

167
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

'' CALENTAMIENTO DE LINGOTES DE ACEROS
AL CARBONO Y ALEADOS EN FOSAS DE
RECALENTAMIENTO''

INFORME DE LA PRACTICA PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A I

MANUEL VILLUENDAS ALVAREZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, 1993



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	INTRODUCCION.
CAPITULO I:	DESCRIPCION DE LAS FOSAS DE RECALENTAMIENTO.
	A.- REFRACTARIOS.
	B.- DISTRIBUCION EN LA FOSA.
CAPITULO II:	INSTRUMENTACION Y CONTROL.
	A.- CONTROL AUTOMATICO.
	B.- CONTROL MANUAL.
CAPITULO III:	OPERACION.
	A.- RELACION AIRE/GAS.
	B.- PRESION.
	C.- CONTROL DE TEMPERATURA DENTRO DE LA FOSA.
	D.- MATERIAL LISTO PARA LAMINAR.
CAPITULO IV:	LA ATMOSFERA Y SU INTERACCION CON EL ACERO.
	A.- TIPOS DE ATMOSFERAS EN HORNOS.
	B.- LA ATMOSFERA DEL HORNO Y SUS REACCIONES.
	C.- LA OXIDACION DEL ACERO EN EL HORNO.
	D.- EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION DURANTE LA OXIDACION.
CAPITULO V:	PRACTICAS DE CALENTAMIENTO.
	A.- DEFINICION.
	B.- PRACTICAS DE CALENTAMIENTO.

CAPITULO VI:	DISEÑO DE PRACTICAS DE CALENTAMIENTO.
	A.- TEMPERATURA DE CARGA
	B.- LA VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO.
	C.- TEMPERATURA DE EMPAPE.
	D.- TIEMPO DE CALENTAMIENTO.
CAPITULO VII:	TECNICAS DE AHORRO DE COMBUSTIBLE.
	A.- PRACTICAS DE CALENTAMIENTO CONVENCIONALES.
	B.- PRACTICAS ESPECIALES DE CALENTAMIENTO.
CAPITULO VIII:	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.
CAPITULO IX:	BIBLIOGRAFIA.
	APENDICE I.

INTRODUCCION.

Los "Soaking Pits" (*) son hornos desarrollados con una capacidad de calentamiento uniforme y con un mínimo de sobrecalentamiento superficial sobre el producto en cuestión. En los diseños más modernos, ésto se ha optimizado con el uso de la instrumentación automática.

Dentro de una acería, las fosas de recalentamiento cumplen con la doble función de actuar como hornos de recalentamiento y como almacenadores de calor para amortiguar las irregularidades en el flujo de lingote.

Las principales características de cualquier diseño de fosas de recalentamiento son las siguientes:

- 1.- Calentamiento uniforme de todos los lingotes en la fosa sin que exista un sobrecalentamiento localizado en ningún lingote.
- 2.- Control de la velocidad de calentamiento para que ésta sea igual a la capacidad del acero para absorber calor sin perjuicio de sus propiedades físico-químicas ni mecánicas.
- 3.- Bajos costos de operación.

(*) la traducción literal del término es " fosas de termodifusión o fosas de empape". El nombre genérico aceptado es " fosas de recalentamiento". En lo sucesivo utilizaremos éste último.

4.- Mantener controlada la atmósfera del horno.

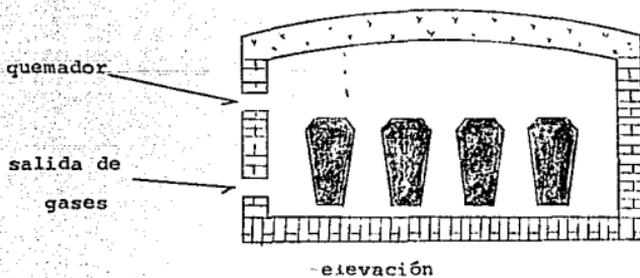
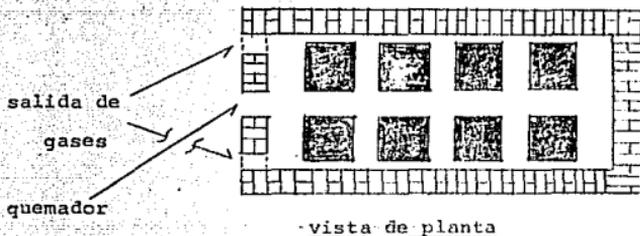
5.- Reproducibilidad en los ciclos de calentamiento.

6.- Mínima inversión.

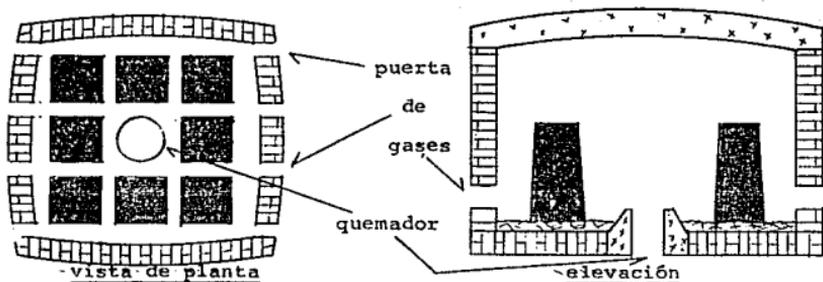
DIFERENTES TIPOS DE FOSAS DE RECALENTAMIENTO.

Existen varios diseños de fosas, cada una con características propias de calentamiento. Los principales tipos se describen a continuación:

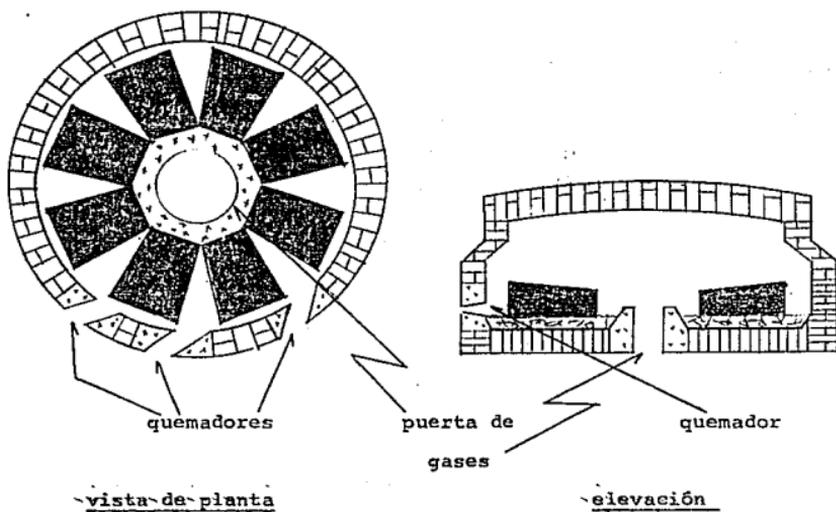
1.- Fosa con un quemador en la parte superior. Este tipo de fosa será discutido en éste trabajo.



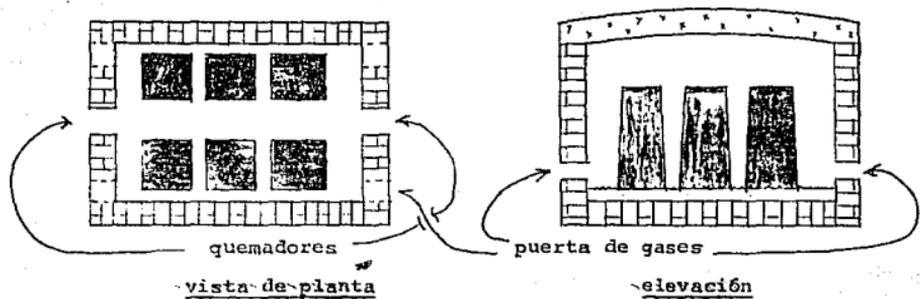
2.- Fosa con quemador centrado en el fondo.



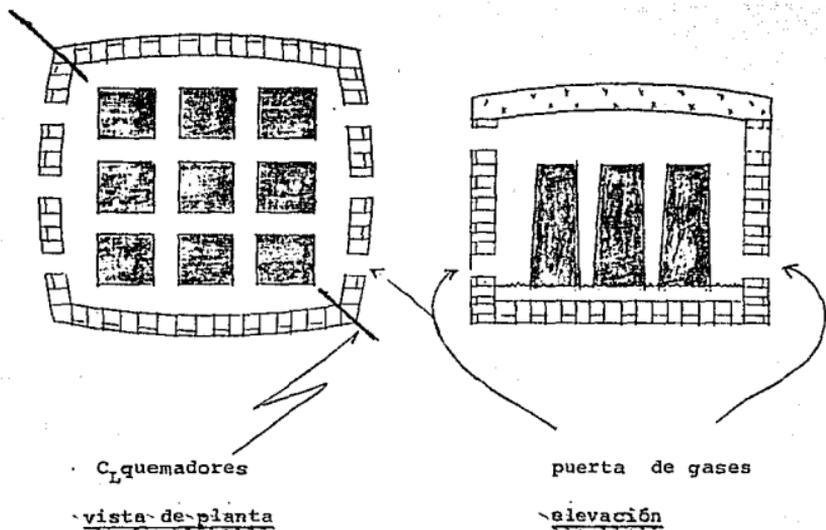
3.- Fosa circular.



4.- Fosa con dos quemadores en el fondo.



5.- Fosa con dos quemadores en la parte superior.



6.- Fosas de recalentamiento eléctricas. Este tipo de hornos se justifican en aquellos casos en los cuales el control de la cascarilla y el mantenimiento de una atmósfera controlada durante el calentamiento es relevante; ejemplo de esto es el calentamiento de algunos aceros inoxidable y de alta aleación. Los elementos de calentamiento son canales refractarios rellenos de coque que corren a lo largo de la fosa; la temperatura se controla con el voltaje secundario del transformador.

OBJETIVO: Dada la importancia de que las fosas de recalentamiento sean operadas correctamente, se hace necesario que los operadores dominen a profundidad el equipo desde el punto de vista operativo y metalúrgico; de acuerdo con esto, el objetivo de este trabajo es servir de apoyo para el entrenamiento de supervisores.

En los capítulos I y II se da una explicación de los refractarios utilizados así como de la instrumentación del equipo. la operación del equipo se presenta en el capítulo III.

Durante el calentamiento se genera una atmósfera de tipo "flama directa"; ésta y las reacciones involucradas con el acero se presentan en el capítulo IV.

Debido a la gran importancia que tienen las prácticas de calentamiento del lingote, se dedican tres capítulos. En el capítulo

V se definen las características de una práctica de calentamiento y las partes que la integran. En el capítulo VI se explica cómo diseñar una práctica de calentamiento, y finalmente en el capítulo VII, se presentan las técnicas modernas de ahorro de combustible.

CAPITULO I.

DESCRIPCION DE LAS FOSAS DE RECALENTAMIENTO.

A.- Refractarios.

Se define como material refractario todo aquel que pueda calentarse lentamente hasta 1500 °C sin mostrar signos de --- ablandamiento.

Para determinar el ablandamiento de un material refractario se recurre a la prueba de resistencia pirosópica o equivalente al cono pirométrico (*), que es un elemento cuantitativo - que nos da una medida del ablandamiento y la posibilidad de -- comparación.

Es importante anotar que la resistencia pirosópica, no representa de ninguna manera la temperatura hasta la cual puede ser utilizado un producto refractario, es decir, que puede utilizarse a una temperatura mayor.

(*) Existen dos escalas para medir la resistencia pirosópica, la Orton y la Seger. En éste trabajo se utilizará la primera.

Clasificación de refractarios.

Los materiales refractarios pueden clasificarse por numerosos caminos, ninguno de los cuales es totalmente satisfactorio. Dado que el análisis químico es de crucial importancia para la evaluación correcta de cada producto, escogeremos éste para la clasificación de los materiales; así, se cuenta -- con los siguientes grupos:

- 1.- Refractarios de sílice.
- 2.- Refractarios sílico-aluminosos.
- 3.- Refractarios básicos.
 - a.- Refractarios de magnesita.
 - b.- Refractarios de cromo, cromo-magnesita y magnesi--ta-cromo.

A continuación haremos una descripción de éstos grupos:

1.- Refractarios de sílice.

Generalmente éstos refractarios se elaboran a partir de -- cuarcita, con contenidos de 96 a 98% de sílice.

En las materias primas es de vital importancia mantener -- los niveles de Al_2O_3 abajo de 0.5% y de 0.3% para los álcalis, pues éstos forman mezclas eutécticas que disminuyen la refrac--tariedad de los materiales.

La sílice pura tiene un punto de fusión de 1723 °C y pre--senta tres formas alotrópicas: cuarzo, tridimita y cristobalita. Generalmente se usa en la fabricación de refractarios CaO como aglutinante.

Principales características

Es un ladrillo de elevado punto de ablandamiento, resistente a escorias ácidas y a la abrasión a altas temperaturas. A temperaturas superiores a 650°C no está sujeto a disgregación por choque térmico, pero a temperaturas inferiores es muy sensible a este efecto; la causa es que al calentarlo a 575°C, sufre una súbita expansión por la transformación:



2.- Arcillas sílico-aluminosas.

Las arcillas refractarias fueron probablemente los primeros refractarios usados por el hombre; estas se encuentran ampliamente distribuidas por toda la tierra.

Kingery define las arcillas refractarias como: "partículas sílico-aluminosas hidratadas, de pequeñas dimensiones, que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con agua". (3).

Tienen grandes variaciones en sus características químicas, mineralógicas y físicas. La característica común es su capa estructural; todas ellas están compuestas de capas de aluminio-silicatos electricamente neutros que se desplazan fácilmente unas sobre otras, dando lugar a propiedades tales como suavidad, tacto jabonoso y, facilidad de penetración.

De acuerdo a su origen se pueden definir cinco clases:

CLASE	CONTENIDO DE Al_2O_3
— Arcillas refractarias	25—45%
— Silimanita, andalucita y cianita	45—65%
— Mulita	65—75%
— Base Bauxita	75—90%
— Corindón	más de \rightarrow 90%

La siguiente, es la clasificación más común en el mercado donde se observa que prácticamente no existe diferencia con la anterior:

CLASE	CONTENIDO DE Al_2O_3
— Refractarios de calidad media.	25 — 36.5 %
— Refractarios de alta calidad	36.5— 38.5%
— Refractarios de calidad superior	38.5— 45 %
— Refractarios de alta alúmina	45 — 85 %
— Refractarios de extra alta alúmina	85 — 90 %

En muchas ocasiones se usa alúmina precipitada para caer en un rango definido; también se obtiene mulita sintética al calcinar y mezclar sílice y alúmina.

