



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

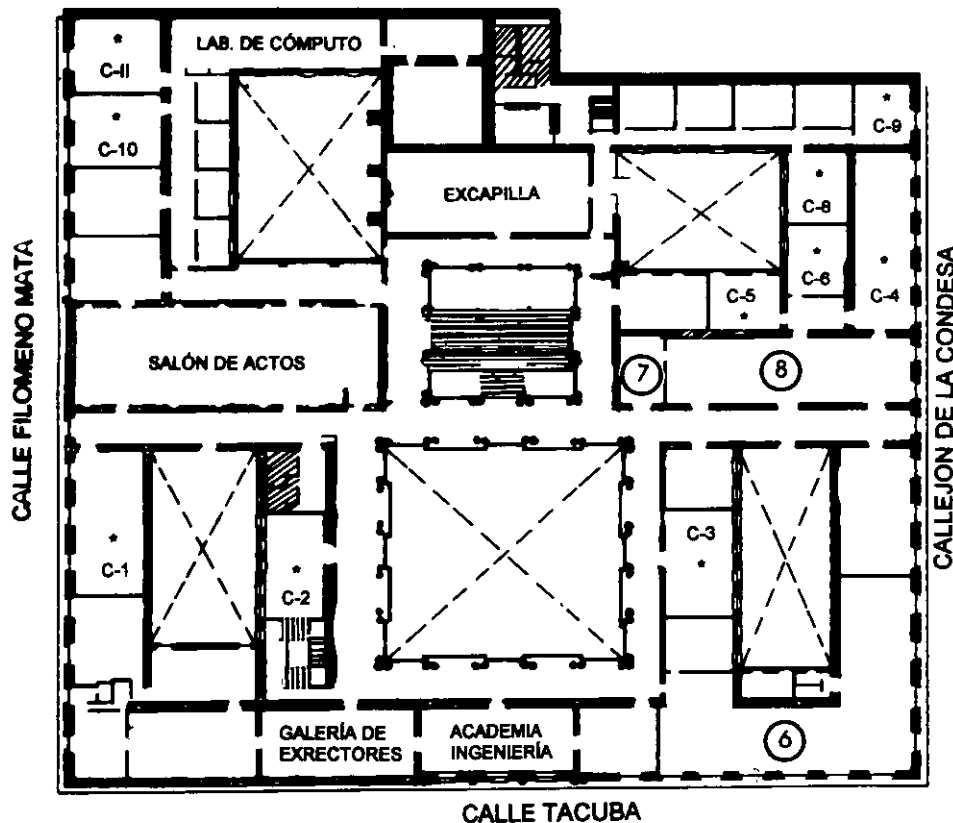
Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

**Atentamente
División de Educación Continua.**

PALACIO DE MINERÍA



1er. PISO

GUÍA DE LOCALIZACIÓN

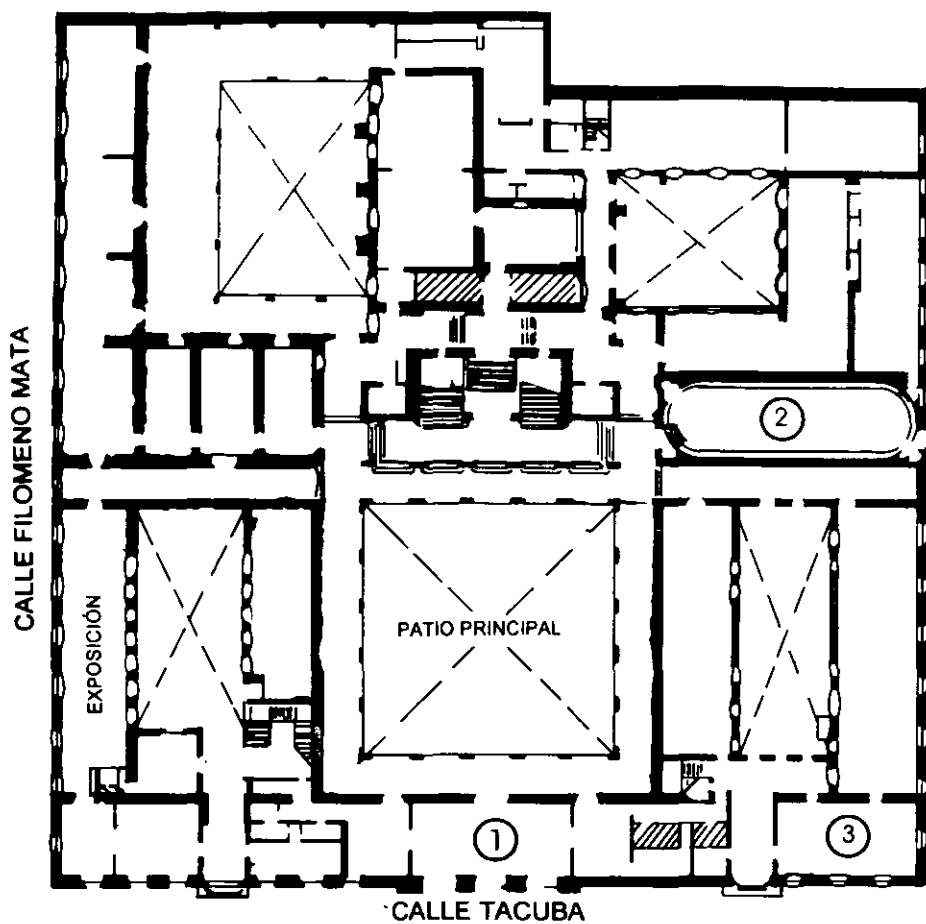
1. ACCESO
 2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
 3. LIBRERÍA UNAM
 4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
 5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
 6. OFICINAS GENERALES
 7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
 8. SALA DE DESCANSO
- SANITARIOS
- * AULAS



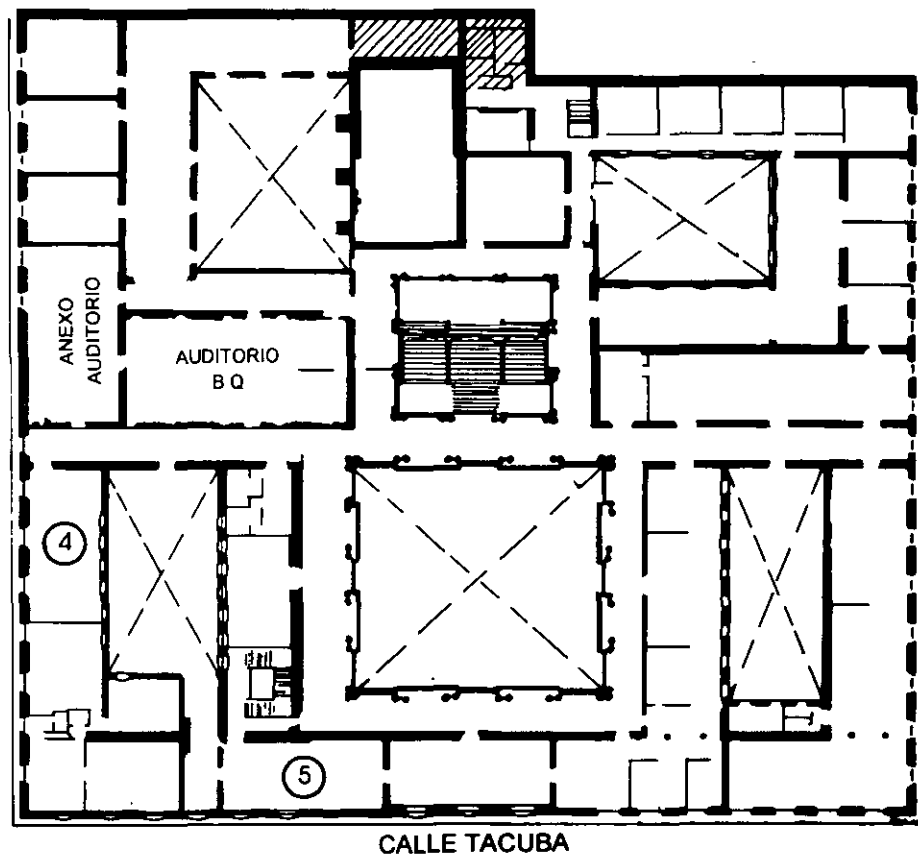
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS



PALACIO DE MINERIA

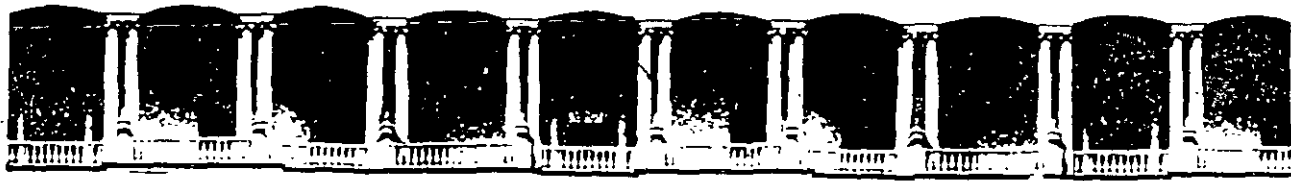


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

CA 121
89



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

- I. PRINCIPIOS DE TECNOLOGÍA DE METALES FERROSOS.
- II. RECOMENDACIONES GENERALES DE MANTENIMIENTO A CALDERAS.
- III. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO.
- IV. FALLAS Y CAUSAS DE FALLAS.

**ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

I. PRINCIPIOS DE TECNOLOGIA DE METALES FERROSOS

1. INTRODUCCIÓN.- OBTENCION DEL HIERRO Y DEL ACERO

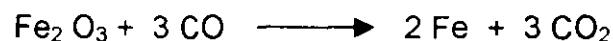
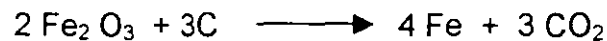
En la arquitectura (hardware) de los componentes, equipos, estructuras y sistemas de las plantas industriales se utilizan muchos tipos de materiales, pero los empleados mayormente y que tienen mas importancia son los metales y sus aleaciones.

Los metales son un grupo de materiales que presentan características generales de buena ductilidad, resistencia mecánica y conductividad eléctrica y térmica, los otros tipos o grupos de materiales son: cerámicos, polímeros y compuestos o semiconductores. En la Fig. I-1, se muestran algunas diferencias importantes entre estos tipos de materiales. Los metales y sus aleaciones se dividen en dos grandes categorías:

- Ferrosos
- No-Ferrosos

Los metales ferrosos y sus aleaciones están basados en el hierro como el constituyente principal e incluyen aceros, aleaciones de acero y diversas clases de hierro fundido. Los principales materiales (el acero y el hierro colado), son aleaciones de hierro con carbono; para obtener otras propiedades en el hierro y el acero, se añaden otros elementos de aleación. El hierro ocupa el 4º lugar en abundancia en la corteza terrestre, después del Oxígeno, el Silicio y el Aluminio.

El hierro (Fe), es un metal de color blanco plateado que por lo general se obtiene a partir del mineral de hierro (óxido de hierro, Fe₂ O₃) mediante una reducción reaccionando con el Carbono (coque, C), de acuerdo con la siguiente reacción.



Este proceso se realiza mayormente en las instalaciones conocidas como altos hornos, que se muestran en la Fig. I-2.

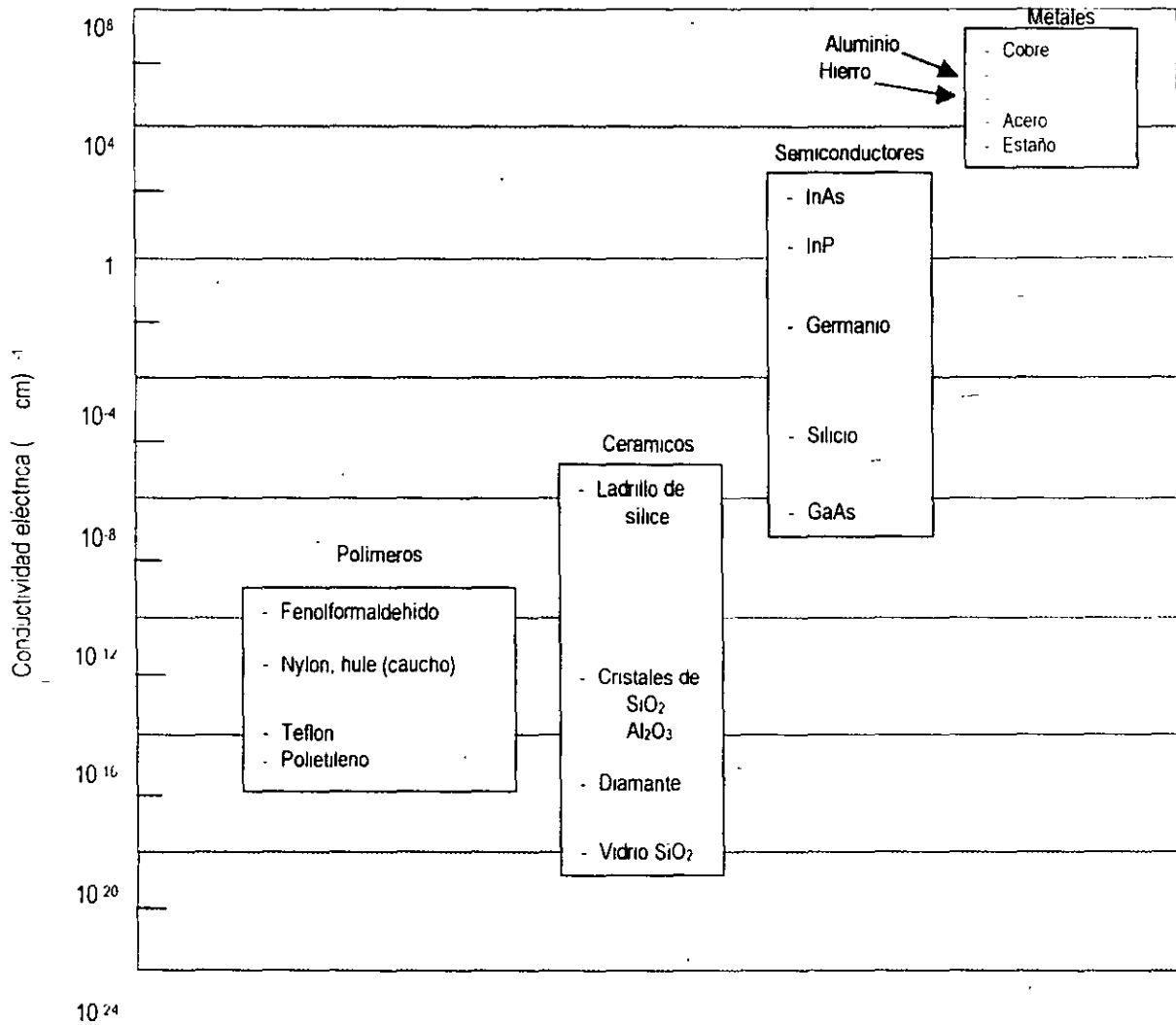


FIGURA I-1.- SE OBSERVAN DIFERENCIAS EXTREMADAMENTE GRANDES EN CUANTO A CONDUCTIVIDAD ELECTRICA ENTRE LAS DIFERENTES CATEGORIAS DE MATERIALES.

