de los humos; cuando este tipo de envolvente esté sometida a temperaturas inferiores a la del punto de rocío, conviene cubrir su cara interior con una imprimación asfáltica para protegerlo de la corrosión, problema que requiere especial atención durante el diseño de instalaciones a la intemperie, en las que las temperaturas pueden ser, a veces, inferiores a la del punto de rocío de los humos. Con el uso de la envolvente interna se reducen mucho los problemas de corrosión, ya que los humos en ella contenidos se mantienen siempre a una temperatura superior a la del punto de rocío; no obstante, incluso con la envolvente interna, hay que aislar adecuadamente los cierres y las juntas de expansión, para evitar puntos fríos y la consiguiente corrosión.

Resistencia a la intemperie.- Se requieren techos inclinados, particularmente en revestimientos de Al en los que las bolsas de agua pueden alterar la superficie. Hay que evitar el contacto directo del Al y del acero, para evitar la corrosión galvánica del Al, en presencia de humedad.

- Las líneas de Cu o las cubrejuntas del techo se diseñan para que el agua de lluvia no moje el Al.

- La salida de las válvulas de seguridad se protege para evitar su contacto con la lluvia, nieve o hielo.

- Las toberas y cuellos de las válvulas se dotan de aislamiento y protección con chapa metálica o con revestimiento.

Hay que dotar de aislamiento y proteger con tubería de vapor para su calentamiento las líneas de: { *- Control a la intemperie que contengan humos o aire* ; *- Purga y toma de muestras* ; *- Vapor o agua que funcionan intermitentemente* }

Para el total de las diversas líneas de control y sopladores se debe suministrar aire seco.

Las líneas de agua y vapor exteriores al cerramiento deben ser totalmente purgables.

XXIII.5.- FABRICACIÓN Y MONTAJE

El sistema de estanqueidad de la caldera se diseña para que su fabricación y montaje sean económicos, lo que exige una integración de métodos y prácticas de fabricación en taller y montaje en la planta. Los cerramientos de envolventes, las conexiones de tubos a colectores, las barras de atado, las puertas y otros accesorios son de construcción soldada.

Los { *- nuevos materiales* ; *- métodos de montaje* } reducen el tiempo requerido para el aislamiento de calderas y para la instalación del revestimiento metálico externo.

Para hacer más sencilla la funcionalidad y el mantenimiento, hay que simplificar algunos detalles del diseño del sistema de estanqueidad de la caldera:

- Las zonas de trabajo en los alrededores de la unidad, deben tener siempre luz adecuada y temperatura confortable

- Hay que prever espacios suficientes en todas las áreas de la unidad, para el funcionamiento y mantenimiento

- Hay que disponer de accesos a través del sistema de estanqueidad, para inspeccionar las partes internas de la caldera

- Se necesitan plataformas adecuadas para puertas de acceso, sopladores, instrumentos y controles

Las puertas de inspección permiten observar las condiciones de la combustión y el estado de limpieza de las superficies absorbentes de calor.

La Fig XXIII.15 muestra una puerta de acceso para sistemas de estanqueidad de una unidad de tiro equilibrado.