Características principales

a.- Refractarios de calidad media: son mecánicamente fuertes, densos y resistentes a condiciones de abrasión, resisten escorias a temperaturas moderadas. Se usan principalmente en el revestimiento de chimeneas y hornos de cal.

b.- Refractarios de alta calidad: poseen una expansión térmica relativamente baja, buena resistencia al choque térmico, son resistentes a metales fundidos y escorias ácidas. Se utilizan en revestimiento de calderas y altos hornos.

c.- Refractarios de calidad superior: son de alta refractabilidad, poseen buena estabilidad volumétrica a altas temperaturas, buena resistencia a la disgregación térmica y a soportar cargas en caliente. Tienen una regular resistencia de escorias ácidas y básicas.

d.- Refractarios de alta alúmina: se consideran aquellos que tienen un contenido superior al 45% de alúmina. Su clasificación les designa como: 50, 60, 70, 80 de Al_2O_3 .

La refractariedad aumenta de acuerdo al mayor contenido de alúmina, tienen buena resistencia a la abrasión, resisten al ataque de escorias ácidas, escorias básicas con alto contenido de óxido de hierro. (más de 60% FeO), atacan a éstos - refractarios.

Se usan principalmente en hornos de cemento, hornos de hierro maleable, fosas de recalentamiento, fundición de aluminio, hornos continuos, etc.

e.- Refractarios de extra alta alúmina: tienen un contenido de alúmina superior al 85% y están libres de impurezas que reduzcan su punto de fusión. Presentan un equivalente al cono pirométrico Orton de 38 a 40.

Tienen muy buena resistencia al choque térmico, son muy uniformes en dimensiones, tienen buena resistencia al ataque por escorias, a la abrasión en caliente y al impacto. Se usan en hornos rotatorios de cemento, en hornos de vidrio, hornos de silicato de sodio, rieles de deslizamiento de hornos continuos y válvulas deslizantes.

3.- Refractarios básicos.

Los refractarios básicos son materiales muy importantes en la industria metalúrgica, ya que su resistencia a la acción corrosiva de escorias básicas, óxidos y humos a altas temperaturas es elevada, así como su punto de fusión.

Originalmente se le llama magnesita al mineral compuesto de $MgCO_3$, pero al paso del tiempo este término se ha extendido a los productos fabricados a partir de este, de brucita $[Mg(OH)_2]$ y de magnesia (MgO) obtenida del agua del mar.

Es importante mencionar que en este tipo de refractarios no es prudente utilizar la prueba del cono pirométrico equivalente, debido a que comunmente se usan aglutinantes tales como sílica, alumina, cal y (en menores cantidades) óxido de fierro, que bajan el punto de fusión de los refractarios.

Al grupo de ladrillos básicos corresponden principalmente los fabricados con MgO , CaO , Cr_2O_3 , así como los de distintas mezclas de cromita y magnesia; estos se clasifican como refractarios de magnesita, dolomita, cromo magnesita y forsterita.

3.1.- Refractarios de magnesita.

La magnesita (MgO) es químicamente el más simple de los refractarios. Tiene un punto de fusión de $2800^{\circ}C$ * ésta temperatura solo tiene interés académico, pues industrialmente, la magnesita se mezcla con aglutinantes que bajan el punto de ablandamiento del material; sin embargo, este se perfila como el refractario del futuro.

Los tabiques de magnesita contienen del 88 al 95 % de MgO . Se usan principalmente en zonas expuestas a escorias básicas como son: hornos de hogar abierto, hornos eléctricos, fondos de soaking pits, ollas de vaciado, etc.

* Según Kanolt. ref.3.

3.2.- Refractarios de cromo, cromo-magnesita y magnesita-cromo.

Originalmente los refractarios de cromo se hacían triturando óxidos de cromo y adicionando un aglutinante, seguido por moldeo, secado y quemado.

Estos refractarios se usaron inicialmente para separar dos tipos de refractarios tales como sílice y arcilla de magnesita y dolomita, los cuales reaccionan químicamente a altas temperaturas. Pocos de estos tabiques se utilizan actualmente.

El grado de calidad de los refractarios de magnesita-cromo y cromo-magnesita se define de acuerdo al compuesto que se encuentra en mayor proporción. Su fabricación consiste en mezclas de magnesita y cromita prensados y ligados químicamente. Generalmente los tabiques de este grupo se encuentran encastrados en láminas de fierro que forman una caja exterior. En servicio, el metal se oxida combinándose con la magnesita del tabique para formar una liga magnesio-ferrita (espinela), generando una superficie monolítica.

La primera investigación sistemática sobre los refractarios de cromita y magnesita la hizo LYNAM y REESEIN en 1937, concluyendo que el contenido de cromo para lograr la más alta refractabilidad es del orden de -- 50 a 70 %.

El uso de los refractarios de magnesita -cromo está aumentando sobre los de cromo-magnesita, debido principalmente a la mayor resistencia al ataque de escorias de los materiales altos en magnesia.

3.3.- Refractarios de forsterita.

La forsterita es un silicato de magnesio, de fórmula $(2MgO \cdot SiO_2)$, que tiene un punto de fusión de 1905 °C. Como mineral puro no se encuentra en grandes depósitos. Generalmente éstos tabiques se generan a partir de olivinas, que consisten en soluciones sólidas de forsterita y fayalita $(FeO \cdot 2SiO_2)$, o a partir de serpentina $(3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ y magnesia calcinada.

Las propiedades de éstos tabiques son semejantes a las de los tabiques de magnesita, pero debe observarse que tienen una expansión permanente al calentarse. Estos tabiques tienen baja resistencia a las escorias, particularmente si tienen FeO y son expuestos a más de 1650 °C. La conductividad térmica es menor que la de los tabiques de magnesita. Se usan principalmente en la industria del vidrio.

4.- Refractarios aislantes.

Los materiales aislantes derivan su baja conductividad térmica de su porosidad; mientras que su capacidad calorífica está determinada casi totalmente por los componentes sólidos. El efecto aislante es principalmente el resultado de la obtención de una serie de espacios de aire entre una serie alternada de sólidos limitantes. Dentro de las materias primas utilizadas en su manufactura tenemos: diatomitas, silicatos de calcio, arcillas refractarias, sílice, asbestos, vermiculitas, etc.

B.- Distribución de refractarios en las fosas de recalentamiento.

Una fosa de recalentamiento es un horno intermitente donde la bóveda es una tapa que abre y cierra permitiendo la carga o descarga de lingotes.

Las fosas son cargadas con 12 lingotes de 3 ton. cada uno; éstos son cargados en las paredes laterales al quemador con la mazarota hacia arriba (fig. 11y, después son sometidos al ciclo de calentamiento correspondiente.

Durante el calentamiento hay formación de "caspa" (*), la cual, dependiendo de la temperatura del horno, "escurrirá" o se desprenderá hacia el fondo de la fosa.

En base a los puntos brevemente mencionados arriba, se pueden establecer las características principales de los refractarios -- usados en la fosa:

(*] Se conoce con éste nombre a los productos de oxidación del hierro (FeO , Fe_2O_3 , y Fe_3O_4), formados durante el calentamiento del lingote; éstos llegan a medir de 5 a 25 mm. de espesor. El término "casquilla" lo reservaremos para aquellos óxidos formados en hornos de tratamiento térmico, hornos de calentamiento de billet, o bien para los óxidos desprendidos durante el desbaste y laminación, donde el espesor de la casquilla difícilmente rebasa los 3 mm.

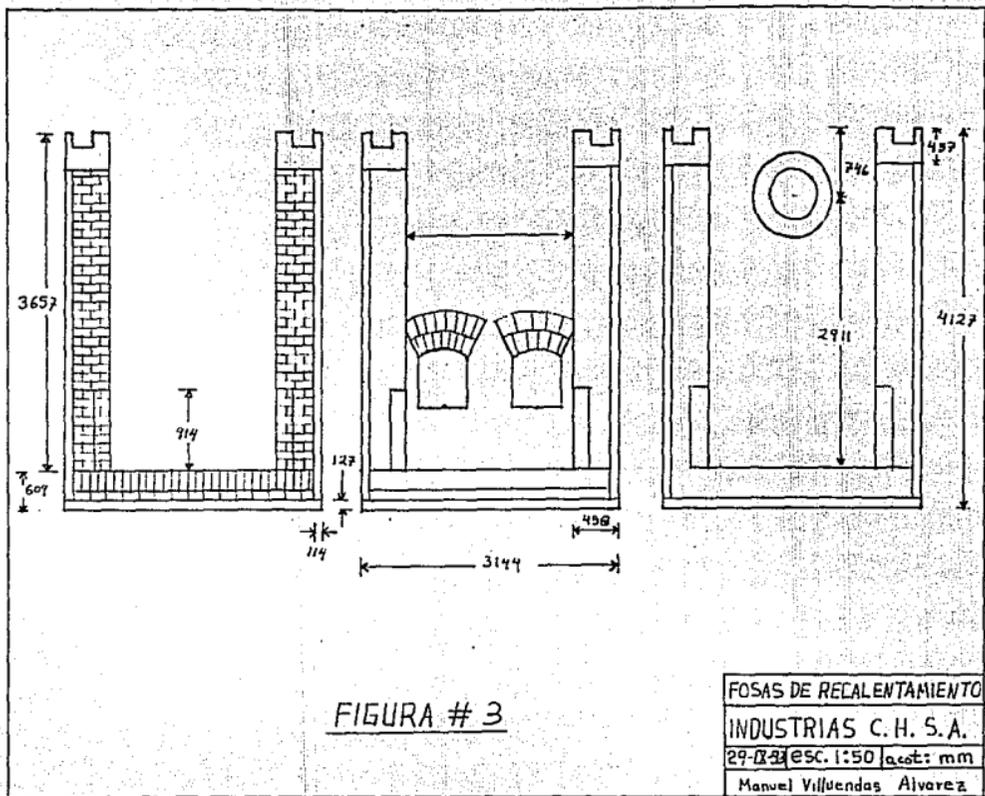


FIGURA # 3

FOSAS DE RECALENTAMIENTO
INDUSTRIAS C. H. S. A.
29-IX-57 esc. 1:50 acot: mm
Manuel Villuendas Alvarez

a.- Paredes de trabajo:

- 1.- Resistencia a la abrasión en frío y en caliente.
- 2.- Resistencia al ataque de escorias básicas (principalmente FeO).
- 3.- Resistencia al choque térmico.
- 4.- Alta refractariedad.

b.- Parte baja de las paredes y el piso:

- 1.- Resistencia al ataque de escorias básicas (FeO).
- 2.- Resistencia a la abrasión por escorias básicas.

c.- Partes restantes de la fosa:

- 1.- Resistencia al choque térmico.
- 2.- Alta refractariedad.

Hasta aquí hemos mencionado las características deseables de los refractarios de acuerdo a su localización. En las figuras 1, 2 y 3 se muestra la distribución de materiales que se describen a continuación:

Las paredes de la fosa tienen un espesor de 22 plg., de las cuales 4 plg. corresponden al material aislante y el resto

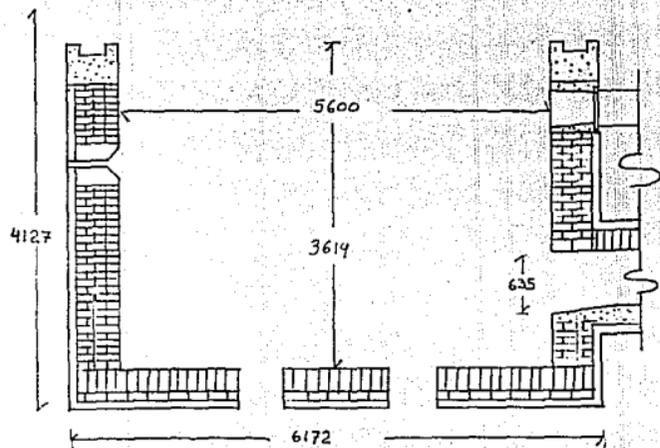
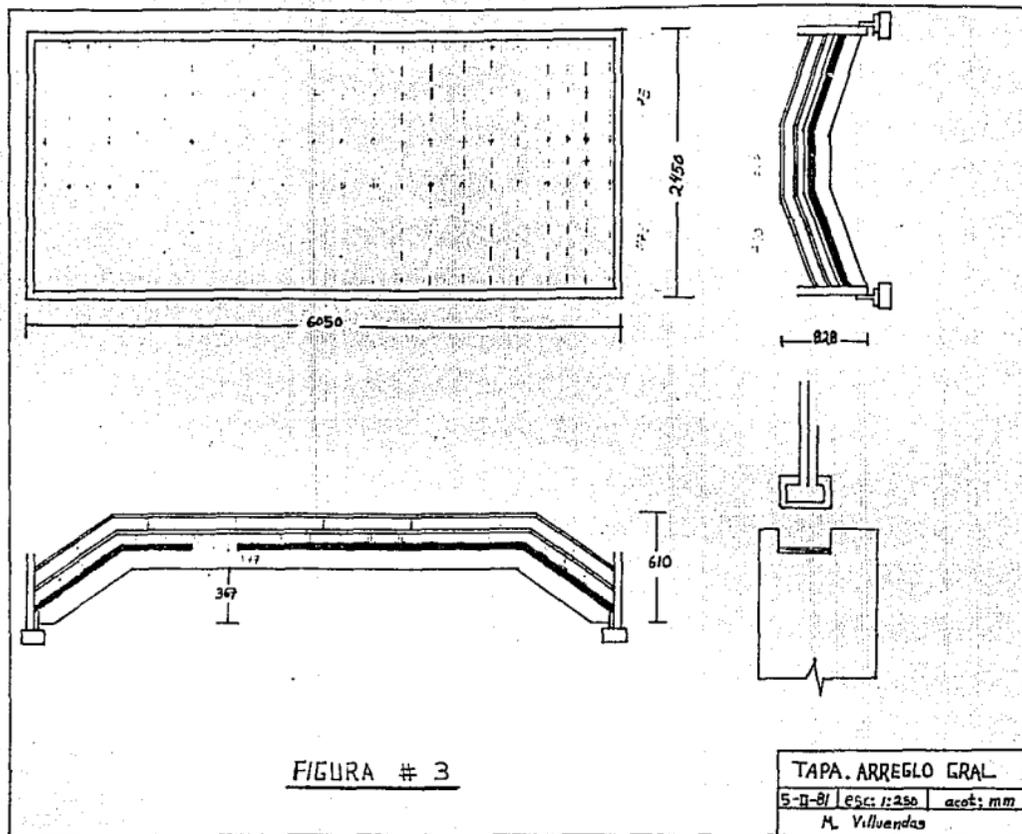


FIGURA # 2

FOSAS DE RECALENTAMIENTO
INDUSTRIAS C.H. S. A.
36-X-93 Esc: 1:50 cot: m.m.
Manuel Villuendas Alvarez



de tabique refractario de 43% Al_2O_3 . En la parte inferior de las paredes se tiene un recubrimiento de tabique básico del tipo cromo-magnesita.