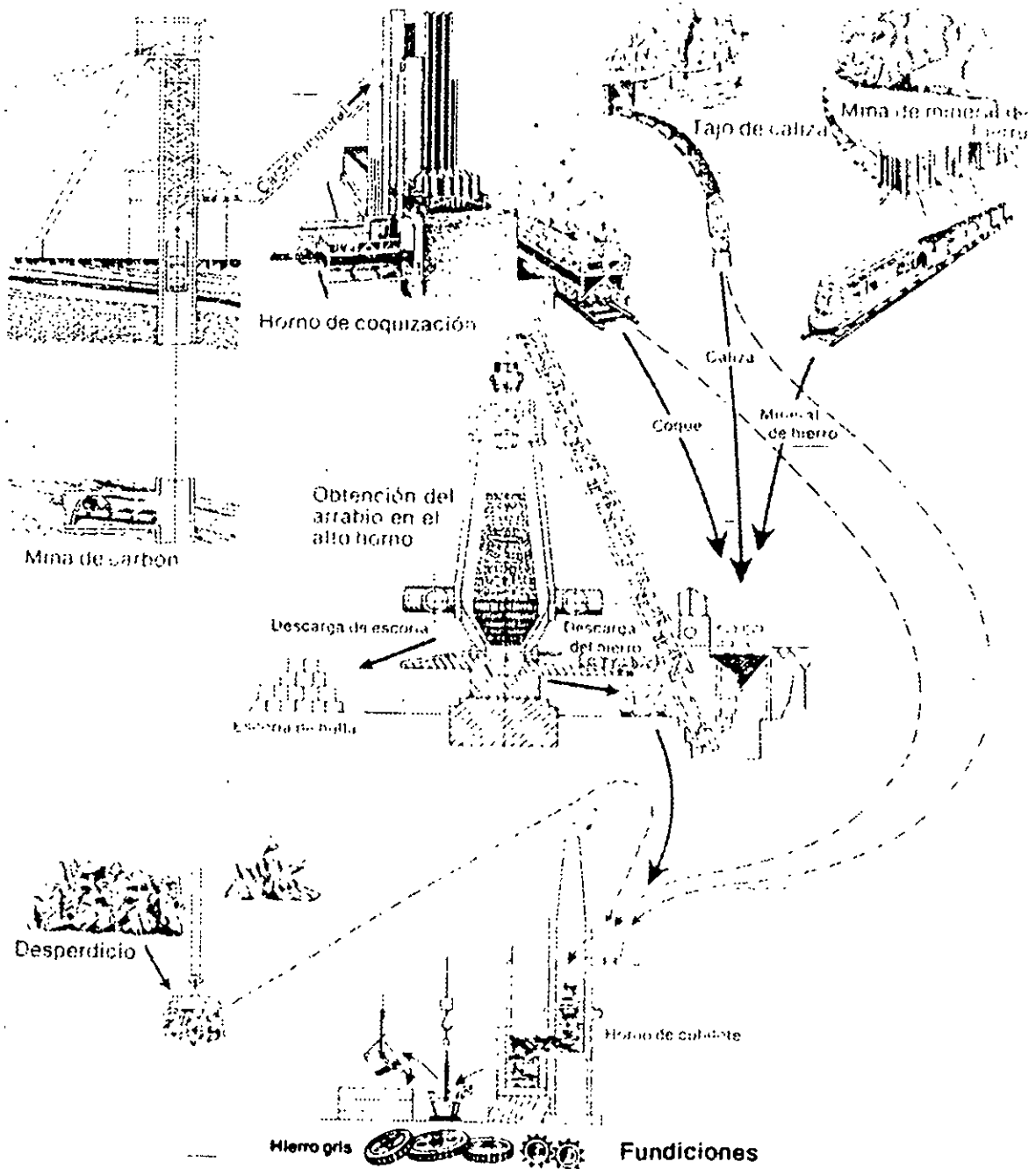


FIGURA 2.-PROCESO DE FABRICACIÓN DEL ACERO

El papel del carbón en el acero

El acero es, básicamente, una aleación de hierro y de carbono. El contenido del carbono en el acero es relativamente bajo. El porcentaje de masa de carbono en el acero es casi siempre menos del 2%. La forma convencional de expresar el contenido de los elementos en las aleaciones es por el porcentaje de la masa total con que cada uno contribuye.

El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0.5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0.1%. Además, como puede apreciarse en la Figura I-3, si el contenido de carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0.1%.

El carbono, sin embargo, generalmente reduce la ductilidad del acero. La ductilidad es una medida de la capacidad de un material para deformarse, en forma permanente, sin llegar a la ruptura.

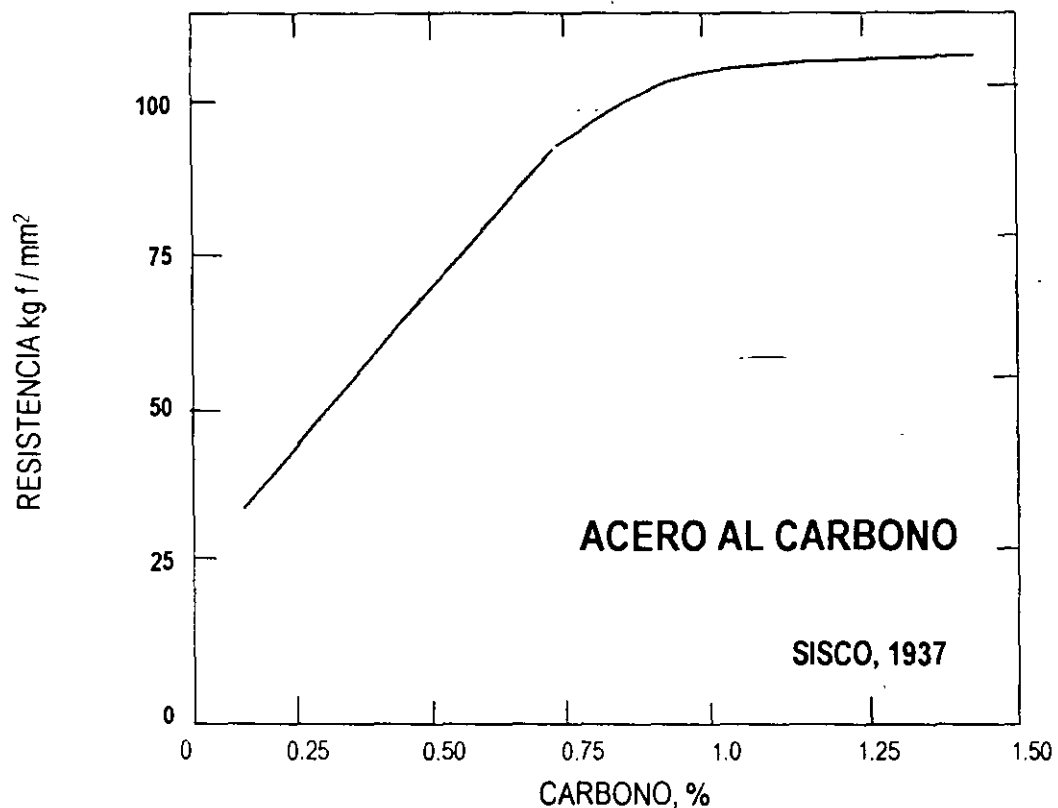


FIG. I-3.- EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO EN LA RESISTENCIA DE LOS ACEROS

Un acero de 0.1% de carbono es más de cuatro veces más dúctil que otro con 1% de carbono y dos veces más que un tercero con 0.5% de carbono, como se indica en la Fig. I-4. En esta gráfica, a la ductilidad se le expresa como un porcentaje. Este se determina estirando una barra de acero hasta llevarla a la fractura para después calcular el incremento porcentual de su longitud

Por su contenido de carbono, los aceros se clasifican como de bajo, medio y alto carbono. Las fronteras que separan a estos tipos de acero no están claramente definidas, aunque se entiende que los aceros de bajo carbono tienen menos del 0.25% de carbono en su aleación. Ellos son fácilmente deformables, cortables, maquinables, soldables; en una palabra, son muy "trabajables". Por eso, con estos aceros los herreros hacen puertas y ventanas. Además, con ellos se fabrican las mejores varillas para refuerzo de concreto, las estructuras de edificios y puentes, la carrocería de los automóviles y las corazas de los barcos.

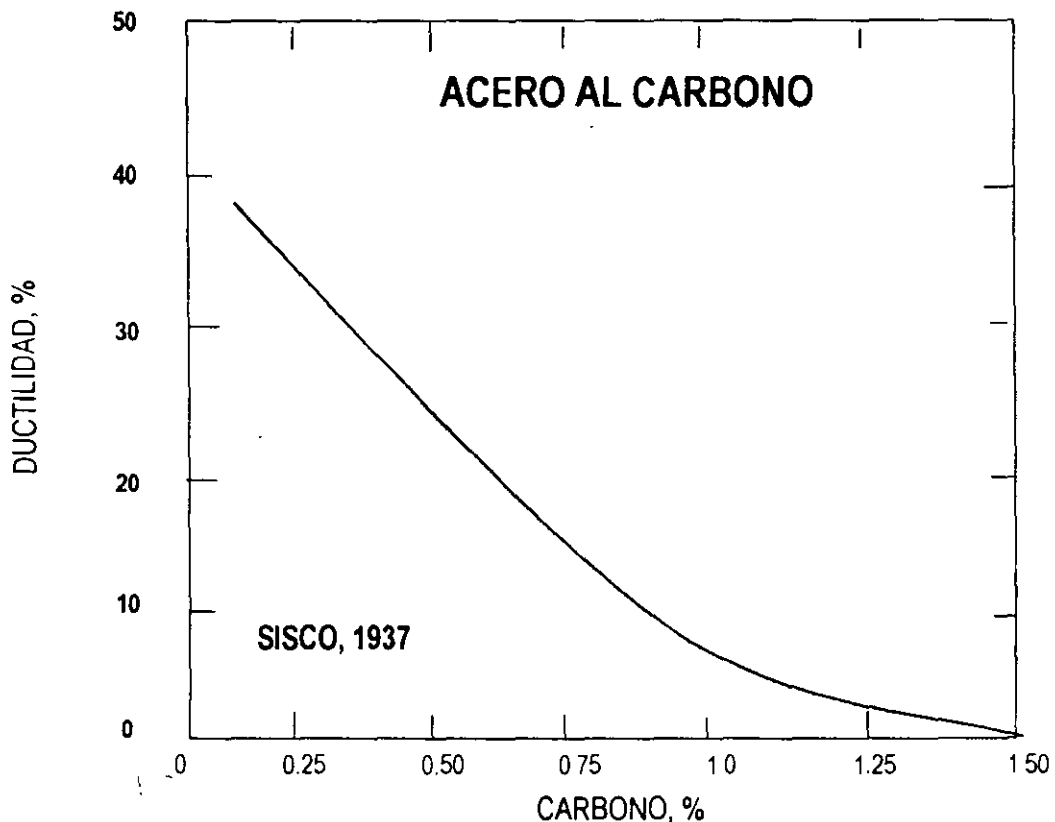


FIG. I-4.- EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO EN LA DUCTIBILIDAD DE LOS ACEROS COMUNES. EN 1938 SISCO PUBLICO ESTA GRAFICA Y SE HA REPRODUCIDO EN MUCHOS LIBROS DE TEXTO TODAVIA VIGENTES.

Los aceros de medio carbono, entre 0.25% y 0.6%, se emplean cuando se requiere mayor resistencia; pues siguen manteniendo un buen comportamiento dúctil aunque su soldadura ya requiere cuidados especiales. Con estos aceros se hacen piezas para maquinarias como ejes y engranes.

Los aceros de alto carbono, entre 0.6% y 1.2%, son de muy alta resistencia, pero su fragilidad ya es notoria y son difíciles de soldar. Muchas herramientas son de acero de alto carbono: picos, palas, hachas, martillos, cinceles, sierras, etc. Los rieles de ferrocarril también se fabrican con aceros de este tipo.

Los minerales de hierro contienen del 60 al 70% de hierro, y el resto se compone de oxígeno, arena, arcilla y piedras que a su vez contienen sílice como óxido de silicio. Se necesita quitar al sílice para evitar que una parte del hierro se desperdicie formando compuestos con dicha sustancia. Esto se logra agregando piedra caliza que a altas temperaturas tiene la propiedad de ser muy a fin con el sílice y otras impurezas que vienen con el mineral y forman compuestos que flotan como escoria en el arrabio líquido.

El proceso para obtener acero puede dividirse en dos grandes pasos:

- Transformar el mineral de hierro de las minas en arrabio.
- Convertir el arrabio en acero.

El primer paso para lograr la transformación masiva del arrabio en acero lo dio el inglés Henry Bessemer en 1856. La idea de Bessemer era simple: eliminar las impurezas del arrabio líquido y reducir su contenido de carbono mediante la inyección de aire en un "convertidor" de arrabio en acero. Se trata de una especie de crisol, como el que se muestra en la Figura I-5, donde se inyecta aire soplado desde la parte inferior, que a su paso a través del arrabio líquido logra la oxidación del carbono. Así, el contenido de carbono se reduce del 4 o 5% a alrededor de un 0.5%. Además, el oxígeno reacciona con las impurezas del arrabio produciendo escoria que sube y flota en la superficie del acero líquido. Como la combinación del oxígeno con el carbono del arrabio es una combustión que genera calor, Bessemer acertadamente sostenía que su proceso estaba exento de costos por energía.

Los actuales convertidores de arrabio en acero ya no son como los de Bessemer y sus contemporáneos. Conocidos generalmente por sus iniciales en inglés, los convertidores BOF (*basic oxygen furnace*) logran la refinación del arrabio empleando la misma idea de Bessemer para eliminar las impurezas y el exceso de carbono por oxidación, además de aprovechar el calor de la oxidación como fuente de energía para la fusión. En lugar del sople de aire que utilizaba Bessemer, en los BOF la oxidación se hace directamente con oxígeno. Esta idea también la tuvo Bessemer porque el aire contiene solamente un 21% de oxígeno contra un 78% de nitrógeno. Lo que pasó fue que en los tiempos de Bessemer el oxígeno puro era muy caro, de modo que no era accesible ni para hacer experimentos en el laboratorio. Cien años después la situación era otra, porque se

desarrollaron métodos baratos para producir oxígeno y en la escala necesaria para abastecer a las grandes siderúrgicas.

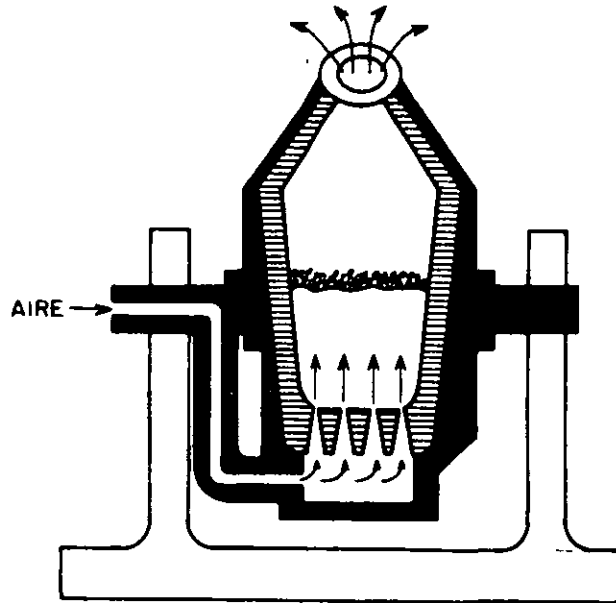


FIGURA. I-5.- CONVERTIDOR DE ARRABIO EN ACERO INVENTADO POR HENRY BESSEMER. UN FLUJO DE AIRE SE INYECTA POR LA PARTE INFERIOR DEL HORNO PARA QUE ELIMINE GRAN PARTE DEL CARBONO Y OTRAS IMPUREZAS DEL ARRABIO POR OXIDACIÓN. ESTE DISEÑO FRACASO INICIALMENTE PORQUE EL REFRACTARIO QUE CUBRÍA LAS PAREDES DEL HORNO ERA DE TIPO "ACIDO".

Un esquema del convertidor BOF se presenta en la Fig I-6. Consiste en una olla de acero recubierta en su interior con material refractario del tipo básico, óxido de magnesio o algo así. A diferencia del convertidor de Bessemer (Fig. I-5) donde se soplaba el aire por la parte inferior, en el BOF se inyecta el oxígeno por una lanza que entra por la parte superior. La lanza se enfría con serpentines de agua interiores para evitar que se funda. La carga y la descarga de la olla se hacen también por la parte superior y por eso la olla está montada en chumaceras que le permiten girar.

Durante muchos años los metalurgistas han cuestionado la forma indirecta de obtener el acero produciendo primero el arrabio en los altos hornos. ¿Por qué no sacar directamente el oxígeno del mineral de hierro y obtener el hierro esponja como en la antigüedad?