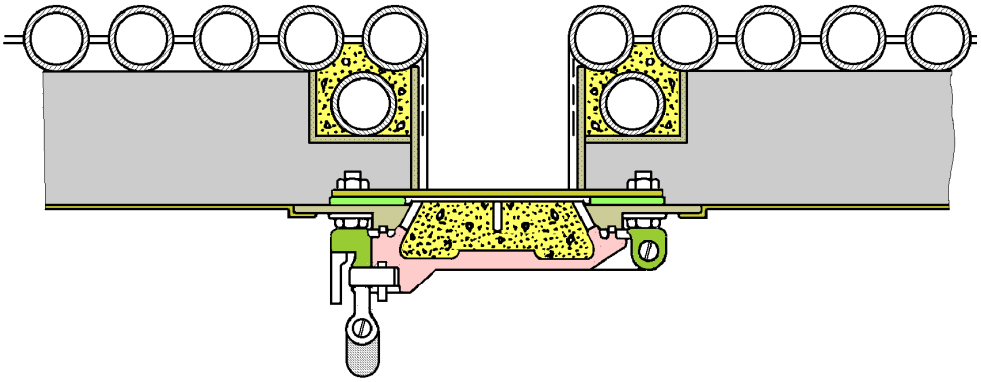


Fig XXIII.15.- Puerta de inspección para hogar de tiro equilibrado

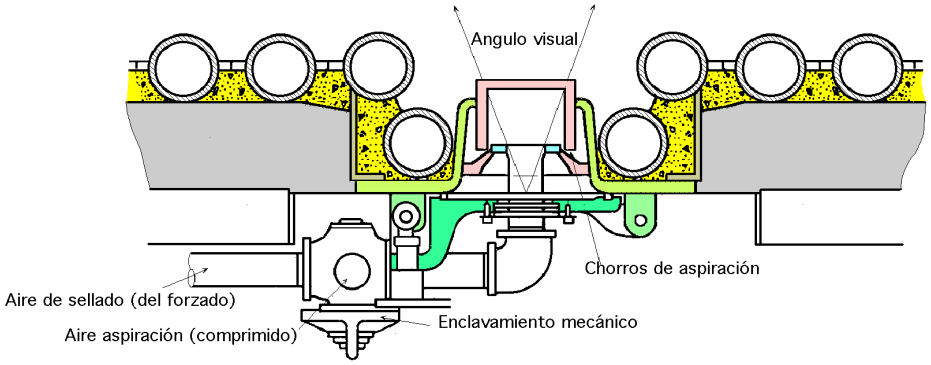


Fig XXIII.16.- Puerta de inspección para hogar presurizado

La Fig XXIII.16 muestra la puerta de acceso de una unidad de hogar presurizado.

La seguridad se logra con dos tipos de enclavamientos, que aseguran la aspiración del aire comprimido por la abertura antes de que se abra la puerta. Una característica constructiva de este tipo de puerta es que el chorro de aspiración no reduce el ángulo de visión. Las curvas de los tubos que conforman las aberturas, en hogares de características elevadas, deben tener el menor radio posible. La longitud de los cerramientos de placas de espárragos alrededor de una abertura, se minimiza para que las placas se refrigeren adecuadamente, mediante la unión a los tubos por soldadura para evitar su quemado y el consiguiente sobrecalentamiento de los cierres.

La superficie exterior de la unidad se ha de poder limpiar con facilidad.

Como recubrimiento exterior se utiliza un revestimiento metálico de poco espesor, como acero galvanizado y láminas de Al.

El acero galvanizado es más barato que el aluminio, aunque para instalaciones a la intemperie, la chapa galvanizada se tiene que pintar, a no ser que el clima sea seco. El Al se prefiere porque sólo requiere imprimación de pintura bajo condiciones muy severas.

REFERENCIAS CAP XXIII.- CIERRES EN CALDERAS

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, chapter 23 BOILER ENCLOSURES, CASING AND INSULATION.- The Babcock & Wilcox Company.- Barberton, Ohio, USA.- 1992

Beckmann M., Krüger S.- ONLINE HEAT FLUX MEASUREMENT AT MEMBRANE WALLS OF STEAM GENERATORS OF MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATORS.- Bauhaus-University Weimar, Chair of Process and Environmental Engineering.- IT3'05 Conference, may 9-13, 2005, Galveston, Texas. ISBN-978-0-9232-0484-6

Beckmann, M., Krüger, S.-A METHOD FOR NON-INVASIVE HEAT FLUX DETECTION IN MEMBRANE WALLS OF STEAM GENERATORS .- Bauhaus-Universität Weimar, Spiegel, W., CheMin GmbH Augsburg

Scholz, R., Beckmann, M., Schulenburg, F.- ABFALLBEHANDLUNG IN THERMISCHEN VERFAHREN.- Verbrennung, vergasung, pyrolyse, verfahrens und Anlagenkonzepte. B.G. Teubner - Reihe Umwelt, 1. Auflage 2001, ISBN: 3-519-00402-X.

Sascha, K., Beckmann, M.- CHARACTERISATION OF DEPOSITS ON MEMBRANE WALLS OF STEAM GENERATORS BY HEAT FLUX DENSITY MEASUREMENT.- Technical University of Dresden, Institute for Power Engineering, Chair for Combustion, Heat and Mass Transfer

Nagiar, H. M.- MODELING OF THE BUCKSTAY SYSTEM OF MEMBRANE WALLS IN WATERTUBE BOILER CONSTRUCTION.- Thermal Science: Year 2014, Vol. 18, Suppl. 1, pp. S59-S72

Sertic, J., Kozak D., Samardzic.- CALCULATION OF REACTION FORCES IN THE BOILER SUPPORTS USING THE METHOD OF EQUIVALENT STIFFNESS OF MEMBRANE WALL.- Hindawi Publishing Corporation , The Scientific World Journal, vol 2014, article ID 392048.-
http://dx.doi.org/10.1155/2014/392048