El piso tiene un espesor de 18.5 plg., compuesto de 5 plg. de tabique aislante y el resto por tabique refractario de 43% de alúmina. Para dar mayor durabilidad al piso, se coloca una cama de dolomita a granel de 15 cm. de espesor.

La tapa de la fosa (fig. 3), lleva una capa exterior de 3 plg. de fibra aislante y 6 plg. de concreto de alta alúmina (60% Al_2O_3)

Por el uso continuo de las fosas, se observó que la parte que se deterioraba más rápidamente era la zona donde se recarga el lingote; debió fundamentalmente a la abrasión al refractario al centrar y recargar el lingote y al ataque químico causado por el FeO en estado líquido.

De acuerdo con esto, se buscaron tabiques de mayor resistencia a la abrasión, al ataque de $FeO_{(1)}$ y al choque térmico, sin perder de vista el costo de los productos. Como resultado se seleccionaron dos clases de tabique: uno de 70 y otro de 80% Al_2O_3 . La idea de la construcción monolítica de las paredes se desechó por requerirse mayor personal del disponible, mayores cuidados en su aplicación y presentar problemas de anclaje durante las reparaciones.

Durante la operación con los tabiques de 70 y 80% Al_2O_3 , no se

notaron diferencias significativas por lo que se optó por el tabique de 70% de alúmina, además de más barato es un material de línea.

El resultado comparativo con el refractario de 43% de alúmina fué un aumento en la vida de las paredes de un 20 a 30%, disminuyendo el consumo de concreto refractario utilizado en el parchado de las paredes, así como los tiempos de reparación, por lo que se optó por el uso de éste tipo de refractario.

CAPITULO II

INSTRUMENTACION Y CONTROL.

Las fosas de recalentamiento estan cuidadosamente diseñadas para asegurar un buen calentamiento de los lingotes para su laminación. Para ello se controlan las siguientes variables:

- a.- Presión de gas y aire en la línea.
- b.- Flujo de gas y aire en la línea.
- c.- Temperatura dentro de la fosa.
- d.- presión dentro de la fosa.

La forma en que está distribuido el equipo para controlar estas variables es la siguiente:

Se tiene una alimentación general de gas natural con 5 Kg/cm² de presión (fig.1). Cada fosa cuenta con una válvula macho para aislarla de la línea. Inmediatamente después está un regulador de presión, que la reduce a 0.13 Kg/cm² (12 onzas/plg²); antes y después de la unidad de regulación se tienen indicadores de presión en campo.

Después se cuenta con una válvula solenoide de seguridad -- (Maxon), que corta automáticamente el flujo de gas al recibir cualquiera de las señales siguientes:

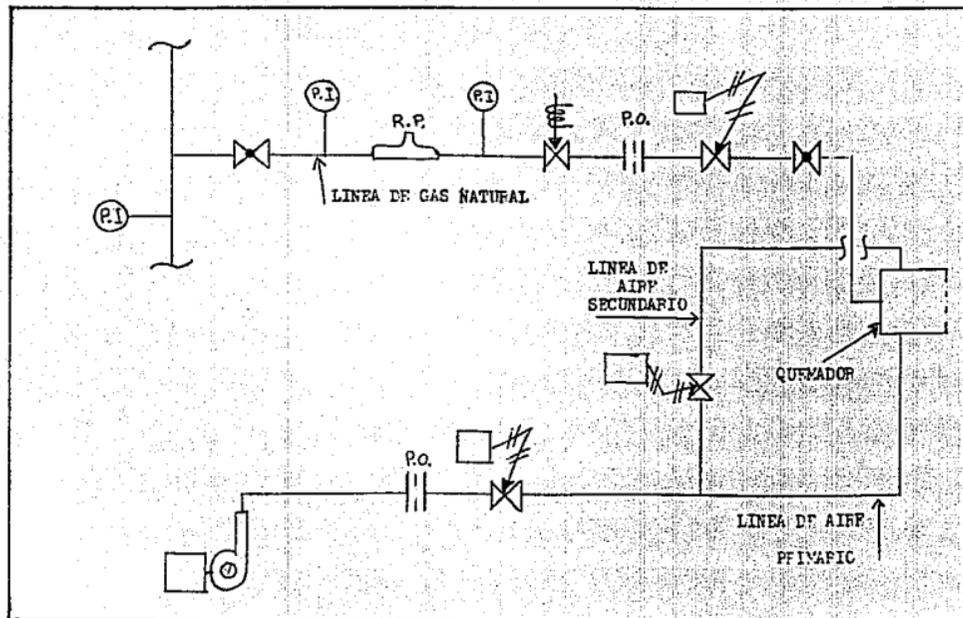


DIAGRAMA DE TUBERIA E INSTRUMENTACION

FIGURA # I

1. Alta temperatura (Temp. mayor de 1370 °C.)
2. Alta presión de gas
3. Baja presión de gas
4. Baja presión de aire
5. Tapa abierta
6. Falta de aire comprimido
7. Falta de corriente eléctrica

A continuación tenemos una placa de orificio que envía señales al registrador de flujo mediante un transmisor. En seguida se tiene una válvula de mariposa gobernada por el controlador de flujo y finalmente una válvula macho y el quemador.

La línea de aire cuenta con un ventilador impulsado por un motor de 50 H.P. tiene un switch para baja presión que envía una señal a la válvula macho. Adelante tenemos una placa de orificio que envía señales al registrador de flujo. Después de esta se cuenta con una válvula de mariposa, misma que regula el flujo de aire al sistema.

Antes de llegar al quemador, se tiene una derivación con una válvula para regular, mediante el controlador diferencial de temperatura, la longitud de flama del quemador.

Una fosa de recalentamiento puede trabajar manual o automáticamente, según lo requieran las condiciones del ciclo de

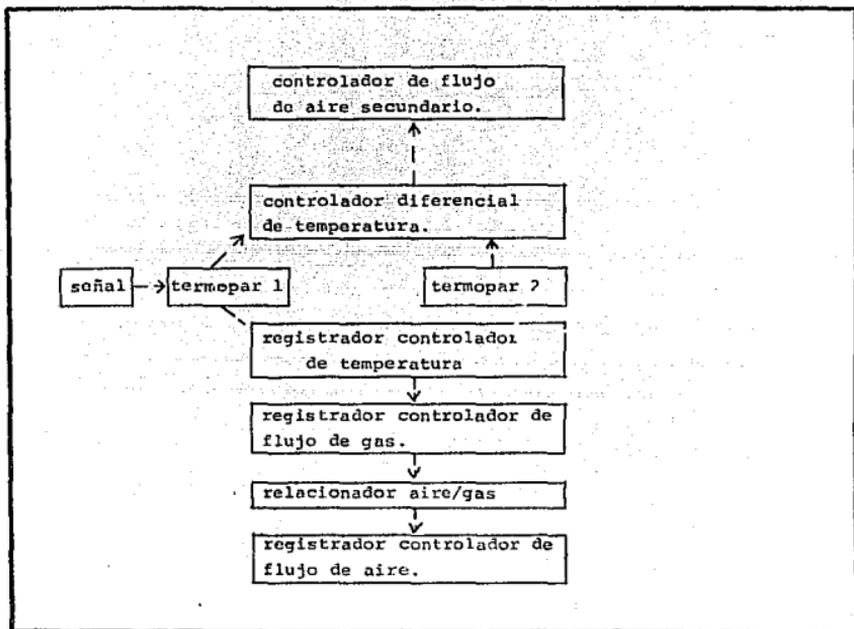
calentamiento del acero en cuestión, para lograr esto se dispone de un cuarto de instrumentación con los siguientes controles:

- 1.- Registrador controlador de temperatura. (R.C.T.)
- 2.- Controlador de flujo de gas (C.F.G.)
- 3.- Controlador de flujo de aire (C.P.A.), el cual trabaja en manual o en cascada con el relacionador de flujo aire/gas.
- 4.- Relacionador de flujo aire/gas. Este trabaja en cascada con el controlador de flujo de gas (C.F.G.).
- 5.- Registrador de flujo aire/gas. (R.P.A./G.).
- 6.- Controlador diferencial de temperatura (C.d.T.)
- 7.- Controlador indicador de presión (C.I.P.). Este trabaja manual o automáticamente.
- 8.- Selector de termopar de control.

A.- Control automático.

Cuando se trabaja automáticamente la variable que controla el proceso es la temperatura. El controlador de temperatura recibe señal de uno de los dos termopares (previamente seleccionado), solicitando mayor o menor cantidad de gas en función de la temperatura que registre el termopar de control. La cantidad de aire suministrada al proceso estará en función de la relación aire/gas, previamente fijada.

La señal que emite el controlador de temperatura se transmite - en cascada tal como se esquematiza en la fig. # 2.



-DIAGRAMA DE INSTRUMENTACION Y CONTROL.

FIGURA # 2

El relacionador de aire/gas tiene una escala que va de 0 a 1.6. Cuando la relación $R = 1$, significa que se suministra la relación estequiométrica de aire y gas necesaria para la combustión completa.

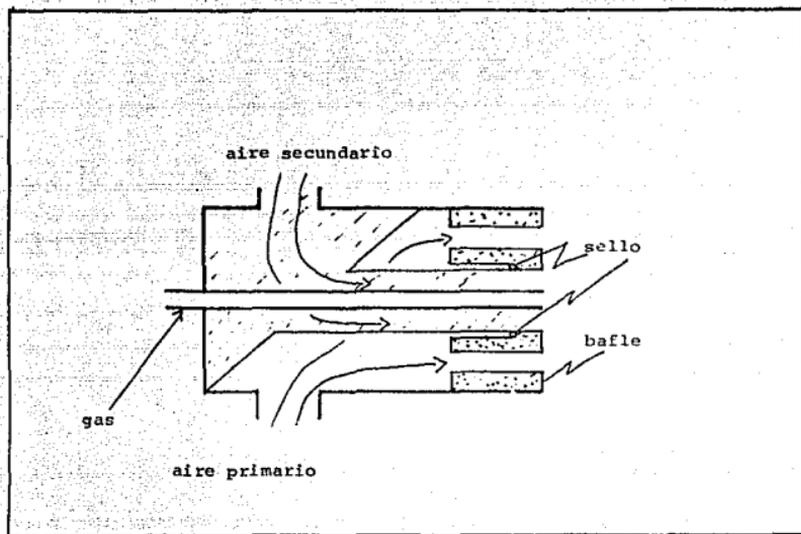
B.- Control Manual.

Cuando se trabaja manualmente la variable que gobierna el proceso es el flujo de gas, y el R.C.T. pasa a segundo término, sirviendo únicamente como registrador de temperatura.

El C.F.A. puede continuar recibiendo señal del gas mediante el relacionador; o bien, puede trabajarse manualmente inyectando la cantidad de aire deseada por el operador.

La función del C.d.T. es mantener una temperatura homogénea dentro de la fosa, éste recibe señal de los termopares y trata de igualar la temperatura del termopar secundario al termopar de control, valiéndose de la inyección de aire secundario al quemador.

La inyección de aire secundario se realiza de la siguiente manera: se tiene un tubo concéntrico al tubo de gas pero de mayor diámetro (fig. 3). Cuando la zona II de la fosa está más fría que la zona I, el C.d.T. manda cerrar la valvula de aire secundario acortando la flama y recibiendo así mayor radiación calorífica la zona II. Cuando la zona II está más caliente que la zona I, el C.d.T. manda abrir la valvula alargando así la flama y retirandola de la zona II.



Esquema del quemador de la fosa.

FIGURA # 3

El baffle del quemador es de concreto de alúmina tabular; cuenta con un orificio central por donde sale aire secundario y gas. En la perifería lleva 8 oradaciones con una inclinación que tiene la función de formar una corriente ciclónica ayudándose de la boquilla del quemador. Actualmente se han realizado modificaciones en baffle y boquilla, las cuales deben evaluarse detalladamente -- para asegurar que no bajará la eficiencia del sistema.

CAPITULO III

OPERACION.

El objetivo de éste capítulo es distinguir claramente entre las características del equipo y el modo en que se está trabajando.

A.- Relación aire-gas.

Dado que el objetivo fundamental del suministro de aire y gas es lograr el calentamiento del sistema, entonces la relación aire-gas se ha fijado en los volúmenes estequiométricos de la combustión total.

Al dividir entre 10 la relación de volumen de aire entre el volumen de gas suministrados al sistema, tenemos los valores indicados en la escala del relacionador aire/gas; por ejemplo: una relación de 1.2, nos indica que se tiene un 20 % de aire en exceso dentro de la fosa.

B.- Presión.

Grainger & Wood (4), demostraron la importancia del control de presión de las fosas como un medio para evitar la infiltración de aire frío, el cual eleva el consumo de combustible y --baja la eficiencia de los recuperadores de calor. El control de presión se justifica como un medio para controlar la atmósfera del horno.

Según las indicaciones de Bloom Company, la presión de trabajo dentro de la fosa se calcula así:

$$P = \frac{d}{100}$$

d = Se expresa en pies; es la distancia del piso de trabajo a la toma de presión.

E P = Es la presión dentro de la fosa. Se expresa en mm. de columna de H₂O.

En la práctica se acostumbra trabajar con una presión de 0.8 a 0.10 mm H₂O, aunque la mayor parte del tiempo se trabaja manualmente debido a fallas en el sistema. El modo de trabajar es el siguiente:

- En ascenso de temperatura (flujo máximo), con la compuerta totalmente abierta.

- Durante el empape y laminación con la compuerta a 1/4 de abertura.

Cuando se trabaja con presiones excesivamente altas (p 0.15), los gases buscan salida, encontrándola en las discontinuidades del refractario, tales como juntas de expansión y grietas, deteriorando los materiales aislantes, casco y anclaje, y disminuyendo así la duración del revestimiento e incrementando los costos de operación.

Se ha notado que cuando se calienta el material con una presión baja (P 0.081, el tiempo de calentamiento aumenta.

Una posible explicación a esto, sería la disminución en la interacción gas-metal y consecuentemente una menor transferencia de calor por conducción del gas al lingote.

C. Control de temperatura dentro de la fosa,

Durante el calentamiento de la carga se pueden distinguir dos etapas: ascenso o tracking y empape o soaking. El ascenso comprende desde que se inicia el calentamiento hasta que se alcanza la temperatura de laminación; mientras que el empape, es el tiempo necesario para que la temperatura de la superficie y el centro del lingote se iguale.

Durante el ascenso la fosa trabaja a su máxima capacidad de calentamiento, formándose una flama larga, lo que hace que la zona I de la fosa se caliente más rápidamente que la zona II; Lo anterior nos obliga a gobernar siempre el proceso con el termopar # 1 (T.P.I), con el fin de evitar un sobrecalentamiento a la zona I.

Durante esta etapa el C.d.T. trata de acortar la flama, pero esto no se percibe, debido a que la cantidad de flujo de gas y aire hace despreciable su efecto, por lo que, éste se nota hasta que el flujo disminuye a un 30% aproximadamente.