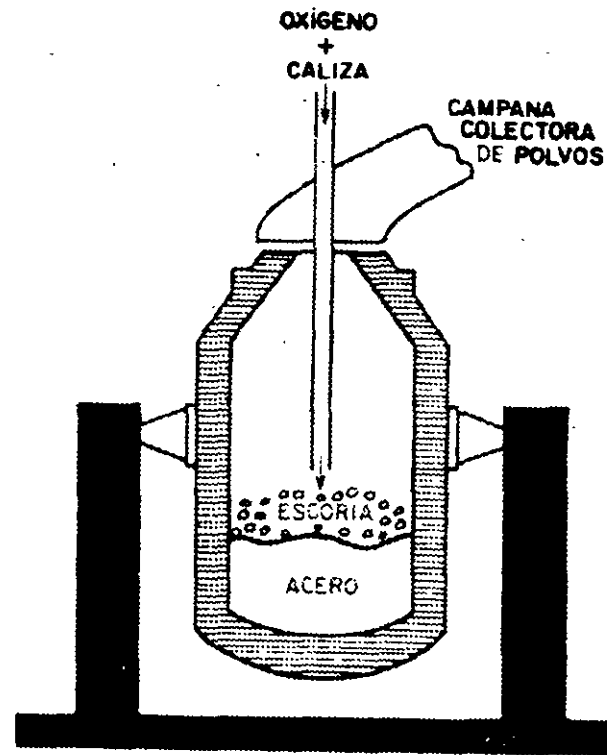


FIGURA. I-6.- MEDIANTE UN CHORRO DE OXIGENO CON POLVO DE PIEDRA CALIZA EL ARRABIO ES CONVERTIDO EN ACERO EN UN BOF. EL OXIGENO REACCIONA CON EL CARBONO DEL ARRABIO Y LO ELIMINA EN FORMA DE BIOXIDO (O MONOXIDO) DE CARBONO. LA CALIZA SIRVE PARA ELIMINAR IMPUREZAS, ENTRE LAS QUE DESTACA EL FOSFORO.

En el siglo pasado se propusieron y patentaron muchos métodos para reducir (desoxidar) a los minerales de hierro directamente en el estado sólido. Se sugería el uso de mezclas de gases de hidrógeno, monóxido de carbono o hidrocarburos, por su alto poder desoxidante. Varios de esos métodos eran técnicamente muy razonables pero ninguno de ellos fue capaz de competir económicamente con el alto horno. En los años cincuenta de este siglo resurgió el interés en muchos países por el desarrollo de tecnologías para producir hierro esponja. Un gran impulso salió de México, donde la compañía HYLSA fue pionera de un proceso de reducción directa muy revolucionario. En 1957 HYLSA abrió su primera planta en Monterrey. Veinte años después el proceso HYL se había extendido por todo el mundo y se habían construido plantas en Venezuela, Brasil, Zambia, Irak, Irán e Indonesia, aparte de las seis plantas en México, con capacidad superior a diez millones de toneladas anuales.

El proceso HYL utiliza una mezcla de gases rica en hidrógeno y monóxido de carbono para extraer el oxígeno del mineral de hierro. La mezcla de gases se produce a partir de gas natural y vapor de agua en un dispositivo llamado reformador.

Selección de Materiales

Debe hacerse de acuerdo a recomendaciones de los Códigos aplicables, dimensiones estándar y especificaciones establecidas de materiales. También deben tomarse en consideración los requerimientos de servicio y considerar los efectos de las condiciones como corrosión, incrustación, fatiga térmica o mecánica, fluencia, tenacidad de ranuras e inestabilidad metalúrgica a altas temperaturas

2. PROPIEDADES DE MATERIALES

La aplicación de materiales en las diferentes industrias esta basada por lo general en idénticas o muy similares consideraciones de diseño. Se emplean materiales de las mismas propiedades mecánicas y físicas, composición química y estructura metalúrgica.

Las operaciones de fabricación como doblado, soldado y tratamiento térmico, involucran procedimientos idénticos que dependen de la calidad final deseada y no de su aplicación.

La inspección por radiografías, ultrasonido u otras técnicas, no se diferencian por ejemplo, entre la aplicación nuclear y las plantas de potencia.

2.1 Propiedades Mecánicas

Las propiedades físicas incluyen específicas y bien establecidas propiedades mecánicas como por ejemplo:

- Resistencia a la tensión
- Resistencia a la fluencia o cedencia
- Alargamiento

Por lo general estas propiedades están bien cubiertas en las especificaciones aplicables de materiales, sin embargo, existen otras propiedades mecánicas que pueden ser de interés y que pueden dar una importante orientación en la selección de materiales, trabajabilidad del material, soldabilidad y comportamiento en el servicio.

Los metales pueden romperse, doblarse, torcerse, marcarse con indentaciones, rayarse y dañarse en otras formas. Algunos metales pueden rayarse con la uña, mientras que otros soportan horas de golpeo contra una roca sólida. Con propiedades tan variables, se vuelve un problema expresar exactamente en unas cuantas palabras que tipo de servicio puede soportar una pieza de metal sin fallar; a continuación se describen algunas de las propiedades mecánicas de los metales.

Resistencia de los Metales

Resistencia, o resistencia mecánica, es la capacidad de un metal para oponerse a su destrucción bajo la acción de cargas externas; el valor de la resistencia indica la fuerza que se requiere para vencer los ligamentos que mantienen unidas las moléculas que forman las estructuras de los cristales. Dos de éstas cargas (tensión y compresión) se determinan por medio de una máquina universal de pruebas, es decir, una máquina capaz de producir tanto fuerzas de tensión como fuerzas de compresión, la probeta normal de uso mas frecuente para pruebas de tensión es una barra redonda.

Elasticidad

La mayoría de los metales no se rompen en forma repentina, a medida que se aplica gradualmente la carga en una máquina para pruebas de tensión, se ve que la probeta se estira durante algún tiempo. Luego se produce la formación de un cuello o "estricción" en algún punto, y por último, al aumentar la carga se rompe. El estiramiento que se observa en una prueba de esta naturaleza no es uniforme, al principio es un estiramiento elástico, y mas tarde un estiramiento permanente.

Si se toma un trozo de caucho y se estira, regresa a su tamaño original tan pronto se le suelta; si se estira con mas fuerza, saltará, sin embargo, sea cual fuere la fuerza que la estire, tuerza o aplaste, mientras no se rompa, regresará a su tamaño original al suprimir la fuerza.

Hasta cierto punto, los metales se comportan como el caucho: son elásticos. Se estiran, se doblan, o se tuercen bajo la acción de una fuerza, y regresan a su tamaño original cuando se suprime la fuerza, en la misma forma, pero no en el grado que lo hace un trozo de caucho.

Cuando el caucho llega al término de su elasticidad, se rompe, pero la mayoría de los metales no se rompen al llegar a su límite elástico, sino que siguen estirándose por algún tiempo antes de romperse. Pasando el límite elástico, los metales se comportan como un chicloso, cambian de forma con la fuerza, sin embargo, cuando se suprime la fuerza, no se regresan a la forma original sino que quedan deformados permanentemente.

Cuando actúa una fuerza sobre una parte metálica, tirando de ella, torciéndola, doblándola o aplastándola (comprimiéndola), la pieza cambia de forma elásticamente durante un tiempo, o hasta que la fuerza llegue al límite elástico del metal, momento en que lo deforma permanentemente. El límite elástico es, por lo tanto el punto en que comienza la deformación permanente; en las aplicaciones industriales, se determina aproximadamente este punto, y se expresa como el punto de fluencia o como resistencia a la fluencia del metal.

Ductilidad

Un material dúctil es aquel que puede deformarse permanentemente sin romperse o sin fallar; es frecuente que el término ductilidad se use incorrectamente. El hecho de que un metal se doble con facilidad no significa necesariamente que sea dúctil, a menos que tal doblez represente una deformación permanente, por ejemplo, un resorte puede ser flexible y doblarse fácilmente, y sin embargo, sólo puede soportar una pequeña deformación permanente sin romperse. Se dice que tal resorte tiene baja ductilidad; como se mencionó, el caucho es elástico, pero los chiclosos y el chicle son dúctiles. Todos los metales son a la vez elásticos y dúctiles en cierto grado. Existen en uso común cuatro métodos para medir la ductilidad:

- En uno de éstos, la ductilidad puede expresarse como la magnitud de estiramiento permanente (en una distancia de 2 pulg) que soporta una parte en una prueba de tensión
- El segundo método para medir la ductilidad utiliza la diferencia entre el área original de la sección transversal y el área mas pequeña en el punto de ruptura en una prueba de tensión; la ductilidad se expresa como un porcentaje de la sección transversal original (la diferencia entre las dos áreas se divide entre el área original).
- El tercer método emplea una prueba de doblez libre para una determinación comparable.
- Al cuarto método se le llama prueba guiada de doblez.

Fragilidad

La fragilidad es la propiedad contraria a la ductilidad. Los materiales frágiles son sustancias que fallan sin deformación permanente apreciable. Una sustancia frágil tiene también baja resistencia al choque o al impacto, es decir, a la aplicación rápida de fuerzas; un ejemplo de metal frágil es la función blanca ordinaria de hierro.

Tenacidad

Tenacidad es la propiedad de un metal que le permite soportar esfuerzo considerable, aplicado lenta o súbitamente, en forma continúa o intermitente, y deformarse antes de fallar. La prueba que se usa con mas frecuencia para determinar la tenacidad de los metales es la prueba de impacto. En ésta prueba se corta una probeta rectangular y se le hace una ranura en la parte que se va a probar. La resistencia al impacto se mide en kg-m; se coloca la probeta en la máquina y el operador suelta un péndulo pesado que oscila desde una altura estándar para golpear la probeta

La resistencia de la probeta se determina por la cantidad de energía necesaria para romperla o doblarla. La distancia de la oscilación del péndulo después de haber roto la probeta indica la cantidad de energía que se gastó en romperla, si no hay probeta en esta máquina, el péndulo oscila hasta a la lectura cero de la escala. Cuando más tenaz es el metal de la probeta que se rompe por el golpe, más corta es la distancia que recorre el péndulo pasando el punto de impacto; cuando más corta es esta distancia, mayor es la lectura de la escala.

Dureza

La palabra dureza significa cosas diferentes para distintas personas. El metalurgista piensa en la dureza como la capacidad de un material para resistir la indentación o la penetración. El mineralogista piensa en la dureza como la capacidad de un material para resistir la abrasión o la rayadura. Un aparatista de taller, considera la dureza como un índice de maquinabilidad.

Desde el punto de vista metalúrgico, la razón principal para hacer una prueba de dureza es que suministra información sobre otras propiedades, por ejemplo la resistencia a la tensión de un material está relacionada directamente con la dureza (Tabla I-1).

Las pruebas de dureza se hacen a un costo muy bajo y no son destructivas, una prueba de dureza puede sustituir a la más difícil y destructiva prueba de tensión.

En general, de dos metales de composición similar, el de mayor dureza tiene mayor resistencia a la tensión, menor ductilidad, y mayor resistencia al impacto y al desgaste abrasivo.

La dureza elevada indica también una baja resistencia al impacto, aunque algunos aceros que han recibido un tratamiento térmico correcto tienen tanto una alta dureza como una buena resistencia al impacto. Las pruebas de dureza se usan mucho para verificar la uniformidad del material de las partes metálicas durante la producción; cualquier falta de uniformidad es revelada rápidamente por su excesiva dureza o por su excesiva blandura.

La prueba Brinell es el método comercial más antiguo para determinar la dureza por indentación; en esta prueba se presiona una esfera de acero de 10 mm de diámetro sobre la superficie del metal, aplicando una fuerza de 3,000 kg. A continuación se mide el diámetro de la impresión usando un microscopio especial, y se convierte la lectura en el número de dureza Brinell; consultando una tabla. El hierro dulce tiene una dureza Brinell de aproximadamente 100, y el acero duro para limas de aproximadamente 600.

La dureza es una propiedad con la que debe estar familiarizado perfectamente el soldador, el calor de la soldadura puede cambiar la dureza de los metales que estén soldando y el resultado final puede ser una diferencia de dureza entre el metal de soldadura depositado y el metal de base. Una diferencia en la dureza

indica por lo general una diferencia en la resistencia o en alguna otra propiedad o propiedades. Mediante el estudio de la metalurgia de la soldadura, puede aprenderse más sobre las causas de la dureza y la forma de controlarla. En muchos casos, no acompaña al proceso de soldadura ningún cambio ni diferencia en la dureza, en cuyas situación no hay motivo de preocupación en cuanto al control de dureza.

Otras propiedades mecánicas de interés que proporcionan orientación importante en la selección de materiales, trabajabilidad de material, soldabilidad y comportamiento en el servicio, son:

- Módulo de elasticidad
- Resistencia a la fluencia
- Resistencia a alta temperatura
- Coeficiente de expansión
- Otros.

Las propiedades mecánicas (o físicas como a veces se les llama) de materiales, son aquellas propiedades que están asociadas con las reacciones elásticas e inelásticas cuando se les aplica una fuerza, o que involucran las relaciones entre esfuerzo y deformación.

2.2 Propiedades Físicas

Normalmente se entiende como propiedades físicas a aquellas diferentes a las propiedades mecánicas, que se relacionan con las físicas del material; éstas propiedades incluyen las siguientes:

- Densidad
- Expansión térmica (o contracción)
- Conductividad térmica
- Conductividad eléctrica

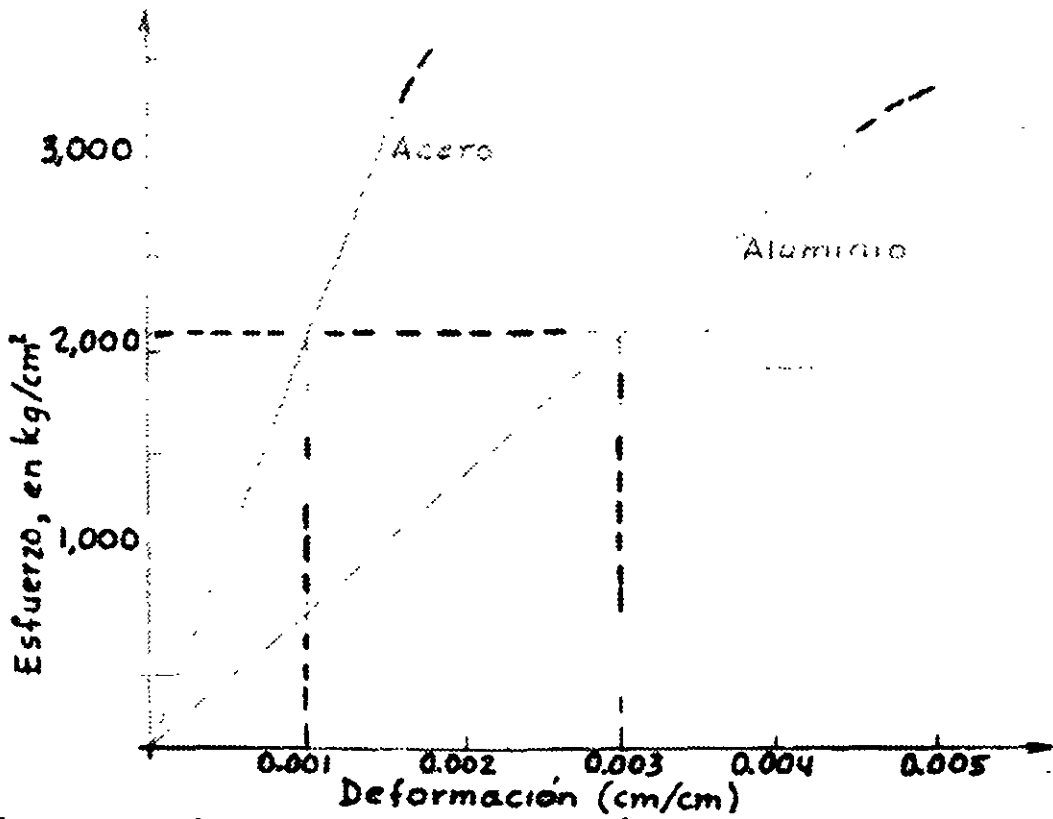
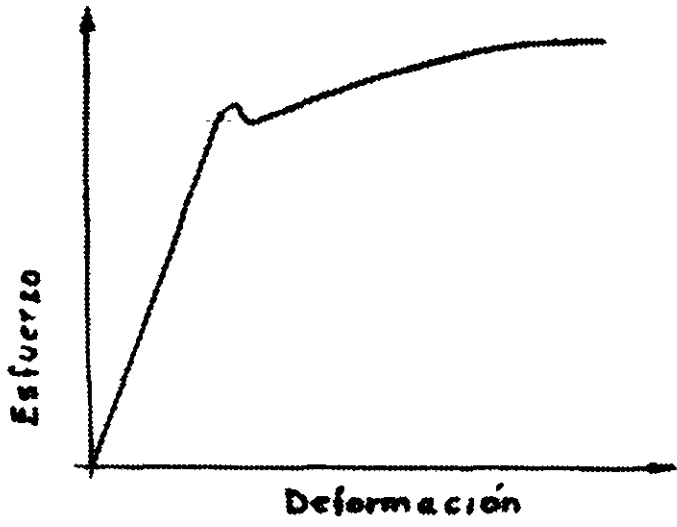
3. RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Diagrama Esfuerzo- Deformación

Es un diagrama en el cual los correspondientes valores de esfuerzo y deformación se grafican uno contra el otro. Por lo general los valores de esfuerzos se grafican como ordenadas (verticalmente) y los valores de deformación como abscisas (horizontalmente), según Fig. I-7. A continuación se incluyen las definiciones de conceptos que intervienen en las relaciones esfuerzo-deformación.