Se ha observado que estando en buenas condiciones tanto la fosa como el equipo, la diferencia de temperaturas se cierra completamente. Desafortunadamente esto no siempre sucede, debido principalmente a:

- a.- Baffle desviado.
- b.- Boquilla del quemador deforme.
- c.- Equipo de control de flujo descalibrado o en malas condiciones.
- d.- Nivel de caspa disparejo, presentándose una cima en el piso por cualquiera de las dos causas anteriores.

A través de la experiencia se han encontrado alternativas para resolver momentáneamente éste problema:

- 1.- Aumentar la presión de trabajo. Por experiencia se sabe que a bajas presiones la diferencia de temperaturas se incrementa (zona II más fría).
- 2.- Disminuir la relación aire/gas a un rango de 0.7 a 1.0. Al disminuir el contenido de aire, la flama pierde cuerpo y se acorta (flama suelta), aumentando su diámetro y, permitiendo así, mayor calentamiento en la zona II. El inconveniente de ésta práctica es que el consumo de combustible se incrementa en un 20% aproximadamente.

D.- Material listo para laminar.

Una fosa de recalentamiento tiene capacidad para calentar 12 lingotes de 3 ton. de acero bajo carbono en un tiempo aproximado de 8 hrs., partiendo de lingotes a temperatura ambiente y fosa fría. Esta información es en sí un tanto relativa, pues a pesar

de contar con fundamento (ver capVI.d), existen infinidad de variables de operación que pueden alterar los tiempos indicados. Debido a ésto, se hace necesario indicar las características fundamentales para enviar a laminación una carga de 12 lingotes:

- a.- Material a la temperatura de empape.
- b.- Flujo de aire y gas al mínimo durante 3 hrs.
- c.- Diferencia de temperaturas (controlando con termopar 11), igual a cero 5 menor de 20 °C.

Este último punto no tiene gran importancia durante la laminación de los lingotes de la zona I, pero al continuar la laminación del material restante se presentarán problemas por material frío.

CAPITULO IV.

LA ATMOSFERA Y SU INTERACCION CON EL ACERO

A.- Tipos de atmósferas en hornos.

Existen básicamente dos tipos de atmósferas:

- 1.- Atmósferas preparadas
- 2.- Atmósferas naturales ó de combustión.

1.--Las atmósferas preparadas comercialmente importantes han sido clasificadas por la American Gas Association en seis clases, en base al método de preparación o a los constituyentes originalmente empleados (Ref.5 .).

CLASE 100 Base exotérmica. Formada por la combustión parcial o completa de una mezcla aire-gas. El vapor de agua puede removerse para producir un punto de rocío determinado.

CLASE 200 Preparada base nitrógeno. Una base exotérmica con eliminación de CO_2 y H_2O .

CLASE 300 Base endotérmica. Formada por la combustión parcial o completa de una mezcla de gases y aire en una cámara catalítica calentada externamente.

CLASE 400 Base carbón. Formada por el paso de aire a través de una cama de carbón incandescente.

CLASE 500 Base exotérmica-endotérmica. Formada por la combustión completa de una mezcla de aire y gas, removiendo el vapor de agua y reformando el CO_2 a CO por medio de una reacción con el gas combustible en una cámara catalítica calentada externamente.

CLASE 600 Base amoníaco. Esta puede consistir de amoníaco en bruto, amoníaco disociado o quemado parcial o totalmente, o amoníaco disociado con un punto de rocío regulado.

Las atmósferas en estas seis clases son divididas a su vez en 26 subclases para indicar las variaciones en el método por el cual han sido preparadas. Esta clasificación proporciona un gran número de posibilidades, de las cuales pocas son industrialmente importantes.

2.- Las atmósferas naturales, de combustión ó de flama directa, son aquellas que contienen los productos de combustión de un hidrocarburo y aire, y son: CO , CO_2 , H_2 , H_2O , CH_4 y N_2 . Este es el tipo de atmósfera que se tiene en las fosas de recalentamiento, por lo que nuestro análisis se enfocará a éste.

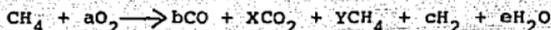
B.- La atmósfera del horno y sus reacciones.

Dada la importancia de tener un conocimiento claro de la atmósfera generada para lograr un mejor control de la fosa, se diseñó un modelo termodinámico basado en los trabajos de C.A. Stickels --

(7 l. El modelo se plantea para dos condiciones:

a.- Relación aire/gas ≤ 9.615

La ecuación de combustión es:

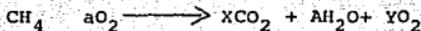


Las reacciones de equilibrio involucradas son:

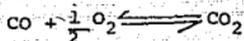
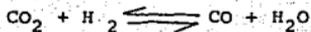


b.- Relación aire/gas ≥ 9.615

La ecuación de combustión es:



Las reacciones de equilibrio involucradas son:



De acuerdo a las premisas para los casos mencionados, se plantean una serie de ecuaciones que nos permiten conocer la concentración de los gases de combustión manteniendo temperatura y relación aire/gas fijas*. Los resultados obtenidos para una temperatura de 1200°C se aproximan a los reportados por H.M. Heyn en la gráfica N° 1.

La decarburación.

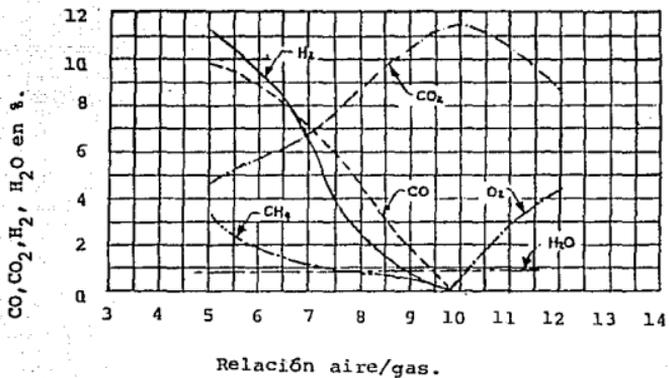
La oxidación del carbono ó decarburación tiene lugar mediante las siguientes reacciones reversibles.



El potencial de carbono (actividad del carbono) de acuerdo con la reacción (I) es:

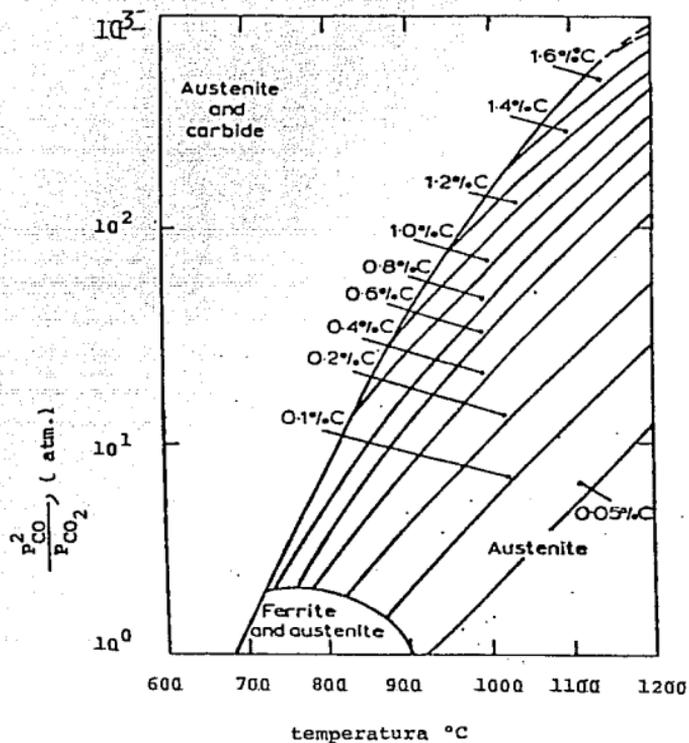
$$a_C = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2} \cdot K} \text{ ----- (3) } \quad K = \text{Cte. equilibrio.}$$

* Para detalles sobre la solución del modelo consultar el anexo N° I.



Efecto de la variación de la relación aire/gas sobre los productos de combustión, después de enfriarlos a 40 °F. según H.M. Heyn (6).

Figura # 1



Condiciones de equilibrio para aceros al carbono
 como función de la relación CO/CO_2 y la temperatura.
 (8 l.

Grafica # 2.

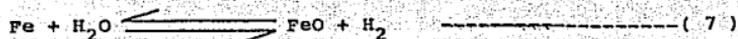
a la formación de una capa superficial de ferrita que actúa como una barrera de difusión. Por encima de A_{C_3} (zona austenítica), la decarburación se convierte en un serio problema (9).

C.- La oxidación del acero en el horno.

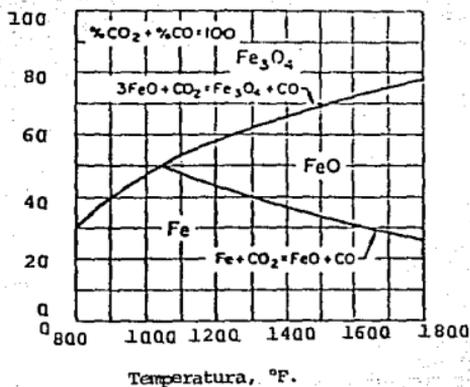
La oxidación del hierro (formación de caspa, cap.I,B.1), puede tener lugar bajo la interacción del oxígeno del aire,



o más probablemente por la reacción:

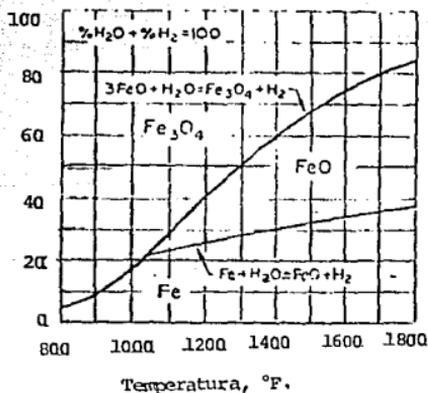


Al desarrollar las últimas cuatro ecuaciones se obtienen las gráficas 3 y 4 respectivamente; en éstas se representan las curvas de equilibrio para la formación de FeO y Fe_3O_4 (5).



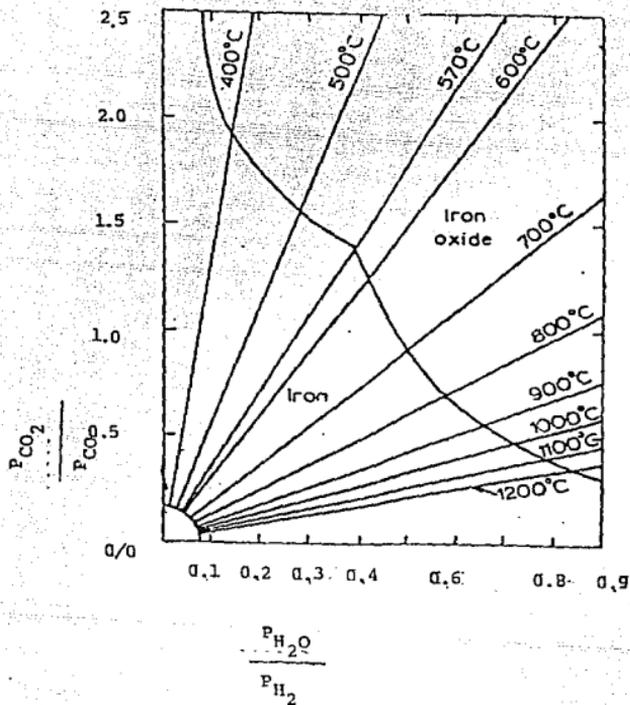
Curvas de equilibrio para la formación de FeO y Fe_3O_4 en una atmósfera de CO/CO_2 . (ref. 5).

Figura # 3



Curvas de equilibrio para la formación de FeO y Fe_3O_4 en una atmósfera de H_2/H_2O . (ref. 5).

Figura # 4.



Condiciones de equilibrio para la oxidación del hierro en una atmósfera de CO , CO_2 , H_2 , H_2O . (ref.5).

Figura # 5

En los capítulos de operación e instrumentación y control, se analizó el manejo del controlador aire/gas. Este equipo esta calibrado de tal forma que cuando se coloca en 1.0, se tendrá la relación de aire estequiométrica para la cantidad de gas alimentada*, es decir:

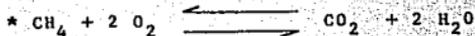
SI R= 1	se requieren	9.615	vol. aire/vol.gas
SI R= 1.2	se requieren	9.615 X 1.2	vol. aire/vol.gas
SI R=0.85	se requieren	9.615 X 0.85	vol. aire/vol.gas

En la práctica se ha generalizado la siguiente idea:

- SI R > 1 atmosfera oxidante
- SI R = 1 atmosfera neutra
- SI R < 1 atmosfera reductora

Analizando estos conceptos con las gráficas 1 y 5 diremos que: una relación R > 1 efectivamente genera una atmosfera oxidante.

Una relación R=1 define únicamente la relación de combustión estequiométrica, siendo una atmosfera oxidante también.



$$\left. \begin{array}{l} 2 \rightarrow 0.208 \\ X \rightarrow 1.0 \end{array} \right\} X = 9.615$$

∴ la relación $\frac{\text{AIRE}}{\text{GAS}}$ estequiométrica

$$\text{es } \frac{9.615 \text{ AIRE}}{1 \text{ GAS}}$$

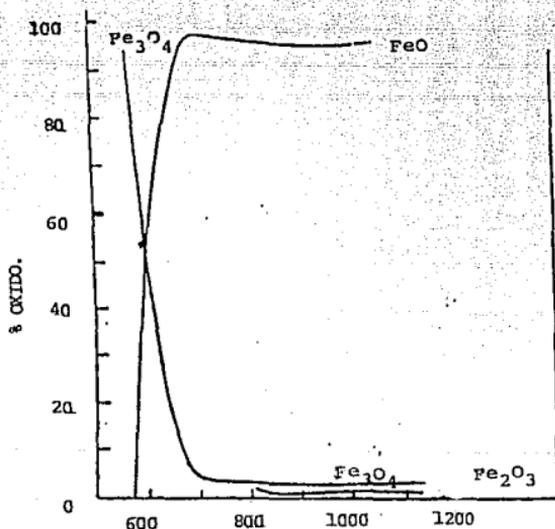
Con el modelo de la atmósfera del horno (Apéndice N° 1), a una temperatura de 1200°C se obtiene una gráfica similar a la N° 1. según la gráfica N° 5, a esta temperatura se requiere una relación aproximada de $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 0.3$ y $\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} = 0.84$ para lograr una atmósfera neutra. Si buscamos en la gráfica 1 encontraremos que para una relación aire-gas inferior a 5, es posible tener dichas condiciones. De acuerdo con la experiencia personal y con Trikins (10), una relación aire-gas de estas proporciones, no suministra el calor necesario para alcanzar los 1200°C en el horno, requiriendo de una fuente de energía adicional.