TABLA I-1.- RELACION ENTRE LA DUREZA Y LA RESISTENCIA A LA TENSION

No DE DUREZA BRINELL	ROCKWELL C	No. DE DUREZA SHORE (ESCLEROSCOPIO)	RESISTENCIA A LATENSION 1000 kg/cm ²	No. DE DUREZA BRINELL	ROCKWELL C	No DE DUREZA SHORE (ESCLEROSCOPIO)	RESISTENCIA A LATENSION 1000 kg/cm ²
898	--	--	30.92	223	20	32	7.73
857	--	--	29.51	217	18	31	7.52
817	--	--	28.17	212	17	31	7.31
780	70	106	26.98	207	16	30	7.09
745	68	100	25.86	202	15	30	6.96
712	66	95	24.73	197	13	29	6.82
682	64	91	23.68	192	12	28	6.68
653	62	87	22.76	187	10	28	6.54
627	60	84	21.85	183	9	27	6.39
601	58	81	20.94	179	8	27	6.25
578	57	78	20.16	174	7	26	6.11
555	55	75	19.40	170	6	26	5.97
534	53	72	18.69	166	4	25	5.83
514	52	70	17.99	163	3	25	5.76
495	50	67	17.35	159	2	24	5.62
477	49	65	16.72	156	1	24	5.48
461	47	63	16.09	153	--	23	5.34
444	46	61	15.46	149	--	23	5.27
429	45	59	14.89	146	--	22	5.20
415	44	57	14.33	143	--	22	5.06
401	42	55	13.77	140	--	21	4.99
388	41	54	13.28	137	--	21	4.92
375	40	52	12.79	134	--	21	4.78
363	38	51	12.37	131	--	20	4.64
352	37	49	11.94	128	--	20	4.57
341	36	48	11.59	126	--	--	4.50
331	35	46	11.24	124	--	--	4.43
321	34	45	10.89	121	--	--	4.36
311	33	44	10.54	118	--	--	4.29
302	32	43	10.26	116	--	--	4.22
293	31	42	9.98	114	--	--	4.15
285	30	40	9.70	112	--	--	4.08
277	29	39	9.42	109	--	--	3.94
269	28	38	9.21	107	--	--	3.87
262	26	37	9.00	105	--	--	3.79
255	25	37	8.78	103	--	--	3.72
248	24	36	8.57	101	--	--	3.65
241	23	35	8.36	99	--	--	3.58
235	22	34	8.15	97	--	--	3.51
229	21	33	7.94	95	--	--	3.44



Comparación de comportamiento elástico (Acero - Aluminio)

FIGURA I-7.- DIAGRAMAS DE ESFUERZO DEFORMACION

Un esfuerzo de tensión es el que resiste a una fuerza tendiendo a separar el cuerpo.

Un esfuerzo de compresión es el que resiste a una fuerza tendiendo a prensar o aplastar un cuerpo.

Un esfuerzo cortante es uno que resiste a una fuerza tendiendo a hacer que una capa de un cuerpo se deslice a través de otra capa.

Un esfuerzo torsional es una forma de esfuerzo cortante que resiste a un momento tendiendo a torcer a un cuerpo

En la Fig. I-8, se muestran éstos tipos de esfuerzos.

Los esfuerzos de tensión y compresión pueden desarrollarse en un material ya sea por la acción directa de una fuerza o por un momento flexionante. Los varios tipos de esfuerzos mencionados frecuentemente ocurren en combinación.

Limite Elástico. Es el esfuerzo más grande al cual el material es capaz de soportar o sostenerse sin deformación permanente después de que se le releva completamente del esfuerzo. Es el primer esfuerzo en un material, menor que el máximo esfuerzo soportable, al cual ocurre un incremento en la deformación sin un incremento en el esfuerzo.

Limite de proporcionalidad. Es el esfuerzo más grande al cual un material es capaz de soportar sin ninguna desviación de proporcionalidad, de esfuerzo a deformación (ley de hooke).

Resistencia a la Fluencia. Es el esfuerzo al cual un material exhibe una desviación específica limitada de la proporcionalidad esfuerzo-deformación; la desviación se expresa en términos de deformación

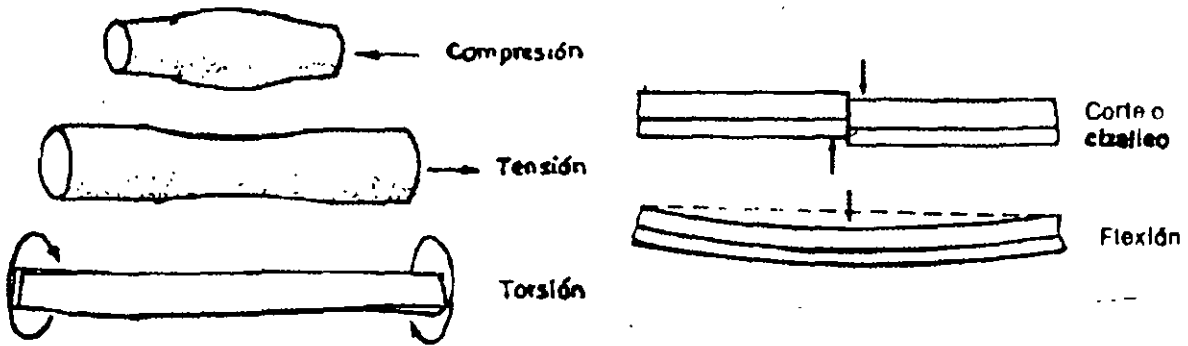
Resistencia a la Tensión. Es el máximo esfuerzo de tensión que un material es capaz de soportar. La resistencia a la tensión se calcula dividiendo de la máxima carga durante una prueba de tensión llevada hasta la ruptura entre el área de la sección transversal original de la probeta.

Resistencia de corte. Es el máximo esfuerzo cortante que un material es capaz de soportar. La resistencia al corte se calcula de la máxima carga durante una prueba de torsión y se basa en la dimensión original de la sección transversal de la probeta.

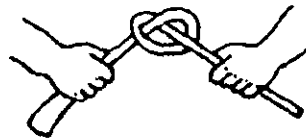
Carga de Ruptura Es la carga a la cual ocurre la fractura.

Ductilidad Es la propiedad de alargamiento o de elongación arriba del limite plástico, bajo esfuerzo de tensión. La medida de ductilidad es el % de alargamiento de la barra de prueba fracturada sobre la longitud inicial (2 a 8%)

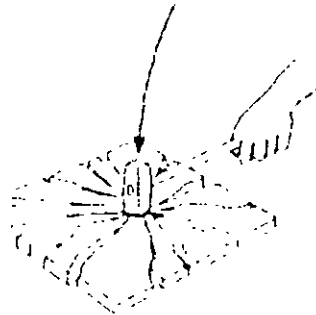
FIGURA I-8



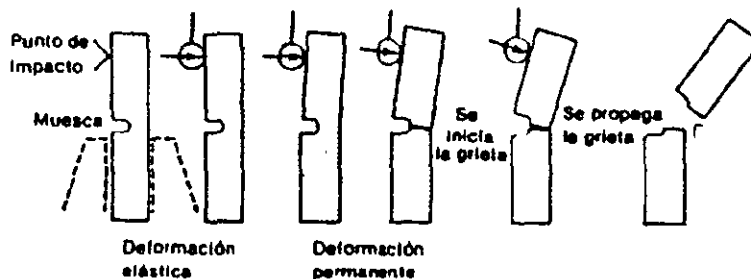
Resultados de las fuerzas externas aplicadas a los metales



Ductilidad deformación permanente sin falla



Fragilidad Falta de un material sin deformación apreciable



Probeta para prueba de tenacidad en el proceso de deformación por impacto por medio del pendulo del probador

Elongación. Es el incremento en la longitud de la probeta de un espécimen bajo prueba de tensión, usualmente expresado como el % de la longitud original de la probeta.

Módulo de Elasticidad. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación correspondiente, abajo del límite de proporcionalidad. Hay módulos de elasticidad en tensión, en compresión y en cortante. El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez de un material y determina la pendiente de la línea de esfuerzo-deformación. La elasticidad es la propiedad que permite a los cuerpos deformados recuperar su forma original después que se les remueve la carga. El módulo de elasticidad cambia con la temperatura (disminuye con el aumento de temperatura). Este cambio es de importancia cuando se considera la deformación bajo carga, y es de especial significado en relación con el estudio de esfuerzos y de reacciones resultantes de expansión térmica.

Dureza. Es la propiedad de los metales que les permite resistir el rayado, indentación y abrasión. El hecho de que haya una relación definida entre la dureza y la resistencia a la tensión de los metales, es importante porque se puede estimar aproximadamente la resistencia a la tensión con una muy simple y económica prueba de dureza.

Tenacidad. Es la habilidad de un material a resistir impactos o a soportar repetidos e inversiones de esfuerzos, o a absorber energía cuando se esfuerza mas allá del límite elástico.

4. PROPIEDADES METALURGICAS

El conocimiento de las propiedades metalúrgicas de los materiales es de mucha importancia para conocer sus propiedades mecánicas y físicas. Las consideraciones metalúrgicas cubren el rango completo desde la extracción de los metales de sus minerales hasta su utilización última; esto incluye lo siguiente:

- Fusión de metales
- Fundición
- Forjado
- Trabajado
- Características de formado y unión
- Respuesta al tratamiento térmico
- Efecto del ambiente de servicio

Aun después de que los componentes han sido instalados y estén en servicio, las consideraciones metalúrgicas pueden aplicarse, como por ejemplo en lo siguiente:

- Limpieza química
- Fluencia a alta temperatura
- Fragilidad de muescas a baja temperatura.

Cuando ocurren fallas, las técnicas metalúrgicas están entre las principales herramientas empleadas para evaluar las causas de falla y determinar soluciones y remedios.

El conocimiento metalúrgico es necesario para la apropiada utilización económica de los metales, en el establecimiento de la apropiada fabricación, soldadura, tratamiento térmico y procedimientos de limpieza. También es útil a los inspectores, para comprender las características metalúrgicas de los materiales que están siendo inspeccionados, y reconocer su susceptibilidad hacia la fragilización, roturas, propagación de fallas y corrosión.

4.1 Estructura de los Metales

La base de la metalurgia de materiales, es una comprensión de la estructura de metales; en estado sólido, esto implica el orden de arreglo de los átomos de que todos los metales están compuestos. Los átomos están arreglados en espacios llamados redes o retículas; de los catorce (14) posibles tipos de espacios reticulares, únicamente tres son de importancia primaria. Estos representan los metales y aleaciones normalmente relacionados con los materiales comerciales, y que son:

- Cúbico Centrado en el Volumen CCV
- Cúbico Centrado en las Caras CCC
- Hexagonal de Empaque Cerrado HEC

Algunos metales como el hierro, titanio, cobalto, y estaño, pueden presentarse en dos o más estructuras reticulares; éstos metales sufren cambios de un tipo de estructura a otra cuando son calentados (o enfriados) arriba (o abajo) de temperaturas específicas. Estos cambios en la estructura reticular es una razón principal de la importancia de las aleaciones a base de hierro.

Se puede obtener una gran variedad de propiedades causando cambios en la estructura reticular, el tratamiento térmico es la técnica primaria usada para realizar dichos cambios.

La adición de un átomo "extraño" al metal puro puede tener varios efectos, en alguna de las siguientes circunstancias:

- El átomo puede localizarse entre los átomos existentes en la retícula y así ocupa una posición intersticial; pequeños átomos como el hidrógeno y carbono pueden entrar de esta forma.
- Un átomo extraño puede también reemplazar a un átomo en la estructura reticular del metal "puro", en cualquier caso el átomo extraño es considerado "disuelto" o en "solución" y forma una intersticia o solución sustitucional, respectivamente.

- Otra forma implica una combinación directa del átomo agregado con los átomos en el espacio reticular para formar una estructura de cristal diferente.

Los átomos extraños pueden estar presentes sin intención como trazas de elementos o residuales, o pueden ser agregados a propósito por razones específicas como:

- Elementos de aleación
- Desoxidación
- Mejor fluidez durante el colado
- Mejorar la maquinabilidad o soldabilidad
- Producir otras propiedades o efectos deseados

En ocasiones, pequeñas fracciones de un porcentaje de un elemento cuando se agrega al metal produce cambios mayores en las propiedades metalúrgicas, físicas o mecánicas del metal; en otras aleaciones, son necesarias grandes adiciones.

Por lo general los metales comerciales consisten de muchos granos individuales, que se forman originalmente sobre la solidificación desde el estado de fusión. En la condición de "como se funde" o "como se solda" frecuentemente estos granos aparecen internamente como dendritas. En esencia, límites o fronteras entre granos representan imperfecciones en el arreglo ordenado de la red.

Algunos elementos presentes ya sea como elementos de aleación o como impurezas tienden a segregarse a lo largo de las fronteras de los granos, y bajo estas condiciones, pueden reducir significativamente la resistencia o ductilidad del metal o puede bajar su resistencia a la corrosión u oxidación. Bajo algunas condiciones de formato en caliente o soldado, las roturas pueden iniciarse en las fronteras de los granos.

El trabajo en caliente o en frío tiende a romper los granos originales y producir refinamientos, particularmente a temperaturas elevadas; temperaturas excesivas pueden efectuar un crecimiento del grano haciéndolo burdo o basto. Con metales y aleaciones sujetos a cambios en la estructura reticular, el refinamiento del grano puede efectuarse por tratamiento térmico.

4.2 Soluciones Sólidas

En las aleaciones se pueden formar las siguientes fases:

- Soluciones líquidas
- Soluciones sólidas
- Compuestos químicos
- Metálicas

Soluciones sólidas. Se llaman soluciones sólidas las fases en que uno de los componentes de la aleación conserva su red cristalina, mientras que el otro u otros, no conserva su red cristalina y entrega sus átomos a la red del primer componente.

El componente cuya red cristalina se conserva, se denomina disolvente

Se distinguen las siguientes soluciones sólidas (Fig. I-9):

- De sustitución
- Intersticiales

Al formarse la solución sólida de sustitución, los átomos del componente disuelto (B) sustituyen a una parte de los átomos del disolvente (A) en su red cristalina. Los átomos del componente disuelto pueden sustituir a cualquiera de los átomos del disolvente desordenadamente, ubicándose arbitrariamente en lugar de éstos, en los nudos de la red.

Al formarse la solución sólida intersticial, los átomos del componente disuelto se ubican en los espacios interatómicos (poros) de la red cristalina del disolvente.

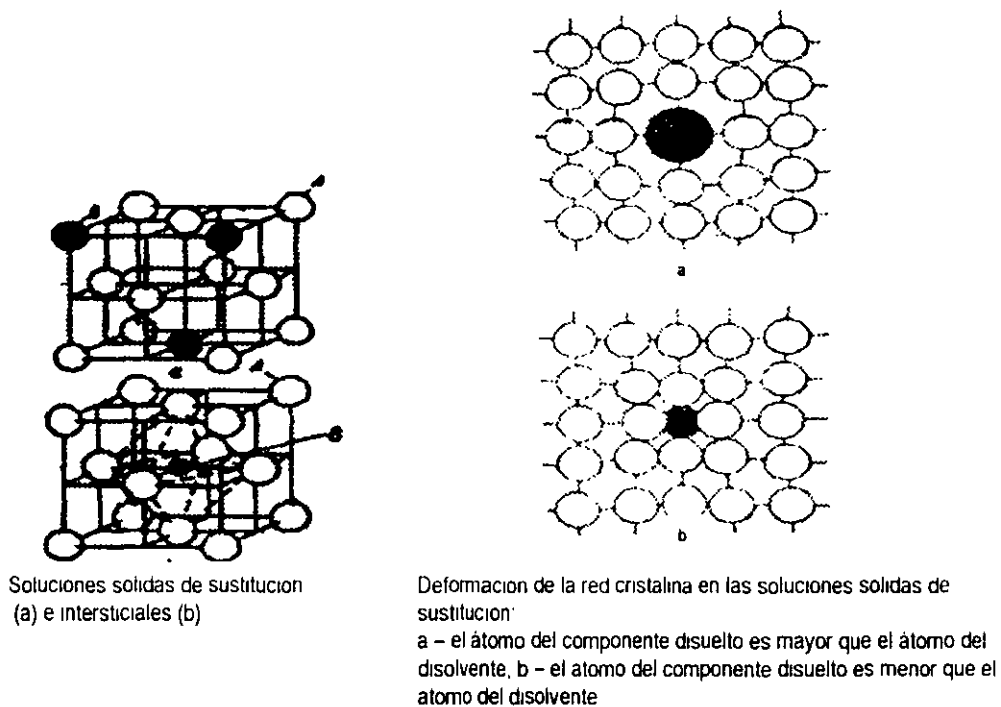


FIGURA. I-9

En las soluciones de sustitución los átomos de menor tamaño (en comparación con los átomos del metal del disolvente) se concentran en la zona de la red contraída; los átomos de gran tamaño, en la zona de la red alargada. El aumento de las distancias interatómicas en la zona de dislocaciones les permite a los átomos que forman soluciones sólidas intersticiales ubicarse más fácilmente

La formación de nubes va acompañada de una disminución de la formación de la red, lo que determina su estabilidad.

La microestructura de la solución sólida en las condiciones de equilibrio representa granos cristalinos homogéneos y su estructura no se diferencia de la estructura del metal puro.

Las soluciones sólidas de sustitución pueden ser limitadas e ilimitadas, es decir, pueden existir en un campo limitado de concentraciones de componentes o cualquiera que sea su concentración.

Las soluciones sólidas de sustitución con disolubilidad ilimitada pueden formarse al observar las siguientes condiciones:

- Los componentes deben poseer igual tipo de red cristalina (isomorfas)
- La diferencia entre las dimensiones atómicas de los componentes y, por consiguiente, entre los periodos de la red cristalina, debe ser insignificante. Para las aleaciones ferrosas la diferencia entre los diámetros atómicos no debe ser superior a un 8%. Si esta diferencia se encuentra en los límites de 8 a 15%, pueden formarse soluciones sólidas limitadas. Si la diferencia entre las dimensiones de los átomos es superior al 15%, la formación de soluciones sólidas de sustitución resulta imposible a causa de la deformación límite de la red cristalina.
- Los componentes deben pertenecer a un mismo grupo del sistema periódico de elementos o a grupos vecinos afines y con relación a esto, tener una estructura cercana de la capa de valencia de los átomos.

Las soluciones sólidas intersticiales pueden formarse sólo en aquellos casos, cuando el diámetro del átomo del elemento disuelto no es grande. Por eso las soluciones sólidas de este tipo se forman solamente cuando se disuelven en el metal (por ejemplo en el hierro) el carbono, nitrógeno, hidrógeno, y, por lo visto, el boro, es decir, aquellos elementos que tienen un diámetro atómico pequeño.

Las soluciones sólidas intersticiales, por regla general, son limitadas. El papel que desempeñan las soluciones sólidas de este tipo es sobre todo significativo en los aceros y fundiciones.

5. DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO

Los diagramas de equilibrio o de fase se realizan extensivamente por los metalurgistas para mostrar en forma gráfica las relaciones de fase que exhiben las aleaciones a diferentes temperaturas.

Se han determinado numerosos diagramas de equilibrio para muchas combinaciones de metales comerciales y experimentales; el más conocido y más ampliamente usado es el diagrama de hierro-carbono, mostrado en la Fig. I-9

A temperaturas ambiente, los átomos de hierro están arreglados en la retícula en la forma Cubica Centrada en el Volumen (CCV), que es magnética y que se conoce como hierro alfa (α).

A 910°C (1670°F) de temperatura el hierro puro se transforma de retícula CCV a Cúbica Centrada en las caras (CCC), que se conoce como hierro gamma (γ) y que no es magnético.

A 1390°C (2535°F) de temperatura reticular CCC se convierte en arreglo CCV y se conoce como ferrita delta (δ).

Los cambios anteriores se conocen como modificaciones alotrópicas; la temperatura a la cual el hierro alfa cambia a hierro gamma se refiere como de transformación A3 o puntos críticos; la adición de carbono baja la temperatura de transformación A3 hasta que el contenido de carbono alcanza 0.85%.

Cuando el hierro alfa se transforma a austenita los carburos de hierro Fe_3C van dentro de la solución; esta se conoce como la transformación A1, y es reversible. En el enfriamiento, los carburos de hierro tienden a formarse de nuevo; estos constituyentes de carburos de hierro, generalmente se describen como "perlita".

Bajo condiciones de equilibrio, las temperaturas de transformación deben ocurrir a la misma temperatura, ya sea que el acero esté siendo calentado o enfriado, sin embargo, generalmente ocurre un retraso en la obtención de las condiciones de equilibrio: en calentamiento, los puntos A1 y A3 tienden a ser más altos, mientras que en enfriamiento tienden a ser más bajos.

De acuerdo con lo anterior, los puntos críticos A1 y A3 se modifican con las letras r y c para indicar enfriamiento o calentamiento respectivamente.

En calentamiento lento, la transformación empieza en Ac_1 y se completa en el punto Ac_3 , y cuando se enfría, la transformación empieza en el punto crítico Ar_3 y se completa en el punto Ar_1 .

Si el régimen de enfriamiento es suficiente rápido, la austenita no sufre la transformación a ferrita y perlita, a través del rango $Ar_3 - Ar_1$; bajo éstas

condiciones se retienen hasta que se alcanza la temperatura de 315°C (600°F) o menor. A estas temperaturas, la austenita empieza a transformarse a un constituyente acicular duro escrito como "martensita".

La transformación de austenita a martensita en el inicio del enfriamiento en el punto de Ms se completa en el punto Mf; el rango de temperatura de formación de austenita es característica de un determinado acero, y no es afectado por el régimen de enfriamiento.

Los elementos de aleación pueden alterar significativamente los puntos A₁, A₃, Ms y las relaciones de equilibrio.

El reconocimiento de los puntos críticos es importante en la fabricación de piezas y tubería, recomendándose lo siguiente:

- El formato en caliente no debe ser hecho a temperaturas entre los puntos A₁ y A₃.
- La normalización debe hacerse arriba de las temperaturas Ac₃.
- El relevado de esfuerzo o revenido (templado) debe hacerse debajo de las temperaturas Ac₁.

En la Tabla I-2, siguiente se muestra las durezas de las distintas fases que aparecen en los aceros.

Fase	Dureza Brinell	Dureza Rockwell
Ferrita	155 máxima	0
Perlita*	230	20
Austenita	375	40
Cementita	650 mínima	60 mínima

* La perlita es una mezcla de fases (α + Fe₃C)

También el % de carbono tiene influencia en la dureza como se muestra en la Tabla 3 siguiente para un acero normalizado.

% de Carbono en el acero	Dureza Brinell
0.01	90
0.20	120
0.40	165
0.60	220
0.80	260
1.00	295
1.20	315
1.40	300

6. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS

6.1 Introducción

El tratamiento térmico de aceros comprende el cambio de estructura, y por lo tanto el cambio de las propiedades de la aleación, que se obtiene mediante el calentamiento hasta una determinada temperatura, exponiendo el acero a esta temperatura durante cierto tiempo, y el enfriamiento posterior a una velocidad determinada.

Existen varios tipos de tratamiento térmico (recocido, normalización, temple, revenido, etc.), que en forma distinta cambian la estructura y las propiedades del acero.

El tratamiento térmico del acero es una operación muy importante en el ciclo tecnológico de preparación de muchas partes y maquinaria; sólo con la ayuda del tratamiento térmico pueden obtenerse las propias mecánicas del acero que garanticen un trabajo normal de los elementos de máquinas y herramientas.

Para el tratamiento térmico de los aceros, son clave los diagramas de equilibrio descritos anteriormente, con los cuales es posible hacer los siguientes pronósticos en la especificación de las aleaciones:

- Las temperaturas a las que las aleaciones sólidas comenzarán a fundirse (solidus) y las de terminación de la fusión (líquidas);
- Los cambios posibles de fase que habrán de ocurrir como resultado de la alteración de la composición o de la temperatura.

Tratamiento térmico simples (aceros simples o de bajo carbono)

Por lo común, los aceros son tratados térmicamente para alcanzar la estructura y las propiedades adecuadas. Las estructuras pueden variar desde la perlita gruesa o fina, hasta la bainita o la martensita revenida. Los tratamientos térmicos del acero están orientados a la producción de una mezcla de ferrita (α) y cementita (Fe, C) que dé la adecuada combinación de propiedades. Las siguientes secciones describen algunas de las técnicas mediante las cuales es posible tener control sobre los aceros no aleados, o sea aleaciones de solo de Fe y C.

Los tratamientos térmicos en los aceros son importantes principalmente por sus efectos sobre la estructura del metal, por ejemplo, las temperaturas y técnicas de tratamiento térmico que produce un grano más grande por lo general mejora las propiedades de fluencia y esfuerzo a la ruptura de los aceros a temperaturas más elevadas. El régimen de enfriamiento, desde la temperatura de tratamiento térmico, tiene una importancia similar.

Otros factores, como la distribución estructural de los constituyentes, por ejemplo carburos, también son importantes porque afectan las temperaturas de tratamiento térmico y el régimen de enfriamiento, por ejemplo, un acero normalizado y templado es a veces superior al mismo acero en la condición de completamente recocido.

Cuando los aceros tratados térmicamente se usan a temperaturas elevadas, se acostumbre emplear una temperatura de resumido o templado de al menos 83°C (150°F) arriba de la temperatura de servicio esperada.

Algunos hornos comerciales de tratamiento térmico no proporcionan un control uniforme de temperatura, lo que puede resultar en una diferencia considerable en las estructuras metalúrgicas.

Las cualidades de los aceros se modifican notablemente por medio del temple y el recocido. El temple consiste en calentar un acero hasta una temperatura elevada (que depende de su contenido en carbono) y enfriarlo rápidamente. El recocido consiste en calentarlo y enfriarlo lentamente.

La temperatura necesaria para que se verifiquen estas transformaciones no es nunca inferior a 700° y varía según la proporción de carbono de cada acero. Cuando un acero templado se calienta más allá de dicha temperatura, el hierro y el carbono se hallan íntimamente unidos. Si el acero se enfría lentamente, se separa dentro de la estructura una parte del carbono combinado con el hierro, formando un carburo llamado cementita (Fe_3C), y el acero relativamente blando (acero recocido). En cambio, si el enfriamiento es brusco, no se verifica dicha separación, quedando la cementita en solución sólida y el acero queda sumamente duro (acero templado).

Al calentar un acero para templarlo o recocerlo, se corre el peligro de que se descarbure por demasiada temperatura o demasiado tiempo y entonces se dice que el acero está recalentado o pasado. Su grano, de fino se vuelve grueso, si la oxidación va más allá, el acero está quemando.

6.2 Definiciones de Términos

Hierro α = Forma alotrópica del hierro, de estructura cúbica centrada en el volumen CCV (de 0 a 910° C y de 1401 a 1539°C).

Hierro γ = Forma alotrópica del hierro, de estructura cúbica centrada en las caras, CCC (de 910 a 1401 C)

Ferrita = Solución sólida intersticial de carbono en el hierro: Fe_3C . La red cristalina es un cubo volumétrico centrado; los átomos de carbono se sitúan en los espacios internodales de la red cristalina del hierro. La ferrita es magnética y sumamente plástica.

- Austenita = Solución sólida intersticial de carbono en el hierro γ .
- Cementita = Compuesto químico de hierro y carbono Fe_3C , carburo de hierro; tiene una red cristalina complicada (rómica), una dureza muy alta y es muy frágil. En la estructura de estas aleaciones, con el aumento del contenido de carbono (más de 0.03%), se genera la perlita (eutectoide). Esta última es una mezcla de dos fases: de ferrita y de cementita.
- Aceros = Aleaciones de hierro y carbono en las cuales el contenido de carbono no supera el 2.14%; según el contenido de carbono, se distingue:
- Hipoeutectoides con un contenido de 0.03 a 0.8% de C; consta de perlita y ferrita.
 - Eutectoides con un contenido de 0.8 de carbono; tiene la estructura de la perlita.
 - Hiperentectoide con un contenido de 0.8 a 2.14% de C, constituye perlita y cementita (secundaria).
- Fundiciones = Aleaciones de hierro y carbono en las cuales el contenido de carbono supera el 2.14%, según el estado del carbono, existen fundiciones blancas y fundiciones con grafito. Las propiedades de las fundiciones con grafito dependen de la composición química de la fundición, de la cantidad, forma, tamaño y modo de distribución de las inclusiones grafitosas, y de la estructura de la matriz metálica.
El grafito en las fundiciones suele tener tres formas laminar, en forma de copos y esferoidal (globular).
- Perlita = Se forma de la austenita durante el enfriamiento lento a la temperatura de 727°C y contiene el 0.8% de carbono, mezcla eutectoide. La perlita puede ser laminar o granular, dependiendo de la forma de las partículas de cementita, la cantidad de perlita crece con el aumento del contenido de carbono y también aumenta proporcionalmente de dureza.
- Ledeburita = Aleación eutéctica de cristalización simultánea de austenita y cementita, es decir, mezcla de austenita y cementita. La ledeburita se forma cuando la solución líquida de composición constante (4.3%) cristaliza a la temperatura de 1147°C. La ledeburita tiene una dureza muy alta y es muy frágil; a temperaturas inferiores a 727°C consta de perlita y cementita.

- Martensita** = Fase que se forma como resultado de una transformación de estado sólido sin difusión por enfriamiento muy rápido, desde la temperatura de austenitización, en forma de agujas.
- Dendritas** = Cristales ramificados o arborecentes que se forman en el proceso de cristalización (de la palabra griega "dentrón" que significa árbol).
- Bainita** = (Superior o plumosa) fase en forma de pluma de eutectoide; en grandes aumentos se puede reconocer la cementita y la ferrita que la forman, es decir, es una perlita de forma especial.
(Inferior o acicular) fase de estructura eutectoide muy fina; su aspecto es oscuro y frueso, lo que permite diferenciarlo de la martensita.
- Perlita gruesa** = Estructura de láminas de ferrita y cementita bastante separadas.
- Perlita fina** = Estructura de láminas muy próximas entre sí

6.3 Recocido

Se entiende por recocido el calentamiento del acero por encima de las temperaturas de transformaciones de fase con un enfriamiento posterior lento

Como resultado del enfriamiento lento el acero se acerca al equilibrio estructural y de fase; como consecuencia de esto, después del recocido se obtienen las estructuras mostradas en el diagrama de estado hierro-cementita (carburo de hierro):

- Ferrita + perlita en los aceros hipoeutectoides.
- Perlita en el acero autectoide.
- Perlita + cementita en los aceros hipereutectoides.

Después del recocido, el acero tiene baja dureza y resistencia; durante el recocido, tiene lugar la recristalización de fase y se afina el grano.

Por lo general, en la mayoría de los casos el recocido es un tratamiento térmico preparatorio; al recocido se someten las piezas fundidas, forjadas y laminadas.

Disminuyendo la dureza y resistencia, el recocido mejora la facilidad de elaboración por corte. Al mismo tiempo, afinando el grano, eliminando las tensiones internas y disminuyendo la heterogeneidad estructural, el recocido contribuye al aumento de la plasticidad y viscosidad en comparación con las obtenidas después del fundido, forjado o laminado.

Por las razones anteriores, en ciertos casos es el tratamiento térmico final, por ejemplo para muchas piezas fundidas de gran tamaño.

Al enfriarse lentamente los aceros se aproximan al equilibrio de fase y estructural. Las estructuras obtenidas después del recocido, están indicadas en el diagrama hierro-cementita, después de recocido el acero adquiere una dureza y resistencia a la rotura baja.

Los principales fines del recocido son: subsanar los defectos de la estructura, recristalizando el acero (afino del grano), y eliminar las tensiones internas.

Durante el tratamiento térmico, a consecuencia de la inobservancia del régimen de temperaturas, se tienen a menudo defectos como el sobrecalentamiento y requemado.