Otra dificultad que se encuentra para alcanzar una atmósfera neutra durante el calentamiento, es que, según la gráfica N° 5, las proporciones CO_2/CO y H_2O/H_2 varían con la temperatura, haciendo sumamente complicado su control en condiciones prácticas.

Según cifras de rendimiento (11), se tiene una merma por oxidación de 2.7 % en las fosas de recalentamiento. Esto representa aproximadamente 1950 ton/año de acero perdido por este concepto. A pesar de lo pesimista que parece el dato, éste nivel de merma es necesario porque ésta es una

manera económica de eliminar defectos superficiales en el lingote.

Los componentes principales de la caspa del lingote son -- wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3) y generalmente se encuentran en las proporciones 95:4:1 respectivamente (fig. N-º 6, ref. 12).

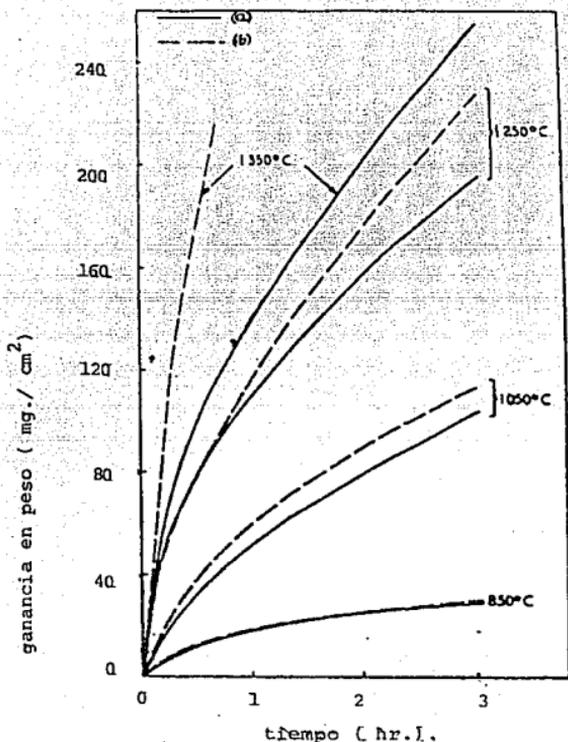


Gráfica de FeO, Fe_3O_4 y Fe_2O_3 contra temperatura. (ref.12).

GRAFICA # 6

De acuerdo con Nicholson (13), la oxidación del acero presenta un comportamiento proporcional al tiempo de exposición en el horno (fig. 7), según la ecuación:

$$W \propto \sqrt{t}$$



Atmósfera del horno:					
	%O ₂	%CO ₂	%H ₂ O	%SO ₂	%N ₂
a	6.0	6.0	15.0	0.125	balance
b	1.5	8.0	20.0	0.175	balance

Oxidación de un acero con 0.16% C.

La gráfica nos indica como la oxidación del acero aumenta con la temperatura y el tiempo de exposición, siendo de mayor relevancia el primer factor. (ref. 13).

Figura # 7

D.- Efecto de los elementos de aleación durante la oxidación.

Cuando un acero aleado es calentado para la laminación, los elementos de aleación también interaccionan con la atmósfera. En la fig. 8, ref. 10, se puede apreciar como una atmósfera reductora para el hierro es oxidante para el Mo, Cr y Mn; mientras que, una atmósfera oxidante, será reductora para el W y Ni.

-CROMO:

Es un intenso formador de carburos y estrecha la región austenítica. En contenidos del 5% forma, al igual que el molibdeno, -- una espinela de $FeCr_2O_3$ que aumenta la resistencia a la formación de cascarilla. (ref. 12,25).

-NIQUEL:

El níquel es soluble en hierro y ensancha la región austenítica (gamágeno); por lo que, los aceros con 1.5 %C y más de 15 %Ni son austeníticos. Además el níquel desplaza el punto de formación de la perlita a temperaturas más bajas y contenidos de carbono -- inferiores.

El níquel dificulta la difusión del carbono y favorece la descomposición del carburo de hierro y, por ello, la formación de -- grafito. Manteniendo mucho tiempo los aceros con alto contenido de níquel a temperaturas elevadas, se puede descomponer la cementita formándose grafito. (ref. 25).

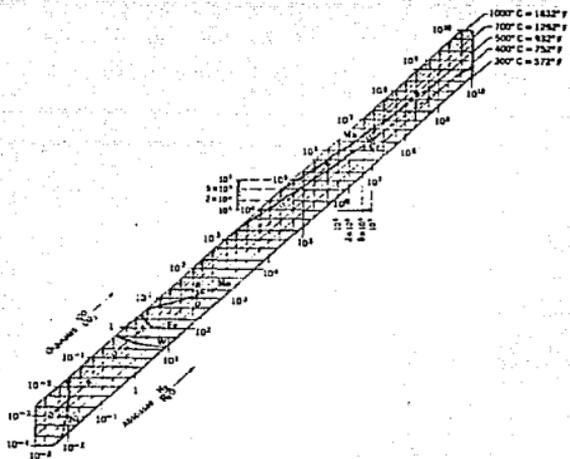


Diagrama de oxidación-reducción para varios metales,
 (ref.10).

Figura # 8

-MANGANESO:

Sustituye al hierro en la caspa de acuerdo a las reacciones, (ref.12):



-MOLIBDENO:

El molibdeno estrecha la región austenítica, por cuyo motivo son ferríticos los aceros bajo carbono con más de 5 %Mo. Es un potente formador de carburos.

En los rangos normales de Mo menor de 1 %, la velocidad de oxidación se reduce por la formación de una espínela de molibdeno (Fe_2MoO_4), en la interfase caspa-metal. En los aceros de baja aleación, con contenidos de alrededor de 0.25 %Mo, no hay espínela suficiente para formar una capa continua en la interfase (ref.12).

-AZUFRE:

En los niveles normales, abajo de 0.035 %S, no tiene un efecto significativo. En aceros de alto azufre, arriba de 0.10 %S, presenta mayor velocidad de caspeado debido a la presencia de una fase eutéctica de hierro y FeS [$\text{Fe}(\text{FeS})_y$], en estado líquido en la caspa. (ref.12, 26).

-FOSFORO:

Al igual que el azufre, el fósforo disminuye la resistencia a la formación de cascarilla debido a la formación de Fe_3P , el cual se licúa durante el proceso de calentamiento y laminación, y hace que las puntas se habran (efecto cocodrilo, ref. 26).

E.- ENRIQUECIMIENTO SUPERFICIAL, COBRE Y NIQUEL:

El enriquecimiento superficial consiste en la segregación -- de elementos hacia la interfase Wustita-metal, debido a que son más nobles que el hierro. Dentro de los elementos más sobresalientes se encuentra el cobre y el níquel.

-NIQUEL:

En contenidos de Ni $\geq 3\%$, hace que la "caspa" sea adherente durante el rolado. Para contenidos menores no se presenta éste -- efecto.

-COBRE:

Su enriquecimiento puede ocasionar la precipitación de escoria de cobre y ésta puede causar ataque intergranular o fragilidad en caliente. Eventualmente el cobre excede el límite de solubilidad en la austenita, precipitando como fase líquida en los bordes de grano y ocasionando fragilidad en caliente. (ref. 13,14).

Para evitar la fragilidad en caliente, se recomienda no exceder de un 0.50% los contenidos de cobre (*). En los casos en que los contenidos de cobre se encuentren en el rango de 0.30 % a 0.50 %, recomiendo la siguiente práctica:

- a).- Mantener la carga el menor tiempo posible en el horno.
- b).- En ascenso calentar con relación $R=1$ y en empape con $R= 0.90$ a 0.95 (**)

Para aceros con Ni $\geq 3,0\%$ emplear la práctica anterior.

(*) Ref. 14.

(**) Cifras del relacionador aire/gas.

F.- FRAGILIDAD EN CALIENTE POR Al_xN_y .

El aluminio se utiliza en los aceros para calmarlos y afinar el grano. El aluminio remanente en el baño es el que actúa realmente como afinador de grano; éste reacciona con el nitrógeno para formar Al_xN_y (nitruro de aluminio). Las condiciones de reacción son (ref.29):

- $Al \geq 0.020\%$ y presencia de nitrógeno.
- Lingotes en el rango de 900-950 °C.

Cuando se cumplen las condiciones anteriores y el acero se mantiene en el intervalo de 900-950 °C por espacio de 3 hr. o más, se corre el riesgo de tener precipitación de Al_xN_y en los bordes de grano. Si dentro de éste ciclo térmico el lingote se envía a desbaste, se presentarán grietas finas en todo el cuerpo del material.

Para el caso de los aceros al carbono serie 10XX (desde bajo hasta alto carbono), se recomienda la adición de titanio o vanadio para evitar la formación de Al_xN_y . (ref. 30,31).

Los aceros co C.E. mayor a 0.56 no es posible cargarlos en caliente debido a que se dan las condiciones de precipitación del nitruro de aluminio.

La manera de evitar estos problemas es:

- No cargar en caliente los lingotes con C.E. 0.56 (*) enviarlos a enfriar al piso.
- Cargar en frío y evitar permanencias prolongadas en el rango de 900 a 950 °C.

Otras alternativas pueden ser:

- Fabricar los aceros con $Al \leq 0.020\%$

(*) C.E. ver pag.73.

Adicionar vanadio o titanio en lugar de aluminio para afinar el tamaño de grano, en niveles de 0.025 a 0.035%.

Se sabe (31) que es necesaria la adición de V. o Ti para disminuir los problemas de grietas finas generadas, durante la carga en caliente en los aceros, serie 10XX.

CAPITULO V.

PRACTICAS DE CALENTAMIENTO

A.- DEFINICION: Una "práctica de calentamiento" consiste en fijar las condiciones térmicas que permitan lograr la mínima tensión de flujo durante el conformado en caliente y obtener un producto sano.

El conformado de los metales se divide en dos grandes grupos (ref.15):

- 1.- TRABAJO EN FRIO: Es aquél donde la deformación -- plástica se realiza en una región de temperatura y un intervalo de tiempo tal que el endurecimiento por deformación no es relevado automáticamente.
- 2.- TRABAJO EN CALIENTE: Es aquél donde la deformación se realiza bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación tales que el proceso de recuperación -- es simultáneo a la deformación.

En el trabajo en caliente el endurecimiento por deformación y la distorsión de la red (producidas por la deformación), son rápidamente eliminadas por la formación de granos libres de tensión como resultado de la recristalización. Grandes deformaciones son posibles debido a que el proceso de -- recuperación es simultáneo a la deformación. (ref.15).

El trabajo en caliente ocurre esencialmente a una tensión

de flujo constante y debido a que ésta disminuye con el aumento de temperatura, la energía requerida para la deformación es generalmente mucho menor para trabajo en caliente - que para trabajo en frío. Dado que el endurecimiento por deformación no es relevado simultáneamente en el trabajo en frío, la tensión aumenta con la deformación; por lo tanto, la deformación total que es posible sin causar fractura es menor para el trabajo en frío que para el trabajo en caliente; a menos que los efectos del trabajo en frío sean relevados inmediatamente por un recocido. (ref.15).

B.- PRACTICAS DE CALENTAMIENTO.

Los principales puntos que componen una práctica de calentamiento son:

- a.- condiciones de carga a fosas.
- b.- velocidad de calentamiento.
- c.- temperatura de "empape".
- d.- tiempo total de calentamiento (o de ciclo).

a.- **CONDICIONES DE CARGA:** existen dos formas de cargar los lingotes a fosas.

- carga en frío.
- carga en caliente.

b.- **VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO:** la velocidad de calentamiento no tiene influencia en las propiedades finales de los aceros de media y baja aleación; por eso, desde el punto de económico, es necesario realizar el calentamiento a máxima velocidad.

Se pueden definir dos velocidades (I6):

- velocidad técnicamente posible (V_p).
- velocidad técnicamente admisible (V_a).

La velocidad técnicamente posible esta determinada por el tipo de horno, la fuente de calor y por la magnitud de la carga.

La velocidad técnicamente admisible se determina por:

- el conjunto de propiedades fisico-químicas del acero.
- por el estado estructural.
- por la configuración geométrica de la pieza.
- por el intervalo de temperaturas de calentamiento.

Se definen (ref.16):

$$v_a = \frac{5.6 A \sqrt{v_{adm.}}}{\alpha E r^2} \quad (\text{cilindro}) \dots (1)$$

$$v_a = \frac{2.1 A \sqrt{v_{adm.}}}{\alpha E s^2} \quad (\text{placa}) \dots (2)$$

Como se deduce de las fórmulas anteriores, v_a es función de:

1.- Difusividad térmica (17).

$$A = \frac{\lambda}{C \delta}$$

λ = conductividad térmica

C = capacidad calorífica

a presión constante.

δ = densidad

2.- Módulo de elasticidad (E).

3.- Coeficiente de dilatación lineal (α).

4.- Dimensiones de la pieza (lingote).

Los gradientes admisibles de temperatura se definen como (16):

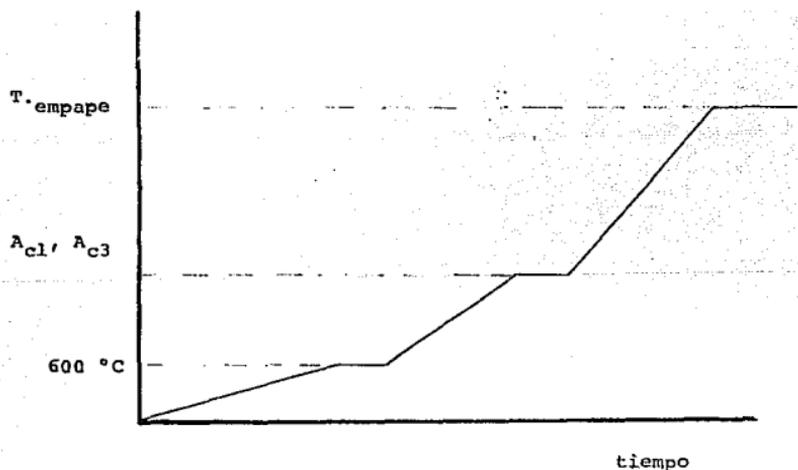
$$\Delta T_a = \frac{1.4 \sqrt{v_{adm.}}}{E} \dots (\text{cilindro}) \dots (3)$$

$$\Delta T_a = \frac{1.5 \sqrt{v_{adm.}}}{E} \dots (\text{placa}) \dots (4)$$

La velocidad técnicamente admisible tiene importancia solo-- hasta los 600°C; a temperaturas superiores el metal puede calentarse a cualquier velocidad, ya que las tensiones térmicas que--

se generan son relajadas, debido a que se ha alcanzado la zona de deformación plástica.

El efecto de las tensiones ocasionadas por un cambio de fase pueden ocasionar grietas al material, por lo que, se deben tomar precauciones en ésta etapa para lograr que las transformaciones se realicen casi en el mismo momento en toda la pieza. (fig.2). Lo más práctico es mantener de 30 a 50 °C abajo de A_{C1} , A_{C3} durante 1/2 hora (este tiempo es en función de la sección del lingote , ver cap. VI).



CURVA DE CALENTAMIENTO PARA UN ACERO DE MEDIA ALEACION. (ref.19).

FIGURA # 2

C.- TEMPERATURA DE "EMPAPE"

Se conoce así a la máxima temperatura que debe alcanzar la fosa para el conformado en caliente del acero en cuestión. La temperatura de empape está dada por la siguiente fórmula:

$$T_E = T_L + K \quad \text{-----} \quad (5)$$

K = representa la caída de --
temperatura desde la fosa al primer --
paso de desbaste.

T_L = temperatura máxima de conformado
en caliente.

T_E = temperatura de la fosa.

La ec.5, da una aproximación de la temperatura de empape del acero, aunque puede ser necesario hacer ajustes, de acuerdo al comportamiento del acero durante el desbaste.

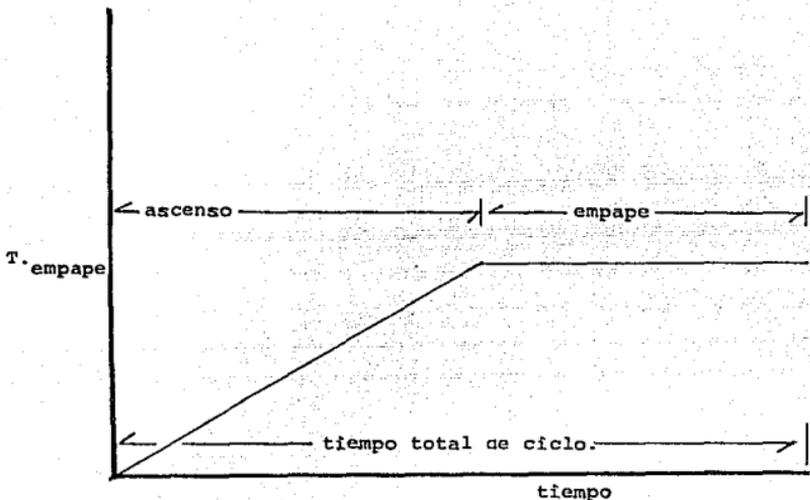
D.- TIEMPO TOTAL DE CALENTAMIENTO.

Los aceros presentan un rango de temperaturas definido para el conformado en caliente. Industrialmente es importante alcanzar este rango al menor tiempo posible, siendo una de las principales variables el tiempo de calentamiento.

Un perfil de calentamiento consta de dos etapas principales: ascenso o "tracking" y empape o "soaking" (fig.3).

El ascenso es el tiempo necesario para lograr que el lingote alcance la temperatura de empape deseada en la superficie.

El empape es el tiempo necesario para que la temperatura entre la superficie y el centro se igualen.



GRAFICA DE LA HISTORIA TERMICA DE UN CICLO DE CALENTAMIENTO.

FIGURA #3.

El tiempo total de calentamiento depende de la rapidez de flujo de calor en el acero, lo cual es función de:

- 1.- El gradiente de temperaturas entre la fosa y el lingote.
- 2.- La difusividad térmica (A).

- 3.- La conductancia térmica por unidad de superficie-- (B).

La conductancia combina los efectos del flujo de calor por conducción y radiación entre una superficie y un fluido.

4.- La geometría del lingote.

CAPITULO VI

DISEÑO DE PRACTICAS DE CALENTAMIENTO.

En el capítulo anterior definimos los principales puntos que integran una práctica de calentamiento, los cuales deben observarse cuidadosamente para obtener buenos resultados.

Al diseñar una práctica de calentamiento surgen factores tales como la velocidad de calentamiento, las zonas críticas de calentamiento y los tiempos de calentamiento; éstos puntos se discuten a continuación.

Primeramente definiremos los elementos y las condiciones generales del diseño de las prácticas de calentamiento, para concluir finalmente con los aceros bajo carbono y baja aleación.

Los elementos básicos para la formulación de un ciclo térmico son:

- Análisis químico
- Tamaño del lingote
- Diagrama de fases temperatura-composición.
- Rango de conformado en caliente.
- Comportamiento metalúrgico del acero a distintas temperaturas.

Contando con la información anterior, procederíamos a determinar los siguientes conceptos particulares:

a.- TEMPERATURA DE CARGA.

Como se menciona en el cap. V, la temperatura de carga presenta dos variantes:

- carga en caliente. $T. \geq 750^{\circ}\text{C}.$

- carga en frío. $T. \leq 150^{\circ}\text{C}.$

La temperatura de la fosa durante la carga deberá estar a la temperatura del lingote (condición ideal). Esto es muy importante para evitar problemas por choque térmico ocasionados por la estructura de colada, las tensiones residuales ocasionadas durante el enfriamiento y por la susceptibilidad intrínseca del acero a éste efecto.

b.- LA VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO.

Desde el punto de vista económico es necesario realizar el calentamiento a la máxima velocidad; desafortunadamente ésta está supeditada a la velocidad técnicamente admisible.

Calcular las velocidades de calentamiento con las fórmulas del capítulo V es difícil, por la poca disponibilidad de datos, por ello, prácticamente se usan velocidades de 50,75 y 100 °C./Hr., y en algunos casos se calienta a la máxima velocidad del equipo (350 °C/Hr.aprox.).

Cuando la velocidad de calentamiento es superior a la técnicamente admisible, se tiene una elevada probabilidad de aparición de grietas, causadas por la presencia de grandes tensiones térmicas no compensadas por la resistencia del metal. Estas grietas se presentan a temperaturas inferiores a 600 °C., cuando el metal se encuentra en la zona de deformación elástica.

c.- TEMPERATURA DE EMPAPE.

La temperatura de empaque esta dada por la ecuación:

$$T_E = T_L + K \quad \text{-----} \quad (\text{ec.5, cap.V.})$$

Para el caso específico de ICHSA, y para aceros al carbono y baja aleación, $K = 163 \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (*)$

$$T_E = T_L + 163$$

d.- TIEMPO DE CALENTAMIENTO.

Los aceros presentan un rango definido de temperaturas para el conformado en caliente; industrialmente es importante alcanzar éste rango al menor costo posible, -- siendo una de las principales variables el tiempo de calentamiento.

ICHSA, solicitó un estudio del tiempo necesario para el calentamiento de un lingote de 2.7 Ton. y 507x507 mm. - de sección a los laboratorios Sheffield (18), con los resultados de la tabla # 1.

TABLA # - 1

LUGAR	PESO	SECCION	t. EMPAPE	t. TOTAL CICLO
BRITISH STEEL	2.7 Ton.	507x507 mm	120 min.	6 Hr., 30 min.
ICHSA	3.0 Ton.	510x510 mm	135 min.	6 Hr., 45 min.

(*) Ésta constante fué definida al cabo de de una serie de lecturas en campo.

debido a que el resultado anterior se obtuvo en laboratorio y que el lingote cambio a 3.0 Ton. y 510X 510 mm. de sección, se decidió determinar en campo el tiempo necesario para alcanzar el mínimo gradiente de temperatura entre la superficie y el centro del lingote. Para ello se insertaron dos termopares a un lingote, uno al centro y otro a 1/2 plg. de la superficie, cubriendo el cuerpo de la camisa del termopar con fibra cerámica.

Las conclusiones obtenidas en este estudio comparativo son:

1.- El tiempo mínimo para alcanzar el menor gradiente de temperatura entre la superficie y el centro para un acero bajo carbono (1008 AISI), en una fosa en condiciones óptimas de operación es de - 6 Hr., 45 min.

2.- El tiempo mínimo de empape es de 2 hr., 15 min. - Es muy importante conocer esta información, debido a que el 90 % de los aceros fabricados en ICHSA, son aceros al carbono y de baja aleación, lo cual nos permitira optimizar el proceso.

Hasta aquí hemos definido las condiciones necesarias para determinar un ciclo térmico, aunque continua siendo un tanto complicado; Debido a esto, la Brittish Steel (19), proporcionó un manual donde se presentan 6 códigos de calentamiento, en los cuales quedan comprendidos los aceros de media y

baja aleación. Estos códigos se transcriben a continuación:

CODIGO A.- Cargar los lingotes a las fosas de recalentamiento a cualquier temperatura y calentar a velocidad máxima. Todas las calidades que caen en esta categoría pueden ser cargadas frías sin temor a problemas de recalentamiento.

CODIGO B.- Enfriar la fosa durante 30 min. con la tapa abierta. Cargar los lingotes, cerrar la tapa y estabilizar durante 20 min. sin calentar; después de esto, calentar a velocidad máxima.

CODIGO C.- Destapar y enfriar la fosa haciendo pasar aire con el ventilador y sin combustible durante 3 Hr. Cargar los lingotes fríos, tapar la fosa y estabilizar la carga durante 1 Hr. Encender la fosa y calentar a razón de 75 °C/hr. hasta 850 °C. Al cabo de esto calentar a velocidad máxima.

CODIGO D.- Enfriar el horno a 800 °C con la tapa abierta. Cargar los lingotes, tapar la fosa y estabilizar la carga durante 1 hr. sin combustible. Prender el horno y calentar a velocidad máxima.

CODIGO E.- Cargar los lingotes en la fosa completamente fría. Calentar a 75 °C/hr. hasta 850 °C. Al cabo de esto calentar a velocidad máxima.

CODIGO F.- Seguir las instrucciones del código E, pero no cargar los lingotes en las posiciones 1, 2 ni 11 y 12.

Se ha observado practicamente que para los aceros trabajados en ICHSA, los códigos E y F son equivalentes a los códigos C y D respectivamente.

El contar con los códigos de calentamiento y con la tabla # 2 simplifica fuertemente la operación; sin embargo, cuando algún acero es modificado en su composición química o el cliente pide algún tipo de acero no estandarizado, aparecen dudas respecto al ciclo de calentamiento apropiado. Debido a esto se buscó un elemento cuantitativo que nos indicara cual es el código de calentamiento adecuado en función del análisis químico.

Despues de consultar con distintas personas, se determinó que el concepto de carbono equivalente podría ser la clave que correlacionara el código de calentamiento y las condiciones de enfriamiento con el análisis químico del acero.

A fin de justificar ésta hipótesis, fue necesario calcular el carbono equivalente (C. E.) de los aceros fabricados durante un lapso de 6 meses, además de recurrir a la historia térmica de las cargas con las que se presentaron problemas de enfriamiento en periodos anteriores. Con ésta información se planteo un primer modelo de correlación, el cual requirió de un periodo de 4 meses de ajustes. El resultado de éste análisis se resume en la tabla # 3.

Muchos errores cometidos en la aplicación de los códigos de calentamiento y enfriamiento, sirvieron para fijar los límites establecidos en la tabla #-3. Es de suma importancia respetar los

límites, ya que está comprobada su exactitud con base en los errores observados en la práctica.

Con la tabla # 3, el manejo de los lingotes en fosas deja de ser un punto obscuro, producto de una tecnología superpuesta y pasa a ser una tecnología para México.

TABLA 2

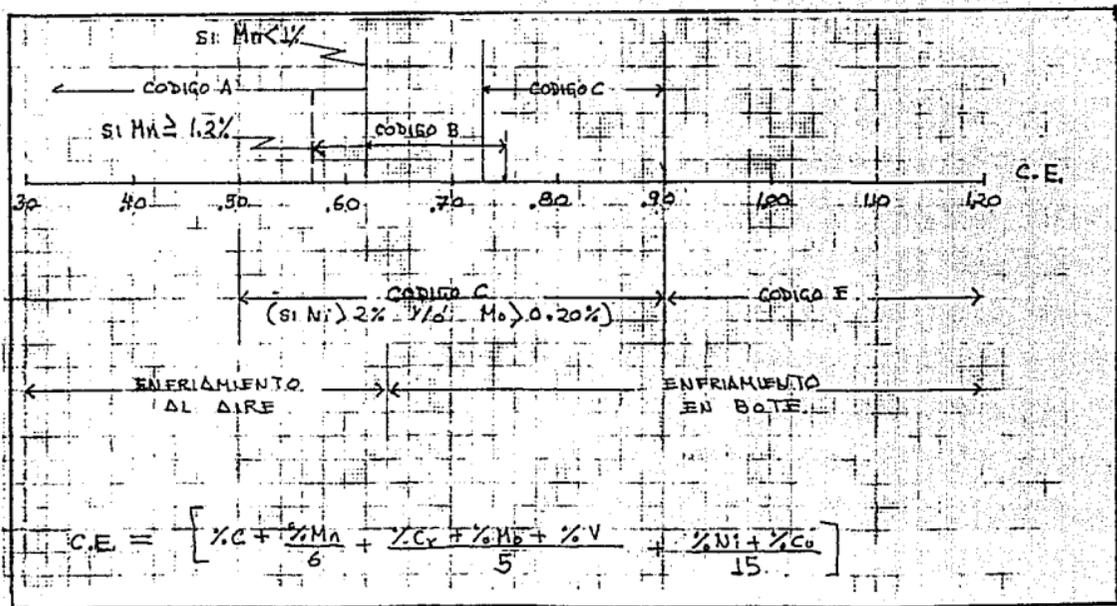
MÉTODOS DE RECALENTAMIENTO RECOMENDADOS
EN FUNCION DEL ANALISIS QUIMICO.

COMPOSICION QUIMICA	CODIGO DE CARGA EN CALIENTE	CODIGO DE CARGA EN FRIO
aceros al carbono con menos de 0.34% C. a.- Mn < 1.0% C.E. < 0.56 b.- 1.0% < Mn < 1.3%	NO (*) A	A B
aceros al carbono con contenidos entre 0.34% y 0.55% C. a.- Mn < 1.0% b.- Mn > 1.0%	A A	B C
aceros al carbono con 0.56% a 0.65% C. a.- Mn < 1.0% b.- Mn > 1.0%	A A	C C
aceros al carbono con 0.65% a 0.95% C., con cualquier contenido de Manganeseo.	A	C
cualquier acero con más de 0.95% C.	D	C (#)
aceros resulfurados, desoxidados o balanceados, si C < 0.25%	D	A
todos los aceros resulfurados con C. > 0.25%	D	C
aceros baja aleación con C. < 0.25% y Mn < 1.0%	NO (*)	A
aceros baja aleación con C. > 0.25% y Mn < 1.0%	A	C
aceros para muelles al Si-Mn y cualquier acero aleado con Cr. > 1.0%	D	C (#)
aceros con alto Ni o Mo, por ejemplo SAE 4615, 4815, etc.	NO (#)	C

(*) los aceros con bajo contenido de carbono y baja aleación (C.E. 0.56 l, presentan problemas de fragilidad en caliente por la precipitación de Al_xN_y.