El requemado tiene lugar cuando el metal se calienta hasta una temperatura próxima a la de fusión. En este caso se van produciendo la fusión o la oxidación de las fronteras de granos del metal. El requemado es un defecto irremediable.

El sobrecalentamiento se caracteriza por la textura de grano grueso y puede subsanarse con tratamiento térmico recurriendo al recocido o normalizado

6.4 Normalizado

El normalizado consiste en el calentamiento del acero hasta 50-60°C por arriba de A_{c3} para el acero hipoeutectoide, y por arriba de A_{e1} para el acero hipereutectoide, sometiéndolo a esta temperatura durante corto tiempo y enfriándolo al aire.

La normalización produce la recristalización del acero, y por lo tanto, elimina la estructura de grano basto obtenida durante la fundición o el laminado (forjado, estampado); la normalización se usa mucho para mejorar las propiedades de fundiciones de acero.

Un enfriamiento acelerado al aire conduce a la descomposición de la austenita a temperaturas más bajas, lo que aumenta la dispersión de la mezcla ferrito-cementítica.

Para ciertos aceros de alta aleación el enfriamiento al aire en esencia es un temple, en este caso, para disminuir la dureza después de la normalización se efectúa el revenido a 600-650°C.

La designación de la normalización es distinta según la composición del acero:

- Para los aceros pobres en carbono, la normalización como operación mas sencilla, se emplea en lugar del recocido;

- Para los aceros con aproximadamente 0.3% de carbono, la normalización se emplea en lugar del temple y del revenido a alta temperatura; las propiedades mecánicas serán mas bajas, pero la operación de normalizado es mas sencilla y produce menor deformación de la pieza, en comparación de la obtenida con el temple;
- Para los aceros altos en carbono (hipereutectoides), el normalizado se emplea para eliminar la red cementítica que puede seguir durante un enfriamiento lento desde la temperatura superior a A_{est} .

La normalización con revenido posterior a alta temperatura (600-650°C), frecuentemente se emplea para corregir la estructura de los aceros aleados, en lugar del recocido.

El normalizado se define como un calentamiento hasta una temperatura conveniente, por encima del rango de transformación, un cocido o permanencia a dicha temperatura, seguido de un enfriamiento en el aire hasta una temperatura suficientemente por debajo del rango de transformación. Por tanto, un buen proceso de normalización requiere:

- Que la pieza tratada sea calentada uniformemente a una temperatura suficientemente alta como para alcanzar la transformación completa de la ferrita y cementita a austenita.
- Que permanezca a esta temperatura un tiempo suficientemente largo como para alcanzar uniformidad de temperatura a través de toda su masa.
- Que se permita el enfriamiento en aire quieto, de manera uniforme.

El enfriamiento uniforme requiere la libre circulación del aire en torno a cada pieza, de manera que no haya áreas en las cuales el enfriamiento sea restringido o acelerado. Una disminución en la velocidad de enfriamiento convertirá un tratamiento de normalización en un tratamiento de recocido. El aumento en la velocidad de enfriamiento cambia el tratamiento de normalización en un tratamiento de temple.

En general, un temple al aire no se llama normalizado debido a que no pone al acero en su condición perlítica normal, que caracteriza al acero normalizado. Sin embargo, a veces, cuando la velocidad de enfriamiento en el aire, en la operación de normalizado, es intencionalmente acelerada para provocar la formación de algo de martensita, el proceso es llamado normalizado a pesar del enfriamiento acelerado y el endurecimiento parcial.

Un normalizado puede ablandar, endurecer o revelar tensiones en un acero, dependiendo esto de la condición del material antes del normalizado. Así, las funciones del normalizado pueden superponerse y, a veces, confundirse con las del recocido, el endurecimiento, y el relevado de tensiones. Los objetivos de un normalizado pueden ser:

- Refinar el grano y homogeneizar la microestructura para mejorar la respuesta del acero en una operación de endurecimiento por temple.
- Mejorar las características de maquinabilidad del acero.
- Modificar y refinar las estructuras dentríticas de colada.
- Alcanzar, en general, las propiedades mecánicas deseadas.

El normalizado puede aplicarse a aceros al carbono o aleados, ya sean de colada o aquellos en los cuales la estructura de colada ha sido destruida por laminación o forja rotatoria. Aunque el procedimiento se aplica para mejorar las propiedades mecánicas, el normalizado de aceros hipereutectoides puede inducir la formación de cementita a los límites de grano, causando un deterioro en las propiedades mecánicas.

Debido a diferencias en las velocidades de solidificación y enfriamiento, las piezas de colada con estructura destruida son frecuentemente poco uniformes en microestructura. Esta falta de uniformidad es a menudo disminuida por normalización. Esto lleva implícita una mejora en sus características de maquinabilidad.

6.5 Temple

Se llama temple al calentamiento hasta una temperatura de 30 a 70°C arriba de A_c (para aceros hipoeutectoides) o arriba de A_c (para aceros hipereutectoides), es decir, superior a la de transformaciones de fase, manteniéndolos a esta temperatura para finalizar las transformaciones de fase, y con un enfriamiento posterior a una velocidad más alta que la crítica: por lo general aceros al carbono en agua, y aceros aleados en aceite u otros medios

El temple no es un tratamiento térmico final: para disminuir la fragilidad y las tensiones que surgen con el temple, y obtener las propiedades mecánicas requeridas, el acero después del temple se somete a un revenido.

Temperatura de temple En la Fig. I-10, se muestran las temperaturas de temple de los aceros según el contenido de carbono.

Tiempo de calentamiento. El calentamiento de temple se realiza en hornos de acción periódica y continua, generalmente en hornos eléctricos o que funcionan a base de combustible gaseoso o líquido. Se emplean ampliamente los hornos de baño, en los cuales la pieza es calentada en sales fundidas.

La elección de la velocidad de calentamiento depende del tipo de dispositivo de calentamiento, de la composición y microestructura original del acero, y de la forma y dimensiones de la pieza. Esta debe ser menor para el acero con un contenido elevado de carbono y elementos de aleación y para grandes piezas de compleja configuración. En el caso de reducida conductibilidad térmica del acero y una gran diferencia de las temperaturas de los volúmenes internos y externos de

la pieza, surgen tensiones significativas que pueden producir la torcedura de la pieza e incluso la formación de grietas.

Al alcanzar la temperatura prefijada de calentamiento, la pieza se expone a esta temperatura durante cierto tiempo para lograr su calentamiento total en toda la sección, la finalización de las transformaciones de fase y el equilibrio de la composición de la austenita en todo el volumen. Cuanto más alta es la temperatura de calentamiento, tanto menor puede ser el tiempo de exposición.

Los productos forjados y laminados hechos de aceros de construcción (cuyo contenido de carbono es de 0.6-0.7%) generalmente son calentados en hornos con una velocidad de 0.8°C minuto por cada milímetro de sección. En el caso de calentamiento de las piezas en baño de sales la duración del calentamiento disminuye aproximadamente dos veces y si el calentamiento se realiza en metales fundidos (plomo), la duración del calentamiento se reduce 3 ó 4 veces; el tiempo de exposición frecuentemente se toma igual a $1/5$ del tiempo de calentamiento.

Durante el proceso de temple se deben proteger las capas superficiales del acero, contra la oxidación y descarburación, por medio de:

- Calentamiento en sales fundidas.
- Calentamiento en medios gaseosos protectores
- Calentamiento en vacío.

Velocidad de enfriamiento durante el temple. Los medios de enfriamiento (para templar) deben proporcionar alta velocidad de enfriamiento a temperaturas de estabilidad mínima de la austenita ($650-550^{\circ}\text{C}$) para prevenir su descomposición en la mezcla ferrito-cementítica.

El temple del acero tiene por objetivo elevar su dureza y resistencia a la rotura; debido al temple, la austenita se transforma en estructura meta estable, la martensita, que es una solución sólida sobresaturada del carbono en el hierro.

Los resultados del temple dependen mucho de la elección adecuada de la temperatura de calentamiento para el temple. Si la temperatura a la que se calienta el acero hipoeutectoide es inferior a A_c , la dureza no se elevará, puesto que no habrá transformaciones de fase y la estructura será ferrita + perlita

Al calentar el acero hasta una temperatura superior a A_{c1} (punto 2 se obtiene la estructura ferrita + austenita). A causa del enfriamiento rápido la austenita se transforma en martensita y el acero adquiere la estructura ferrita + martensita.

La ferrita que se ha conservado al calentarse hasta el punto 2, no sufrirá cambios estructurales enfriándose. La formación de martensita eleva la dureza.

Un calentamiento más intenso (hasta el punto 3) aumenta la dureza, ya que, al elevarse la temperatura, crece la cantidad de austenita, pero disminuye la de ferrita, y el enfriamiento rápido agranda la cantidad de martensita.

La dureza irá en aumento hasta que el acero se caliente por encima de Ac_3 (hasta una temperatura 30 . . . 50°C superior, o sea hasta el punto 4). Con este modo de calentar el acero se obtiene una estructura austenítica, y al enfriarlo rápidamente, la martensítica.

El temple producido a una temperatura semejante se dice que es total. El calentamiento del acero hipoeutectoide unos 70 . . . 100°C por encima de Ac es nocivo por cuanto ocasiona el crecimiento del grano austenítico y la formación, después del enfriamiento rápido, de martensita en forma de agujas gruesas. Al mismo tiempo la estructura del acero templado conserva una pequeña cantidad de austenita residual. Como resultado decrecen la dureza y las propiedades mecánicas (resistencia a la rotura).

De este modo los aceros hipoeutectoides se someten al temple total, es decir, se calienta hasta una temperatura 30 . . . 50°C superior a Ac_3 .

Tensiones internas en aceros templados Las tensiones internas durante el temple del acero surgen como resultado del enfriamiento no-uniforme de la superficie y el núcleo de la pieza; éstas tensiones se denominan térmicas, y las producidas por la transformación martensítica se llaman estructurales o de fase

Después de que la superficie se enfría y cesa el cambio de volumen, el núcleo continua experimentando tensiones térmicas; a causa de esto las tensiones disminuyen y en determinado instante se produce el cambio de signo de las tensiones en la superficie y en el núcleo. Después del enfriamiento final, en la superficie quedan tensiones remanentes de compresión, y en el núcleo de tracción.

Las tensiones estructurales varían en orden inverso con respecto a las térmicas; como resultado de la transformación martensítica, en la superficie se forman tensiones remanentes de tracción y en el núcleo de tracción

Métodos de temple. El de uso mas amplio es el temple en un solo medio de enfriamiento, que se conoce como temple ininterrumpido. En muchos casos, sobre todo para piezas de forma compleja y la necesidad de disminuir la deformación, se emplean también otros métodos de temple:

- En dos medios.
- Autorrevendido
- Escalonado
- Isotérmico

Los defectos fundamentales que pueden surgir durante el temple son las grietas en la pieza (tensiones internas o externas), deformaciones y torceduras.

En la calidad de medios para templar para los aceros al carbono y de bajo aleación, que tienen alta velocidad crítica de enfriamiento, se emplea el agua a una temperatura de 20-30°C y distintas soluciones, para los aceros aleados con alta estabilidad de la austenita sobre enfriada, se emplea aceite y aire. Para el agua, aceite y otros líquidos hirvientes, al sumergir en ellos el metal caliente, se pueden distinguir tres etapas, que se caracterizan por la distinta intensidad de enfriamiento:

- 1) Al principio alrededor de la pieza que se enfría se forma una camisa de vapor. En esta primera etapa, llamada ebullición en capas, la velocidad de enfriamiento es relativamente pequeña.
- 2) En la siguiente la camisa de vapor se destruye y el líquido en la superficie de la pieza comienza a hervir, es decir, se crea un contacto directo del líquido con la pieza formando burbujas de vapor (etapa de ebullición por burbujeo). El enfriamiento en esta etapa transcurre a gran velocidad.
- 3) Durante el enfriamiento posterior por debajo de la temperatura de ebullición, éste transcurre a una velocidad pequeña y fundamentalmente a cuenta de la convección.

En la Tabla 4, se da el intervalo aproximado de temperaturas de ebullición por burbujeo y la velocidad relativa de enfriamiento en la mitad de este intervalo para diferentes medios de enfriamiento.

El agua como medio para templar posee una gran velocidad de enfriamiento, pero tiene una serie de defectos:

- En primer lugar, el agua tiene una etapa destacada de ebullición en capas, que se extiende a un amplio intervalo de temperaturas.
- En segundo lugar, el poder refrigerante del agua se reduce bruscamente al aumentar su temperatura.

Las propiedades del agua como medio para templar se mejoran agregándole sal común, sosa, álcalis o ácido sulfúrico. En estas soluciones prácticamente se excluye totalmente la etapa de ebullición en capas, lo que acelera el enfriamiento a altas temperaturas y lo hace más uniforme.

Al mismo tiempo, en el intervalo de temperaturas de la transformación martensítica estas soluciones poseen menor poder refrigerante que el agua. La capacidad de temple de las soluciones acuosas de sales y álcalis, como regla general, es menos sensible al cambio de la temperatura.

TABLA 4.- PODER REFRIGERANTE DE DISTINTOS MEDIOS

Medio refrigerante	Intervalo de temperatura de ebullición por burbujeo. °C	Intensidad relativa de enfriamiento en la mitad del intervalo de ebullición por burbujeo.
Agua, 20°C	400 – 100	1
Agua, 40°C	350 – 100	0,7
Agua, 80°C	250 – 100	0,2
Solución al 10% de NaCl en agua a 20°C	650 – 100	3,0
Solución al 50% de NaOH en agua a 20°C	650 – 100	2,0
Aceite mineral 20-200°C	500 - 250	0,3

(Véase la Tabla 4); además, el agua crea una alta velocidad de enfriamiento en la zona de temperatura de formación de martensita (250-300 grados por segundo). Esto es la causa del surgimiento de grandes tensiones estructurales y, por consiguiente, de la deformación de la pieza y la aparición de grietas

El aceite mineral enfría en la zona de transformación perlítica e intermedia en forma más lenta que el agua y las soluciones acuosas. Sin embargo, el aceite como medio para temple posee una serie de cualidades: posee una pequeña velocidad de enfriamiento en el intervalo de temperaturas de la transformación martensítica a causa de su elevada temperatura de ebullición (250-300°C). Esto disminuye la posibilidad de formación de defectos durante el temple. La capacidad de temple del aceite varía insignificadamente con el aumento de su temperatura de 20 a 150°C. El aceite en comparación con el agua enfría en forma más uniforme en todo el intervalo de temperaturas, lo que disminuye las tensiones de temple.

Sin embargo, el aceite se inflama fácilmente y se pone espeso con el tiempo, lo que disminuye su capacidad de temple.

Finalmente, algunos aceros de alta aleación se templean durante el enfriamiento en aire tranquilo o húmedo que se insufla a presión. En este caso se consigue la mínima deformación.

Templabilidad del acero. Por templabilidad se entiende la capacidad de un acero dado de aumentar su dureza como resultado del temple

La templabilidad del acero está determinada fundamentalmente por el contenido de carbono. Mientras mayor es la cantidad de carbono, más alta es la dureza después del temple.

6.6 Revenido

Se llama revenido al calentamiento del acero templado hasta una temperatura no superior a A_{c1} , su exposición a esta temperatura, y el enfriamiento posterior a una velocidad dada. El revenido es una operación final del tratamiento térmico; como resultado del revenido el acero:

- Adquiere las propiedades mecánicas requeridas.
- Se eliminan total o parcialmente las tensiones internas que aparecen durante el temple, estas tensiones se eliminan mayormente mientras más alta es la temperatura de revenido.

Las tensiones se reducen como resultado de la exposición a temperaturas durante 15 ó 30 minutos; después de 1.5 horas de duración, las tensiones descienden hasta su magnitud mínima, que puede alcanzarse por medio del revenido a una temperatura dada.

La temperatura de revenido ejerce una influencia considerable en las propiedades obtenidas, por lo que se distinguen tres tipos de revenido.

- Revenido a baja temperatura que se realiza con un calentamiento hasta 150-250°C. Este revenido disminuye las tensiones internas, trasladando la martensita de temple a la martensita de revenido; este revenido eleva la resistencia y mejora un poco la viscosidad sin que baje sensiblemente la dureza.
- Revenido a temperatura media que se realiza a 350-500°C, se emplea para resortes y ballestas. Este revenido asegura el más alto límite de elasticidad y aumenta un poco la viscosidad.
- Revenido a 500-680°C; éste revenido elimina casi por completo las tensiones internas y aumenta considerablemente la resistencia. En este caso, la resistencia y dureza disminuyen pero se conservan bastante más elevadas que después del recocido.