(#)

en éstos casos se recomienda evitar la carga en frío debido a que éstos aceros presentan una elevada susceptibilidad al choque térmico.



CORRELACION ENTRE EL CARBONO EQUIVALENTE (C.E.), EL CODIGO DE CALENTAMIENTO Y LAS CONDICIONES DE ENFRIAMIENTO DEL LINGOTE.

TABLA # 3

CAPITULO VII

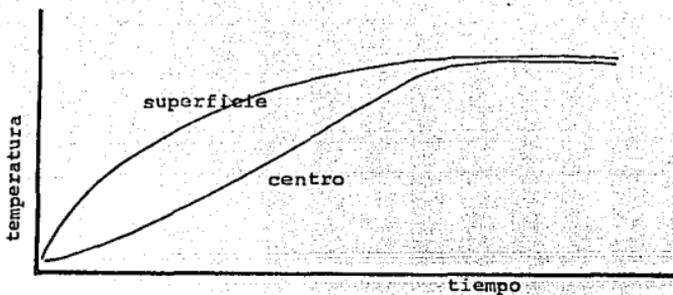
TECNICAS DE CALENTAMIENTO PARA AHORRO DE COMBUSTIBLE.

Dada la gran importancia que han adquirido los energéticos en los procesos industriales, debido a su alto costo en los mercados mundiales y al impacto en el costo final de manufactura, es imprescindible disminuir al máximo su consumo. En virtud de esto, se presentan a continuación distintas técnicas de ahorro de combustible, recopiladas por H. Nashiwa (20). En todas ellas haremos referencia a las fuentes originales.

La figura 1, muestra el perfil de calentamiento obtenido en una fosa de recalentamiento; en ésta se distinguen claramente las etapas de:

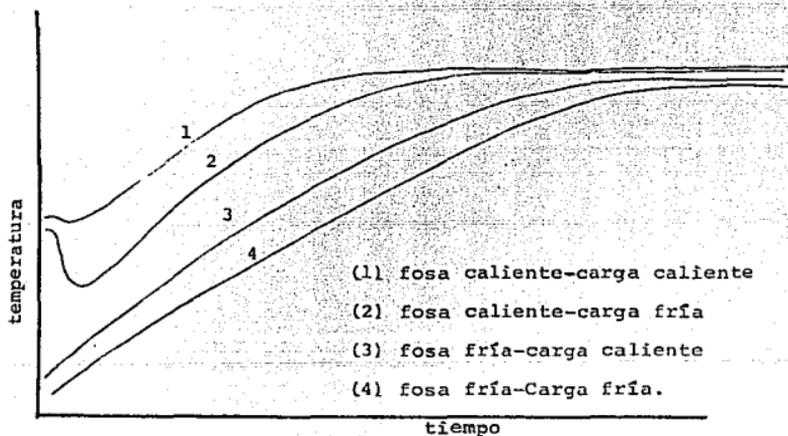
- ascenso o tracking
- empape o soaking

La figura 2, muestra los distintos perfiles de calentamiento que se pueden obtener con las variantes de: fosa fría, fosa caliente y , carga fría , carga caliente. En ésta se observa que el mayor consumo de gas se tiene cuando se carga lingote frío en fosa fría; siendo para la carga de lingote caliente en fosa caliente -- el menor consumo energético.



Perfil de calentamiento donde se muestran las temperaturas de la superficie y el centro del lingote.

FIGURA # 1



Perfiles de calentamiento obtenidos con las variantes indicadas para fosa cargada con 12 lingotes. La temperatura indicada se determino con un termopar colocado en la pared de la fosa (ver fig.2, cap. I).

FIGURA # 2

Nashiwa y Kudo (20 L, lograron disminuir los consumos de gas en las fosas de recalentamiento en un 25.9% con las siguientes - medidas:

-TABLA-#-1

#	ACCION	%	EFFECTO (X10 ³ Kcal/T)
1	instalación de recuperadores de calor.	7.3	19.7
2	instalación de materiales super-aislantes en fosas.	9.8	26.5
3	incremento del poder calorífico del gas.	7.4	20.0
4	otras	1.4	3.8
	TOTAL	25.9	70.0

Se estima que con la introducción de sistemas electrónicos que controlen la combustión completa y los ciclos de calentamiento, - haya un ahorro adicional de 6.3% (12.6 X 10³ Kcal/T.).

Con el total de medidas citadas se lograría una disminución total de 270 X 10³ a 187.74 X 10³ Kcal/T. para las condiciones de - carga caliente en fosa caliente.

En ICHSA, se determinaron (21), los consumos de energía para el código A de calentamiento(*), con los siguientes resultados:

- Carga fría -----995 X 10³ Kcal/T.

- Carga caliente -----683 X 10³ Kcal/t.

(*). cargando en fosa caliente.

Segun Hasegawa y Yamura (22), en la planta de Vibasa, Brasil, se tienen los siguientes consumos:

- Carga fria -----360 x 10³ Kcal/T.
- Carga caliente -----220 x 10³ "

Las condiciones bajo las cuales se obtienen éstos resultados son:

- 1.- aire precalentado a 450 °C.
- 2.- control computarizado de ciclos de calentamiento. y atmosfera del horno.
- 3.- temperatura media del lingote durante la carga en caliente de 600 °C.
- 4.- temperatura de descarga del lingote a desbaste de 1200 °C.

Hasta aquí se han mencionado algunas medidas que nos conducen a la disminución del consumo de energía sin alterar la práctica de calentamiento. Existen algunas prácticas de calentamiento segun Yooichi (23), para minimizar el consumo de combustible; éstas se discuten a continuación:

A.- PRACTICAS DE CALENTAMIENTO CONVENCIONALES.

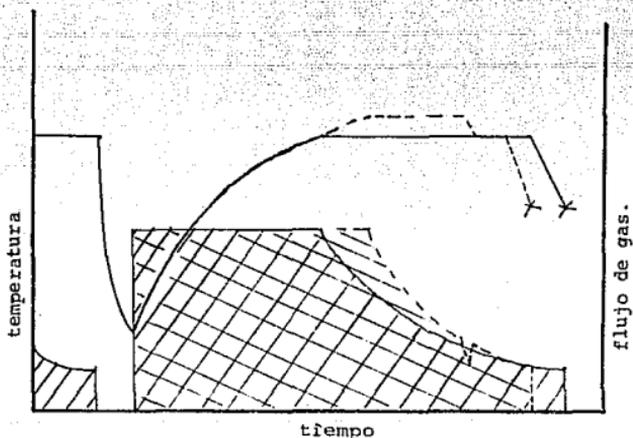
1.- Práctica de calentamiento ordinaria:

El calentamiento se realiza mediante la combustión de -- aire y gas en un quemador. La temperatura de la fosa se fija previamente. Durante el estado inicial, el flujo de gas alcanza un nivel máximo y disminuye gradualmente cuando se alcanza la temperatura fijada; despues los lingotes son empapados durante el tiempo necesario para alcanzar - la mínima diferencia de temperatura entre la superficie y

el centro del lingote. (fig. 11); Ésta practica se usa ampliamente debido a la facilidad de control de la fosa y a su gran habilidad para el calentamiento

2.- Practica de calentamiento con sobreempape:

Cuando se requiere de una elevada productividad, se emplea una práctica de calentamiento en la cual se fija un incremento de 20 o 30 °C a la temperatura de empape convencional durante 1/3 del tiempo de empape establecido, fig.3.



Practica de calentamiento con sobreempape.

FIGURA # 3

B. - PRACTICAS ESPECIALES DE CALENTAMIENTO.

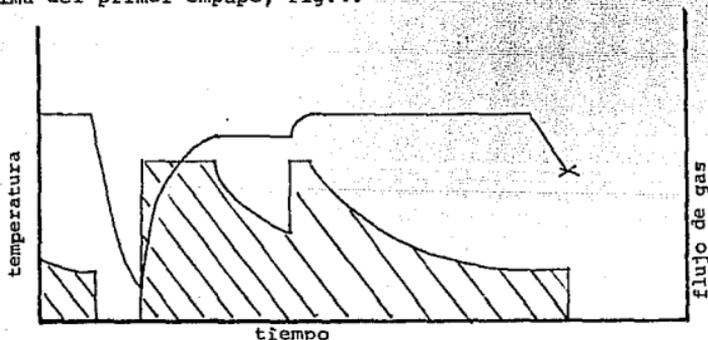
1. - Calentamiento con entrada de calor controlada:

Las fosas de recalentamiento convencionales estan diseñadas para que exista un elevado suministro de calor, debido a que la productividad en el calentamiento es de primer orden, esto permite que el consumo de combustible sea alto.

En general , el suministro óptimo de calor se alcanza con un 60 a 80% del flujo máximo. De acuerdo a ello, el consumo de combustible puede reducirse en un 10% con respecto a las prácticas de calentamiento ordinarias.

2. - Práctica de calentamiento de dos pasos:

Esta es resultado de la práctica anterior y permite un ahorro del 10% de combustible si se selecciona la temperatura óptima del primer empaque, fig.4.



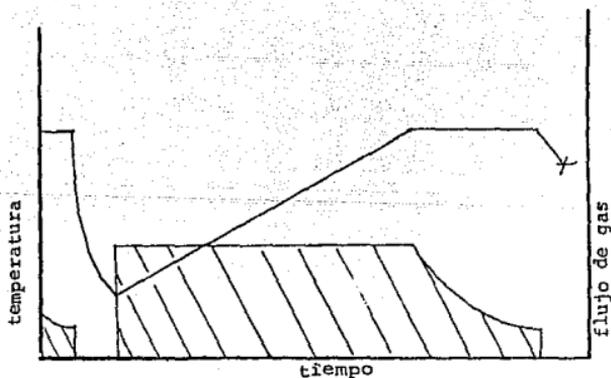
Práctica de calentamiento de dos pasos.

FIGURA - 4

3.- Práctica de calentamiento de gradiente:

Esta práctica tiene una gran historia de aplicación, particularmente en el calentamiento de aceros alta resistencia y aleados. Esta clase de aceros frecuentemente se fracturan durante el calentamiento si no se aplica la práctica adecuada.

El lingote es calentado a una velocidad tal que minimiza la diferencia de temperaturas entre la superficie y el centro del lingote, permitiendo esfuerzos internos excesivos, fig.5. En esta práctica se usa un aparato especial para controlar la velocidad de calentamiento y el flujo de gas. En general la velocidad de calentamiento para aceros de alto grado es de 30 a 100 °C/hr. Lingotes calientes pueden calentarse optimamente, logrando un ahorro de combustible del 15%.

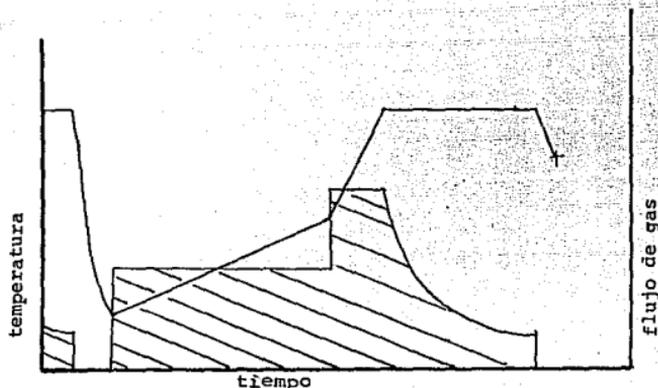


Practica de calentamiento de gradiente.

FIGURA # 5

4.4 4. Practica de calentamiento de doble gradiente:

En la práctica anterior, un gradiente de temperatura muy suave ocasionará que la temperatura superficial del lingote sea mayor que la temperatura de la fosa en el inicio del empape, con lo cual el calor potencial del lingote es liberado. Por otro lado, con un gradiente elevado hay una gran pérdida de calor a través de los gases de combustión. La solución a éstos problemas es una práctica que cambie la velocidad de calentamiento a la mitad del ciclo, fig.6.

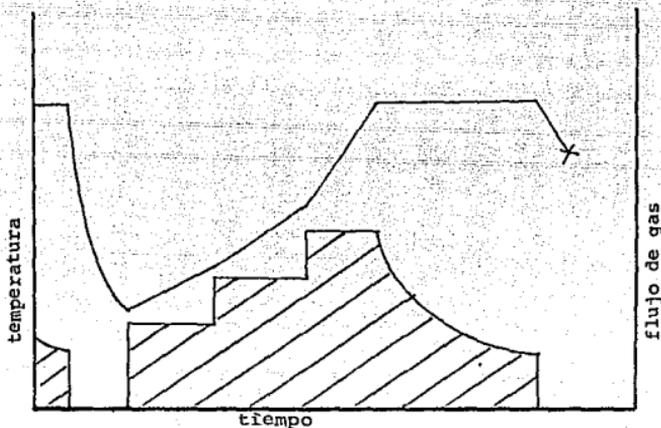


Práctica de calentamiento de doble gradiente.

FIGURA-#-6

5.- Práctica de triple gradiente;

Una práctica de triple gradiente es sugerida por Hollander (24), como la óptima. El principal objetivo es el aprovechamiento del calor latente de los lingotes. En ésta práctica los gradientes son de 30, 50 y 70% del flujo total, fig.7.



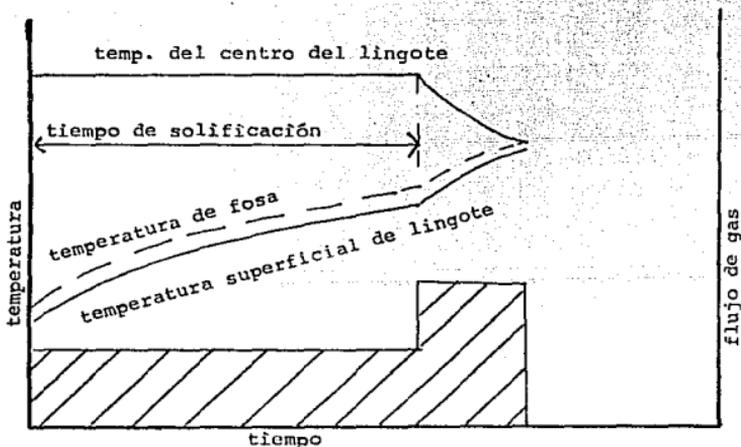
Práctica de calentamiento de triple gradiente.

FIGURA # 7

6.- Práctica de calentamiento tipo L-invertida.

El uso de ésta práctica (fig.8), se resume en los siguientes pasos:

- a.- cargar los lingotes de acero teniendo aún una porción de líquido.
- b.- mantener una temperatura de fosa de 10 a 100 °C mayor que el punto más frío del lingote hasta que se complete totalmente la solidificación.
- c.- después de completar la solidificación del lingote en la fosa, se iniciará el calentamiento con un flujo no menor de 60% del máximo hasta alcanzar la temperatura de empuje fijada.