El revenido es un proceso de calentamiento del acero templado, a una temperatura por debajo de la temperatura crítica, seguido de un enfriamiento a una velocidad conveniente.

El objetivo del revenido es relajar las tensiones internas de temple, así como llevar la pieza a una estructura que presente mayor resistencia al impacto, sacrificando algo la dureza alcanzada en el temple.

Si en el acero endurecido está presente austenita retenida, el revenido servirá para producir una descomposición isotérmica de la austenita a bainita.

En general, se puede decir que dentro del amplio intervalo de temperaturas de revenido, a medida que aumenta la temperatura disminuye la dureza y aumenta la tenacidad del acero.

Se pueden separar las temperaturas de revenido en varios intervalos Una temperatura de revenido comprendida entre 35 y 200°C induce la precipitación de un carburo de transición ϵ (Fe_2C), lo que produce un aumento en dureza, particularmente en aceros de alto carbono.

En el intervalo entre 200 y 400°C continua la precipitación y el crecimiento del carburo de transición, a la vez que se transforma la austenita retenida, que pudiera existir en la estructura, a bainita inferior. Los carburos que se forman, debido a su tamaño pequeño, no son reconocibles por medio del microscopio óptico, pero dan a la estructura atacada con el reactivo de nital un color oscuro muy intenso. Antiguamente se decía que esta estructura estaba constituida por trustita. Sin embargo, si se le observa a 9,000 aumentos (microscopio electrónico), el carburo precipitado se ve claramente. Parte de los carburos han precipitado en los bordes de las agujas de martensita originales.

El revenido entre 400 y 650°C se caracteriza por la transformación del carburo de transición a cementita, al mismo tiempo que continua el crecimiento de los carburos. Esta aglomeración de las partículas de carburo permite observar la matriz ferrítica más limpia, por lo que las estructuras atacadas tienen un color más claro. Esta estructura se conocía antiguamente como sorbita y los carburos pueden ser reconocibles a la observación microscópica a 500 aumentos.

Si se eleva la temperatura de revenido aún más, en el intervalo entre 650 y 725°C, se produce la formación de partículas grandes de cementita globular. Esta estructura es muy blanda y tenaz y es similar a la estructura formada por cementita esferoidal, obtenida directamente a partir de la perlita durante un recocido de globulización.

Durante muchos años los metalurgistas dividieron el proceso de revenido en etapas perfectamente delimitadas y las microestructuras que se formaban recibieron los nombres de fantasía de trustita y sorbita. Sin embargo, las variaciones de estructura tienen lugar de una manera tan gradual en función de la temperatura y el tiempo, que parece más lógico llamar a los productos que se obtienen por revenido, a cualquier temperatura, martensita revenida.

Como resultado del temple efectuado correctamente, se obtiene la estructura de martensita con una dureza y resistencia a la rotura altas, pero con índices bajos de ductilidad y tenacidad. Con el fin de disminuir la dureza y resistencia a la rotura, relajar los esfuerzos internos, elevar la tenacidad y ductilidad, así como para obtener una estructura más equilibrada, las piezas se someten al revenido.

Se llama revenido el calentamiento del acero por debajo de la temperatura A_c , la duración del calentamiento a una temperatura preestablecida y el enfriamiento posterior con velocidad dada (por lo general, al aire). La relajación de los esfuerzos en las piezas templadas será tanto mayor, cuanto más alta sea la temperatura de revenido.

La velocidad de enfriamiento durante el revenido también influye en la magnitud de las tensiones remanentes.

Cuanto más lento sea el enfriamiento, tanto menor magnitud tendrán las tensiones. Un enfriamiento brusco en agua desde la temperatura de 600°C crea nuevos esfuerzos térmicos.

El enfriamiento al aire durante el revenido produce 7 veces menos esfuerzos de compresión y el enfriamiento por aceite 2.5 veces menos que el enfriamiento por agua. Por esta razón durante el revenido el acero se suele enfriar por aire.

Tipos de revenido

El revenido a baja temperatura se produce en el intervalo de temperaturas de 80 . 200°C y no ocasiona cambios apreciables en la microestructura. Durante el revenido el grado de tetragonalidad disminuye en la red cristalina de martensita en virtud de que el carbono se desprende de ella en forma de carburo. La red cristalina de carburo está en enlace coherente con la de martensita, o sea algunos planos cristalográficos suyos son comunes. Debido al enlace coherente la dureza del acero no disminuye en este caso, mientras que los esfuerzos internos se relajan. A consecuencia del revenido a baja temperatura, la martensita de temple se convierte en la martensita de revenido, la cual tiene una resistencia y ductilidad elevadas y una dureza alta. La martensita de revenido es más susceptible al ataque químico que la martensita de temple.

El revenido intermedio (a temperaturas medias) se produce a las temperaturas de 350 . 500°C . A una temperatura superior a 300°C los procesos difusivos se intensifican, el carburo se transforma en cementita, la cual se separa de la red de solución sólida. La formación de cementita y el engrosamiento de su grano van acompañados de la disminución de la dureza y del aumento de la ductilidad y tenacidad. Como consecuencia del revenido se origina una mezcla dispersa de ferrita y cementita, cuya estructura es de cementita granular.

7. TRATAMIENTO QUIMICO - TERMICO

Se llama tratamiento químico – térmico a la saturación superficial del acero con determinado elemento (por ejemplo con carbono, nitrógeno, aluminio, cromo y otros), por difusión desde el medio ambiente, efectuada a alta temperatura.

7.1 Cementación

Se llama cementación al proceso de saturación de la capa superficial del acero con carbono; se distinguen dos tipos fundamentales de cementación.

- Sólida
- Gaseosa

El objetivo principal de la cementación es la obtención de una superficie de alta dureza, que tenga alta resistencia al desgaste; se logra por el enriquecimiento de la capa superficial con carbono hasta una concentración de 0.8 a 1.0% y su temple posterior; la cementación también aumenta el límite a la fatiga

Los aceros al carbono y aleados con un contenido de 0.18% de C son sometidos a cementación, aunque en piezas de gran tamaño se emplean aceros con mayor contenido de carbono (0.2 a 0.3%).

La cementación tiene como propósito comunicar alta dureza a la superficie de la pieza, permaneciendo dúctil el núcleo. Este procedimiento hace que se eleven la resistencia al desgaste y el límite de fatiga.

El proceso de cementación consta de tres etapas:

- La de disociación, que consiste en la descomposición de las moléculas del monóxido carbónico y en el surgimiento de átomos activos de carbono.
- La de adsorción, o sea, los átomos de carbono se concentran en la superficie de una pieza de acero estableciendo enlace químico con los átomos del metal.
- La de difusión, es decir la penetración de los átomos de carbono al interior del metal.

El espesor de la capa de difusión depende de la temperatura de calentamiento, de su duración al saturar y concentrar el carbono en la superficie.

Se someten a cementación las piezas fabricadas con acero pobre en carbono (el contenido de carbono no supera el 0.25%) que han de soportar desgaste por contacto y cargas alternativas.

La cementación se produce a temperaturas superiores al punto Ac (900 a 950°C). Cuanto menos carbono contiene el acero, tanto más alta debe ser la temperatura de calentamiento para la cementación. Debido al cementado la capa

superficial posee un 0.8 . . . 1.0% de carbono. Una concentración más alta de carbono hace que la capa cementada sea más frágil.

7.2 Nitruración

Con la nitruración de los aceros (saturación de la superficie con nitrógeno) se obtiene:

- Aumento de dureza de la capa superficial
- Aumento de la resistencia al desgaste
- Aumento del límite de fatiga
- Aumento de la resistencia a la corrosión en medios como aire, agua, vapor, etc.

Se denomina nitruración el proceso de saturación de la superficie del acero con nitrógeno. El proceso se lleva a cabo en un medio de amoníaco a la temperatura de 480 . . . 650°C. A estas temperaturas el amoníaco se disocia desprendiendo nitrógeno elemental, el cual difunde en las capas superficiales de la pieza:



A la nitruración se someten los aceros aleados de contenido medio de carbono que poseen, además, aluminio, cromo, molibdeno, vanadio. Durante la nitruración el nitrógeno origina con los elementos de aleación nitruros estables que comunican a la capa nitrurada una alta dureza. La dureza de la capa superficial de las piezas, después de la nitruración, alcanza HV 11.000 . . . 12.000 Mpa.

Antes de la nitruración las piezas se tratan térmicamente por temperatura. Luego la pieza se somete a maquinado para obtener las dimensiones definitivas.

Las zonas no sujetas a la nitruración se protegen por una capa delgada (0.01 . . . 0.015) de estaño depositado por el método electrolítico, o se cubren de vidrio líquido. Al producirse la nitruración el estaño se funde y, merced a la tensión superficial, se retiene, en la superficie del acero, en forma de película delgada impermeable al nitrógeno. La duración del proceso depende de la profundidad de la capa.

La dureza de la capa nitrurada se conserva durante el calentamiento a altas temperaturas (600-650°C), mientras que la dureza de la capa cementada, que tiene estructura martensítica, se conserva solo hasta 200-225°C.

La nitruración se usa en piezas como engranajes, cilindros de motores de alta potencia, muchas piezas de máquinas herramientas y otras.

7.3 Cianuración

Se llama cianuración a la saturación conjunta de la superficie del acero con carbono y nitrógeno; por lo general se emplean aceros que contienen de 0.3 a 0.4% de C; distinguiéndose:

- Cianuración líquida.
- Cianuración gaseosa o nitrocementación.

En la cianuración líquida la pieza se calienta de 820 a 960°C en sales fundidas que contienen cianuro sódico NaCn.

Después de la cianuración las piezas se enfrían al aire, luego se templen con un calentamiento en baño de sales o en horno y se someten a revenido a baja temperatura.

Nitrocementación (cianuración gaseosa)

Durante la nitrocementación (cianuración gaseosa) la pieza se calienta de 850 a 870°C en una mezcla gaseosa, compuesta de gas carburante y amoníaco, el tiempo de duración del proceso es de 2 a 10 horas, para la obtención de una capa de 0.25 a 1.0 mm de espesor.

Después de la nitrocementación la pieza inmediatamente se temple y enseguida se efectúa el revenido a 160-180°C.

7.4 Metalización por Difusión

La saturación superficial del acero con aluminio, cromo, boro y otros elementos se conoce como metalización por difusión o metalización superficial.

La pieza cuya superficie esta saturada con estos elementos tiene valiosas propiedades como:

- Alta resistencia al fuego.
- Resistencia a la corrosión
- Elevada resistencia al desgaste
- Alta dureza

7.5 Cromado del Acero

El cromado, es decir la saturación de la superficie de piezas de acero con cromo, garantiza.

- Alta resistencia a la corrosión gaseosa (resistencia a la formación de cascarilla) hasta una temperatura de 800°C.

- Alta resistencia a la corrosión en agua, agua de mar y ácido nítrico.
- Aumento de la resistencia al desgaste en aceros con alto contenido de carbono.

7.6 Aceros para Herramientas

Los aceros para herramientas son aceros aleados y aceros al carbono con alta dureza y resistencia a la fatiga y al desgaste. Los aceros para herramientas se suelen clasificar de acuerdo con la resistencia térmica y la aplicación.

Se entiende por resistencia térmica (resistencia al rojo) la aptitud del acero para conservar a temperaturas elevadas alta dureza y resistencia al desgaste

Sobre la resistencia térmica influyen la resistencia de la matriz metálica (de la solución sólida) a la descomposición durante el calentamiento, es decir su composición; la naturaleza y el grado de dispersión de los compuestos intermetálicos y carburos desprendidos de la solución sólida y la resistencia de éstos a la coagulación, para un calentamiento más intenso (a más de 600 . . . 650°C), la temperatura de transformación de fase (a y) de la solución sólida.

Según la resistencia térmica, los aceros para herramientas se dividen en tres grupos: los que no poseen resistencia térmica, los semitermorresistentes y los termorresistentes.

Los aceros termorresistentes adquieren una dureza alta como resultado de la transformación martensítica durante el temple. Pero no son lo suficientemente resistentes al desgaste y al revenido. Al calentar la herramienta a una temperatura mayor de 200 . . . 300°C, la martensita se descompone totalmente y buena parte de la cementita en precipitación coagula. En cuanto a la composición química éstos son los aceros al carbono y los de baja aleación.

Los aceros semitermorresistentes adquieren alta dureza y resistencia a la rotura debido a la transformación martensítica durante el temple. No obstante, ellos continúan conservando su alta dureza hasta las temperaturas de 450 . . . 500°C a causa de una resistencia más alta de la cementita aleada y de los carburos especiales.

Según la composición química, éstos son los aceros que contienen 0.5 . . . 0.6% de carbono y 3 . . . 8% de cromo.

8. EFECTO DE ALGUNOS ELEMENTOS

Las cualidades de los hierros y aceros varían notablemente, no sólo según el carbono que contienen, sino por la influencia de otros elementos que entran en su composición.

El silicio en la fundición favorece la formación de grafito, y, por lo tanto, evita el que la fundición, cuando se refunde, pase de gris a blanca. En pequeña proporción se añade a los aceros duros aumentando su resistencia a la tracción (acero de resortes).

El manganeso obra al revés, favoreciendo la formación de fundición blanca. Además, en la conversión de la fundición en acero obra como desoxidante, porque se combina el oxígeno más fácilmente con él que con el hierro. El manganeso en los aceros duros favorece la formación de un grano compacto.

El fósforo hace la fundición quebradiza, pero muy fluida, por lo cual las fundiciones fosforosas sirven para objetos finos y artísticos. En el acero el fósforo lo hace agrio o quebradizo en frío. En caliente su acción se deja sentir más. Los minerales fosforosos no pueden servir para el Bessemer; debe emplearse un convertidor básico llamado Thomas, que favorece la eliminación del fósforo en forma de fosfatos. El acero dulce no debe tener más de 0.1 por 100 de fósforo, y en aceros de buena calidad suele exigirse menos de 0.04 por 100.

El azufre hace la función pastosa y disminuye su resistencia.

En el hierro dulce hasta 0.02 por 100 de azufre para hacerlo agrio; en aceros dulces y hierros corrientes se admite hasta 0.05, pero en aceros de calidad se prescribe menos de 0.04 y, a veces, de 0.025.

Para separar el azufre del cok sirve la cal, que se echa en el alto horno y forma sulfuro de cal muy fusible, que se va con la escoria.

El níquel aumenta mucho la resistencia del acero y, además, su límite de elasticidad sin aumentar la dureza. Una cualidad característica de los aceros al níquel consiste en que la relación $E : R$ entre el límite aparente de elasticidad y la resistencia a la ruptura es mucho más elevada que en los aceros corrientes o al carbono. Las planchas de blindaje suelen tener 3 a 4 ½ por 100 de níquel. En ciertos ejes cigüeñales de máquinas suele haber de 2 a 2 ½ por 100.

El cobalto produce un efecto análogo.

El cromo aumenta la dureza y resistencia del acero. Los aceros al cromo sirven para piezas que han de soportar fuertes presiones. En pequeña proporción (menos de 1 por 100, se añade a aceros que tienen de 2 a 3 por 100 de níquel, mejorando así su resistencia y su dureza. En cambio, añadido al acero en proporción de 13 por 100 y acompañado de un 2 a 2.5 por 100 de níquel, da lugar a los aceros inoxidable que se usan especialmente en cuchillería.

El vanadio en proporción inferior al 1 por 100 aumenta el límite elástico y la carga de ruptura de los aceros, pero con este solo objeto se usa poco por su elevado precio. Su principal aplicación consiste en añadirlo a los aceros al cromo, formando los aceros al cromo-vanadio, que se caracterizan por su gran resistencia

a la fatiga (esfuerzos intermitentes o alternativos repetidos). El molibdeno produce un efecto análogo.

El aluminio hasta 0.1 por 100 hace el hierro más blando. En mayor proporción (alrededor del 1 por 100) se añade a los aceros al cromo o al cromo-níquel que deben someterse al endurecimiento por nitruración. En la fundición del acero se echa aluminio en la cuchara para actuar como desoxidante.

El tungsteno se añade al acero en proporciones hasta 24 por 100, y a veces más, dando lugar a los llamados aceros rápidos. Para economizar este metal, se sustituye, en parte, por el molibdeno.