Práctica de calentamiento tipo L-invertida.

FIGURA # 8

CAPITULO VIII

RECOMENDACIONES.

- 1.- El uso del concepto de carbono equivalente aplicado a la predicción de ciclos de calentamiento (cap.VI, tabla # 3), deberá observarse cuidadosamente a fin de evitar errores operativos, los cuales, afortunadamente no son comunes pero sí excesivamente costosos.
- 2.- Es de vital importancia vigilar estrechamente la instrumentación y el sistema de combustión y, especialmente, la alineación del quemador, a fin de asegurar que la carga siempre sea calentada homogéneamente y evitar los paros o cambios de programa por material frío, los cuales hacen ineficiente el proceso.
- 3.- Es de gran importancia que se implanten las recomendaciones del capítulo VII, tabla 1, a fin de bajar los costos de fabricación y hacer más competitivo el producto.
- 4.- En cuanto a las técnicas de calentamiento citadas en el capítulo VII, se deberán analizar de inmediato a fin de evaluarlas en la práctica y adoptar las más ventajosas.
- 5.- Se recomienda de una manera muy especial que no se hagan modificaciones a las prácticas de calentamiento establecidas, a menos que se cuente con un análisis y evaluación profundos.

6.- Las fosas de recalentamiento son un equipo sumamente costoso para los tiempos y la tecnología actuales, por lo que debe abolirse su uso mediante el cambio del sistema "LINGOTEO-DESBASTE", al sistema de "COLADA CONTINUA", para alcanzar así niveles de competitividad internacional.

CONCLUSION.

Con la elaboración de éste trabajo se cumple parcialmente el objetivo; éste quedará totalmente cubierto si dicho trabajo es utilizado como apoyo para el entrenamiento de supervisores y como guía para la operación de las Fosas de Recalentamiento.

CAPITULO IX

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Harold E., Mc. Gannon. "THE MAKING, SHAPING AND TREATING OF STEEL". 9^a Ed, 1971.
- 2.- General refractories Co. "REFRACTORIES". 1949.
- 3.- Chesters, J.H. "PRODUCTION AND PROPERTIES OF REFRACTORIES". I.S.I. London.1973.
- 4.- Grainger and Wood. J.I.S.I. March, 1960.
- 5.- A.S.M. Metals Handbook. "FURNACES ATMOSPHERES AND CARBON CONTROL". Vol.II, 8^a Ed.
- 6.- A.S.T.M. "TOOL STEELS". 1975.
- 7.- C.A. Stickels. "CALCULATION OF THE EQUILIBRIUM COMPOSITION OF BLENDED GASES FOR HEAT TREATING FURNACES ATMOSPHERES". Journal Heat Treating A.S.M. Vol.I. 1970.
- 8.- B., Borchgrevink. "ATMOSPHERE POSIBILITIES IN ELPIE ELEC-TRIC SOAKING PITS" J.I.S.I. July 1970.
- 9.- Birks and Jackson. "SCALING AND DECARBURIZATION OF STEELS". J.I.S.I. January, 1970.
- 10.- Trinks.. "HORNOS INDUSTRIALES". Vol. II.1976.
- 11.- Jiménez R., Angel. "MERMAS POR OXIDACION EN FOSAS DE RECA-LENTAMIENTO".1983. (REPORTE INTERNO).

- 12.- K.Sachs and C.W.Tuck. "SURFACE OXIDATION OF STEEL IN INDUSTRIAL FURNACES".
- 13.- Nicholson and Moore. "SECTION OF OPTIMUM CONDITIONS FOR HOT ROLLING STAINLES AND CARBON STEELS". I.S.I. London, 1970.
- 14.- Pascual, J. "TRATAMIENTOS TERMICOS". 1970.
- 15.- Dieter, George E. "MECHANICAL METALLURGY". 2^a Ed. Mc. Graw-Hill, 1976.
- 16.- Jorochoilov, V. and Y. Gordon, J. "TRATAMIENTO TERMICO DE LOS ACEROS". Ed. MIR. 1971.
- 17.- Kreith, F. "PRINCIPLES OF HEAT TRANSFER". 1986.
- 18.- Walsh, R.J. and Hibberd, D.F. "PREDICTION OF SOAKING TIME AS FUNCTION OF TRACK TIME FOR THE 2.8 T. INGOT AT CAMPOS HERMANOS S.A.". Brittish Steel Corp. 1981. (REPORTE INTERNO).
- 19.- Brittish Steel Corp. "MANUAL DE CALENTAMIENTO DE LINGOTES". 1981. (REPORTE INTERNO).
- 20.- H. Nashiwa, T. Kudo. "ENERGY SAVING AT THE SOAKING PITS OF WAKAYAMA STEELS WORKS". Sumitomo Metals Ind. L.T.D., Japan. 1983.
- 21.- Villuendas A., Manuel. "DETERMINACION DEL CONSUMO DE GAS EN FOSAS DE RECALENTAMIENTO". 1986. (REPORTE INTERNO).
- 23.- Yooichi, T., Kazuo, T. and Yukio, Haga. "REDUCING FUEL CONSUMPTION IN SOAKING PITS INVERTED-L. TYPE HEATING PRACTICE". Transactions of I.S.I. Japan. 1979.
- 24.- Hollander, Frans. "REHEATING PROCESSES AND MODIFICATION TO ROLLING MILL OPERATIONS FOR ENERGY SAVINGS". Iron and Steel Engineer. June, 1983.

- 25.- Wanke, K. and Schram, K. "EL TEMPLE DEL ACERO". ED. Aguilar 1972.
- 26.- Lajtín, Y. "METALOGRAFIA Y TRATAMIENTOS TERMICOS". Ed. MIR. 1983.
- 27.- Aprais, J. "ACEROS ESPECIALES"1982.
- 28.- Pascual, J. "TECNICA Y PRACTICA. TRATAMIENTO TERMICO DE LOS METALES FERREOS". 1970.
- 29.- V.A.Koroleva. "RESEARCH INTO CONDITIONS UNDER WHICH ALUMI--NIUM NITRIDES ARE FORMED IN TRANSFORMER STEEL WHEN IT IS - HEATED". Sthal. 1966.
- 30.- Villuendas A., Manuel. "GRIETAS EN BILLET DE ACERO CALIDAD 1035 AISI CARGADO EN CALIENTE A FOSAS". 1986.
- 31.- Villuendas A.,Manuel. "REPORTE SOBRE EL EFECTO DEL DESGA--SIFICADO, TITANIO Y TIPO DE CARGA EN LOS RECHAZOS POR GRIE--TAS ". 1988.

ANEXO I'

LA ATMOSFERA DEL HORNO Y LAS REACCIONES INVOLUCRADAS.

Tomando como base los trabajos de Stickels (7) y Borchgre--vink (8), se planteó un modelo de la atmosfera que se obtiene en la fosa de recalentamiento durante la operación:

CONSIDERACIONES:

a.- la composición del aire suministrado es

$$79.2\% \text{ N}_2$$

$$20.8\% \text{ O}_2$$

b.- la relación aire-gas (A/G), se define como la relación en volúmen o molar de las cantidades involucradas en la reacción de combustión.

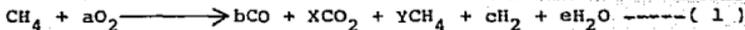
Plantaremos dos ecuaciones para dos casos distintos:

CASO 1.- relación A/G menor o igual a la estequiométrica.

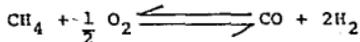
CASO 2.- relación A/G mayor a la estequiométrica.

CASO 1.- En éste la relación molar $A/G \leq 9.615$.

Reacción fundamental para un mol de gas:



La cantidad mínima de O_2 es 1/2 mol. con lo que tendríamos:



por lo que el coeficiente a lo definiremos como:

$$a = (0.5 + d), \text{ donde } d \text{ es oxígeno excedente.}$$

BALANCE

oxígeno	aire	}	$A = \frac{C(0.5 + d)}{0.208}$
$(0.5 + dL$	A		
20.8%	100%		

A será la cantidad de aire del sistema, donde $A = f(d)$.

Los coeficientes restantes se definirán de la siguiente manera:

X es la cantidad de CO_2

Y es la cantidad de CH_4

Para los compuestos restantes se realiza un balance de masa, obteniéndose las siguientes ecuaciones por elemento:

CARBONO: $1 = b + X + Y$

HIDROGENO: $4 = 4Y + 2c + 2e$

OXIGENO: $2(0.5 + d) = b + 2X + e$

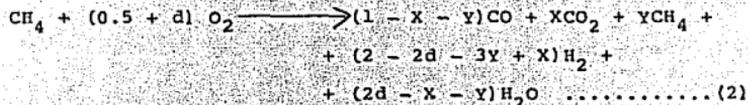
Resolviendo el sistema tenemos que:

$$b = 1 - X - Y$$

$$c = 2 - 2d - 3Y + X$$

$$e = 2d - X + Y$$

Sustituyendo en la ec. (1),



Balace de nitrógeno.

$(0.5 + d)$	20.8%	}	$x = (0.5 + d) \left(\frac{79.2}{20.8} \right)$ moles N_2
x	79.2%		

El volumen total de los productos (V) es:

$$V = (1 - X - Y) + X + Y + (2 - 2d - 3Y - X) + (2d - X - Y) + x$$

sustituyendo y simplificando,

$$y = 3 + 2x + \left[-0,5 + dL \left(\frac{79,2}{20,8} \right) \right] \dots \dots \dots (3)$$

Las cantidades de los compuestos resultantes están regidas por las siguientes ecuaciones de equilibrio:



$$K_1 = \frac{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}}{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad \Delta G = -8,600 + 7,65 T$$



$$K_2 = \frac{P_{\text{CH}_4} \cdot P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}^2 \cdot P_{\text{H}_2}^2}; \quad \Delta G = -57,320 - 57,72 T + (12,25 T) (\log T)$$

de acuerdo con las ecuaciones (2) y (3) tenemos que:

$$P_{\text{CO}} = \frac{1 - x - y}{v}; \quad P_{\text{CO}_2} = \frac{x}{v}; \quad P_{\text{CH}_4} = \frac{y}{v}$$

$$P_{\text{H}_2} = \frac{2 - 2d + x - 3y}{v}; \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2d + y - x}{v}$$

Para una presión total de 1 atmósfera los valores de x y y se encuentran sustituyendo éstos en las constantes de equilibrio (4) y (5).

$$K_1 = \frac{x (2 - 2d + x - 3y)}{(1 - x - y) (2d + y - x)} \dots \dots \dots (6)$$

Resolviendo para x según la fórmula general para la ecuación cuadrática pura,

$$x = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots \dots \dots (7)$$

Dónde si $X = 0$, entonces:

$$A = K_1 - 1$$

$$B = -K_1 (1 + 2d) - 2 + 2d + 3y$$

$$C = K_1 (2d + y) (1 - y)$$

$$K_2 = \frac{xy^2}{(1 - x - y)^2 (2 - 2d + x - 3y)^2}$$

$$\left[(1 - x - y)^2 (2 - 2d + x - 3y)^2 \right] K_2 - xy^2 = 0 \dots\dots\dots (8)$$

La solución del sistema se encuentra de la siguiente manera:

- 1.- Definir la temperatura de trabajo.
- 2.- Definir los valores de K_1 , K_2 , y d .
- 3.- Suponer un valor para y .
- 4.- Calcular x con la ecuación (7).
- 5.- Sustituir en (8).
- 6.- Si satisface (8), entonces x y y son soluciones y se calcularán los coeficientes restantes.

CASO 2.- En éste la relación molar es $A/G > 9.615$.

La reacción fundamental es:



La cantidad mínima de O_2 en éste caso sería:

$a = 1 + d$, de acuerdo con la ecuación (10).



Balance:

CARBONO: $1 = X + B$; $B = 1 - X$

HIDROGENO: $4 = 2A + 2D$; $D = 2 - A$

OXIGENO: $2a = 2X + A + 2Y + B$; despejando,

$2a = 2X + A + 2Y + 1 + X$, como $D = 2 + A$, entonces:
 $D = 2 + 2a + X + 2Y + 1$; $D = 3 + 2a + X + 2Y$;
 o bien, $A = 2a + X + 2Y - 1$.

NITROGENO: La cantidad de nitrógeno (N) será:

$$\left. \begin{array}{l} 20.8\% \dots\dots\dots 79.2\% \\ a \dots\dots\dots N \end{array} \right\} N = \left(\frac{79.2}{20.8} \right) a$$

Las ecuaciones de equilibrio asociadas son:



$$\Delta G = 8,600 - 7.65 T$$



$$\Delta G = -67,500 + 20.75 T$$

De acuerdo con la ec. (12), si $T = 600$ °C; entonces, $K = 1.9 \times 10^{12}$, lo que significa que la reacción tiende fuertemente a la derecha y se tienen trazas de CO y O₂.

Para analizar la presencia del hidrógeno en la ec. (9), haremos uso de la ecuación



$$\Delta G = -58,900 + 13.1 T$$

Para $\Delta G = 0$, $T = 4223$ °C; por abajo de ésta temperatura - la fase estable es H₂O, por lo que cualquier cantidad de H₂ presente, sería inmediatamente transformada a H₂O.

Según éste razonamiento podemos suponer que CO y H₂, o B y

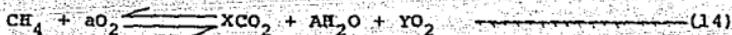
$D = 0$, en la ec. (9), por lo tanto:

$$B = 1 - X = 0, \quad X = 1 \quad D = 2 - A = 0, \quad A = 2$$

$$A = 2a - X - 2Y = 1, \quad 2 = 2a - 2 - 2Y$$

$$2Y = 2a - 4; \text{ como } a = 1 + d, \text{ entonces } Y = d - 1.$$

Lo que significa que la ec. (9) se reduce a:



El volumen total de productos, incluido N_2 , sería (V_T):

$$V_T = X + A + Y + a \left(\frac{79.2}{20.8} \right)$$

Utilizando las ecuaciones y sustituyendo, tendríamos que:

$$a = 1 + d, \quad Y = d - 1, \quad A = 3 - X$$

$$V_T = X + (3 - X) + (d - 1) + (1 + d) (3.808)$$

$$V_T = 2 + 3.808 + d + 3.808d$$

$$V_T = 5.808 + 4.808 \cdot d$$

Para calcular las presiones parciales de los productos utilizaremos las siguientes ecuaciones:

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{X}{V_T}, \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{A}{V_T}, \quad P_{\text{O}_2} = \frac{Y}{V_T}, \quad P_{\text{N}_2} = \frac{3.808 \cdot a}{V_T}$$

Dado que $X = 1$ y $Y = d - 1$, para $a = 1$, entonces:

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{1}{V_T}; \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{V_T}; \quad P_{\text{O}_2} = \frac{Y}{V_T}; \quad P_{\text{N}_2} = \frac{3.808 \cdot a}{V_T}$$