9. CLASIFICACIONES Y TIPOS DE ACEROS

Los aceros suelen clasificarse mediante los sistemas AISI y SAE (Tabla 5), los cuales usan una cantidad de cuatro o cinco dígitos. Los primeros dos números se refieren a los dos elementos de aleación más importantes y los dos o tres últimos números indican el porcentaje de carbono. Un acero AISI 1040 es un acero con 0.40% de C, sin otros elementos aleantes. Igualmente, un acero SAE 10120 es un acero que contiene 1.20% de C. Un acero AISI 4340 es un acero aleado que contienen 0.40% de C. El 43 indica la presencia de otros elementos aleantes.

Comúnmente se aplican cuatro tratamientos térmicos para los aceros. Tales tratamientos térmicos se usan para lograr uno de tres objetivos.

Recocido en proceso –eliminación del trabajo en frío. La ferrita en aceros con menos de 0.25% de C se endurece mediante labrado en frío. El tratamiento térmico de recristalización utilizado para eliminar el efecto del trabajo en frío se denomina recocido en proceso. El recocido se efectúa entre 80°C y 170°C por debajo de la temperatura A_1 (temperatura del eutectoide).

Recocido y normalizado –control del endurecimiento por dispersión. Los aceros de bajo carbono son endurecidos por dispersión mediante el control de la cantidad, tamaño, forma y distribución de Fe_3C . Cuando se incrementa el carbono, se encuentra más Fe_3C presente y en este punto, se incrementa la resistencia del acero (Figura I-10).

Es posible refinar el Fe_3C controlando la velocidad de enfriamiento cuando la austenita se transforma en perlita. Si se permite un enfriamiento muy lento desde la temperatura austenítica, la perlita es gruesa este tratamiento térmico se denomina recocido completo. Un enfriamiento rápido al aire produce perlita fina, y este tratamiento térmico es el de normalizado.

1. Los aceros hipoeutectoides son recocidos calentándolos 30°C por encima de la temperatura A_3 para producir austenita homogénea. Este es el tratamiento de austenitización. Después el acero es enfriado en un horno. Permitted que

tanto el horno como el acero se enfrien juntos, se producen bajas velocidades de enfriamiento. Puesto que se dispone de mucho tiempo para la difusión, la ferrita primaria y la perlita son gruesas y el acero tiene baja resistencia mecánica y adecuada ductilidad.

2. Los aceros hipereutectoides son recocidos calentándolos primero 30°C por encima de A_3 . El acero no se calienta más allá de A_{cm} , para reducirlo todo a austenita debido a que, en un enfriamiento lento, el Fe_3C formaría una capa continua en los bordes de grano de la austenita y causaría fragilización. La austenitización justo por encima de A_1 permite la formación de carburos (Fe_3C) redondeados. Después del austenitizado, el acero se enfría en el horno para producir Fe_3C discontinuo y perlita gruesa.
3. Los aceros se normalizan calentándolos hasta 55°C por encima de A_3 o de A_{cm} , dependiendo de la composición del metal. Después del austenitizado, el acero se saca del horno y se enfría al aire. Tal enfriamiento proporciona mayores velocidades de enfriamiento y perlita más fina. El acero hipereutectoide puede ser normalizado por encima de A_{cm} porque, debido a la mayor rapidez de enfriamiento, el Fe_3C tiene menor oportunidad de formar una capa continua en los límites de grano de la austenita.

Esferoidización –mejoramiento de la maquinabilidad Los aceros de alto carbono, que contienen una gran cantidad de Fe_3C , tienen características de maquinabilidad deficientes. Durante el tratamiento de esferoidización, lo que requiere tiempos prolongados (12 a 15 h) a unos 30°C por debajo de A_1 , el Fe_3C se aglomera en partículas esféricas para reducir el área de frontera. La microestructura, conocida como esferoidita, tiene ahora una matriz continua de ferrita blanda y maquinable. Después del maquinado, el acero recibe un tratamiento térmico más complejo para producir las propiedades requeridas.

Aceros inoxidables ferríticos. Estos aceros ferríticos contienen más de 30% de Cr y menos de 0.12% de C. Debido a la estructura CC, los aceros inoxidables ferríticos tienen buena resistencia mecánica y moderada ductilidad derivada del endurecimiento por solución sólida y el endurecimiento por deformación. Cuando los contenidos de carbono o de cromo son ambos altos, la precipitación de partículas de carbono proporciona un endurecimiento por dispersión, pero también fragiliza la aleación. Los aceros inoxidables ferríticos tienen excelente resistencia a la corrosión, una moderada conformabilidad y son relativamente baratos.

Aceros inoxidables martensíticos Una aleación 17% Cr-0.5%C calentada a 1200°C produce 100% de austenita, la cual se transforma en martensita en el templado. La martensita es luego revenida para producir altas durezas y resistencias manteniendo una adecuada resistencia a la corrosión. Estos aceros tienen excelente templabilidad y resisten el ablandamiento a temperaturas elevadas, haciendo a las aleaciones útiles para aplicaciones como cuchillos de alta calidad, balas para rodamientos y válvulas.

El contenido de cromo es usualmente menor que 17%; de otra forma el campo de la austenita se hace tan pequeño que se requiere un control muy estricto sobre la temperatura de austenitización y el contenido de carbono. Los contenidos más bajos de cromo permiten también que el contenido de carbono varíe de aproximadamente 0.1% a 1.0%, permitiendo que se produzca martensitas de diferentes durezas.

Aceros inoxidable austeníticos. El níquel es un elemento estabilizador de austenita, incrementa el tamaño del campo de austenita pero casi elimina la ferrita de las aleaciones hierro-cromo-carbono. Si el contenido de carbono es inferior a 0.03%, los carburos no se forman y el acero es casi todo austenítico a temperatura ambiente.

Los aceros austeníticos CCC tienen excelente ductilidad, conformabilidad y resistencia a la corrosión. La resistencia se obtiene por un endurecimiento extenso por solución sólida, y los aceros inoxidable austeníticos pueden ser trabajados en frío para obtener resistencias mayores que las de los aceros inoxidable ferríticos. Estos aceros tienen excelentes propiedades al impacto a bajas temperaturas, puesto que no presentan temperatura de transición frágil-ductil. Más aún, los aceros inoxidable austeníticos no son ferromagnéticos como los ferríticos y martensíticos. Desafortunadamente, los altos contenidos de níquel y de cromo hacen costosas a estas aleaciones.

TABLA I-5.- COMPOSICIONES DE ALGUNOS ACEROS AISI-SAE ---

Clasificación AISI-SAE	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Otros
1020	0.18-0.23	0.30-0.60				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13% S
1340	0.38-0.43	1.60-1.90	0.15-0.30			
1541	0.36-0.44	1.35-1.65				
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25% Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30% Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30% Mo
4820	0.18-0.23	0.50-0.70	0.15-0.30	3.25-3.75		0.20-0.30% Mo
5120	0.17-0.22	0.70-0.90	0.15-0.30		0.70-0.90	
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
6150	0.48-0.53	0.70-0.90	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15% min V
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25% V
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

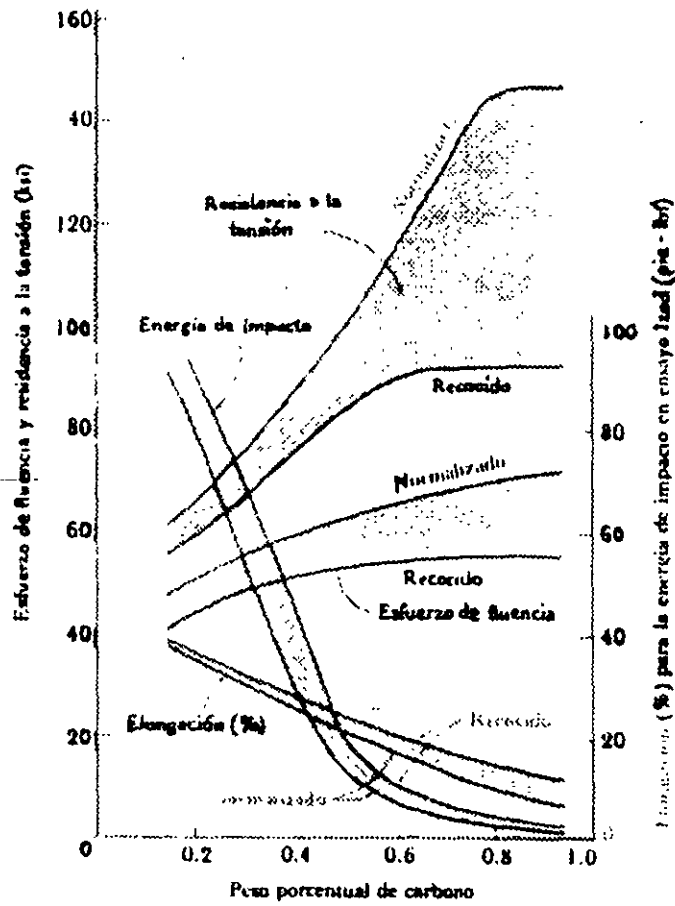


FIGURA I-10.- EFECTO DEL CARBONO Y DEL TRATAMIENTO TÉRMICO EN LAS PROPIEDADES DE LOS ACEROS AL BAJO CARBONO

II. RECOMENDACIONES GENERALES DE MANTENIMIENTO DE CALDERAS

Cuando una caldera esta limpia y hermética o estanca, tiene un mantenimiento apropiado, a primera vista esto parece simple, pero "limpia y hermética" se aplica a todo el campo del mantenimiento de la caldera.

"Limpia" se aplica tanto al interior como al exterior de los tubos, cubierta y domos, así como a paredes, mamparas y cámara de combustión. "Hermética" se refiere a toda la sección de presión, montaduras, mamparas, etc.

Cuando las superficies de calentamiento de una caldera están libres de incrustación en el lado del agua y de depósitos de hollín y cenizas en el lado de gases, entonces rápidamente absorbe calor, y cuando la caldera está libre de fugas de agua y vapor, fugas de aire, fugas de aire en las montaduras y fugas de gases a través de las mamparas, entonces la caldera está en excelentes condiciones, sin embargo, en la operación completa también se debe considerar el equipo de combustión, los accesorios y los auxiliares

Las calderas se construyen de diferentes materiales para soportar las condiciones encontradas en el servicio; los revestimientos refractarios en el hogar tienen muy poca resistencia a la tensión, pero pueden soportar altas temperaturas y resistir la acción penetradora de la ceniza. Por otra parte, el acero empleado en las partes a presión tiene alta resistencia a la tensión, sin embargo, se debe ejercer mucho cuidado para asegurar que no se exceden sus límites de temperatura

El diseñador de calderas debe seleccionar los materiales para las varias partes de la caldera que sean adecuados para los requerimientos específicos; si la selección de materiales es correcta y la unidad se mantiene y opera de acuerdo con la buena práctica reconocida, el servicio será satisfactorio. Cuando fallas de operación, temperaturas excesivas u otras condiciones anormales causan que se excedan los límites de seguridad del material, las fallas ocurrirán rápidamente y el equivalente a años de deterioro normal puede tener lugar en corto tiempo.

Es imposible predecir el efecto del bajo nivel de agua sobre el mantenimiento; si únicamente los extremos superiores de los tubos son los expuestos, el efecto del problema es solo fugas en las juntas expandidas. Esto puede ser corregido por una re-expansión, siempre que el inspector haya decidido que el metal en el tubo y en el espejo del tubo no se hayan dañado. Por otra parte, el bajo nivel de agua puede necesitar un trabajo completo de re-entubado o aún causar una explosión de la caldera, matando personal y causando desastres en la planta.

El medio más efectivo de conservar la caldera en operación es el de prestar atención al nivel de agua; los cambios rápidos en la temperatura causan expansión desigual, que pueden resultar en fugas de agua y vapor en la sección de presión de la caldera, y fugas de aire y gases en la montadura y mamparas.

Se han encontrado que el sacar de servicio y volver a arrancar una caldera con mucha frecuencia y rapidez incrementa el mantenimiento mas que muchas horas de servicio y grandes cantidades de vapor generado; con objeto de reducir las salidas y el mantenimiento, siempre debe darse tiempo para que la temperatura cambie lenta y uniformemente.

La distribución desigual de la combustión en el hogar, referida algunas veces como choque (impingement) de flama, puede resultar en varias dificultades, a pesar de que el régimen promedio de combustión pueda no exceder la especificación del fabricante, se pueden sobrecargar porciones localizadas del hogar. Esto causará altas temperaturas, formación de escoria y falla rápida del revestimiento del hogar. Casos severos de choque de flama, cuando son acompañados por mala circulación de agua en la caldera o por depósitos de incrustación, resultan en tubos de agua quemados, en hogares enfriados con agua de alto régimen, se ha encontrado que la superficie exterior de los tubos se corroe hasta que se vuelven tan delgados que se queman. Este tipo de fallas ha ocurrido cuando los hogares se operan a alta temperatura y con bajo o cero % de exceso de aire, el choque de flama se previene con un mantenimiento y operación correctos del equipo de combustión.

Cuando se tienen depósitos de incrustación en los tubos y envolventes de la caldera, el agua no puede remover el calor y el metal alcanza una temperatura suficientemente alta que reduce su resistencia a la tensión; dependiendo de las condiciones, esto puede causar una ampolla, falla del tubo o explosión de la caldera. El sobrecalentamiento hace necesario re-entubar la caldera, parchar las piernas de agua, cabezales y domo, el mejor método de evitar estas dificultades es el acondicionamiento del agua de caldera para prevenir la formación de incrustaciones.

Cuando una pérdida de equipo o la operación descuidada permite que se forme incrustación, ésta debe ser removida porque de otra forma resultará pérdida de eficiencia y salida de la caldera; las calderas deben programarse para sacarlas de servicio para limpieza, antes de que sean forzadas por fallas de tubos. Hay dos métodos para remover la incrustación de las superficies de calentamiento de las calderas.

- Mecánico, que consiste en pasar un cortador o un golpeador, impulsado con potencia o motorizado, a través de los tubos
- Químico, que usa materiales que disuelven parcial o totalmente la incrustación, es decir, la remueve de las superficies.

Los limpiadores mecánicos consisten de pequeños motores impulsados con vapor, aire o agua; el motor es suficientemente pequeño para pasar a través del tubo que va a ser limpiado. Una manguera conectada a un extremo del motor sirve para dos propósitos:

- Suministro de vapor, aire o agua.
- Un medio por el cual el operador "alimenta" la unidad a través del tubo y la saca cuando se completa la limpieza.

En la Fig. 1-a, se muestra un limpiador de tubos con una cabeza golpeadora, para uso en calderas de tubos de humo, la rotación del motor del limpiador causa que la cabeza vibre en el tubo con suficiente fuerza para romper la incrustación dura del exterior. Esta cabeza golpeadora es algunas veces efectiva para remover la incrustación muy dura de las calderas de tubos de agua.

En la Fig. 1-b, se muestra una cabeza cortadora que se emplea mas frecuentemente en la limpieza de incrustación en las calderas de tubos de agua; las cabezas de éste tipo tienen un cierto número de cortadores hechos de acero de herramienta mucho muy duro. Las cabezas se giran a alta velocidad, y la fuerza resultante presiona al cortador contra la superficie interior del tubo, aplastando y cortando la incrustación.

Cuando se emplean limpiadores mecánicos de tubos para quitar la incrustación de tubos, se deben tomar varias precauciones para obtener los mejores resultados:

- El motor limpiador de tubos debe ser del tamaño correcto para ajustarse al tubo
- Están disponibles arreglos especiales de motores y juntas universales para la limpieza de tubos curvos
- El aire comprimido es lo mas satisfactorio para la operación de estos motores a pesar de que a veces se emplea vapor o agua.
- Se conecta un lubricador a la entrada de la manguera para suministrar aceite para lubricación del motor
- Durante la operación de limpieza se debe introducir una corriente de agua al tubo para enfriar el motor y la cabeza del cortador y lavar y retirar la incrustación conforme se remueve del tubo.
- El operador alimenta el limpiador dentro de los tubos conforme se remueve la incrustación.
- El régimen de alimentación depende de la velocidad a la que se remueve la incrustación y debe determinarse mediante pruebas
- Los operadores experimentados pueden saber por el sonido del motor cuando el cortador ha quitado la incrustación y está en contacto con los tubos
- La inspección de cada tubo se hace alumbrando a través de este y observando el interior.
- Nunca se permita que el limpiador opere en un mismo lugar aún por corto tiempo o se dañará el tubo.

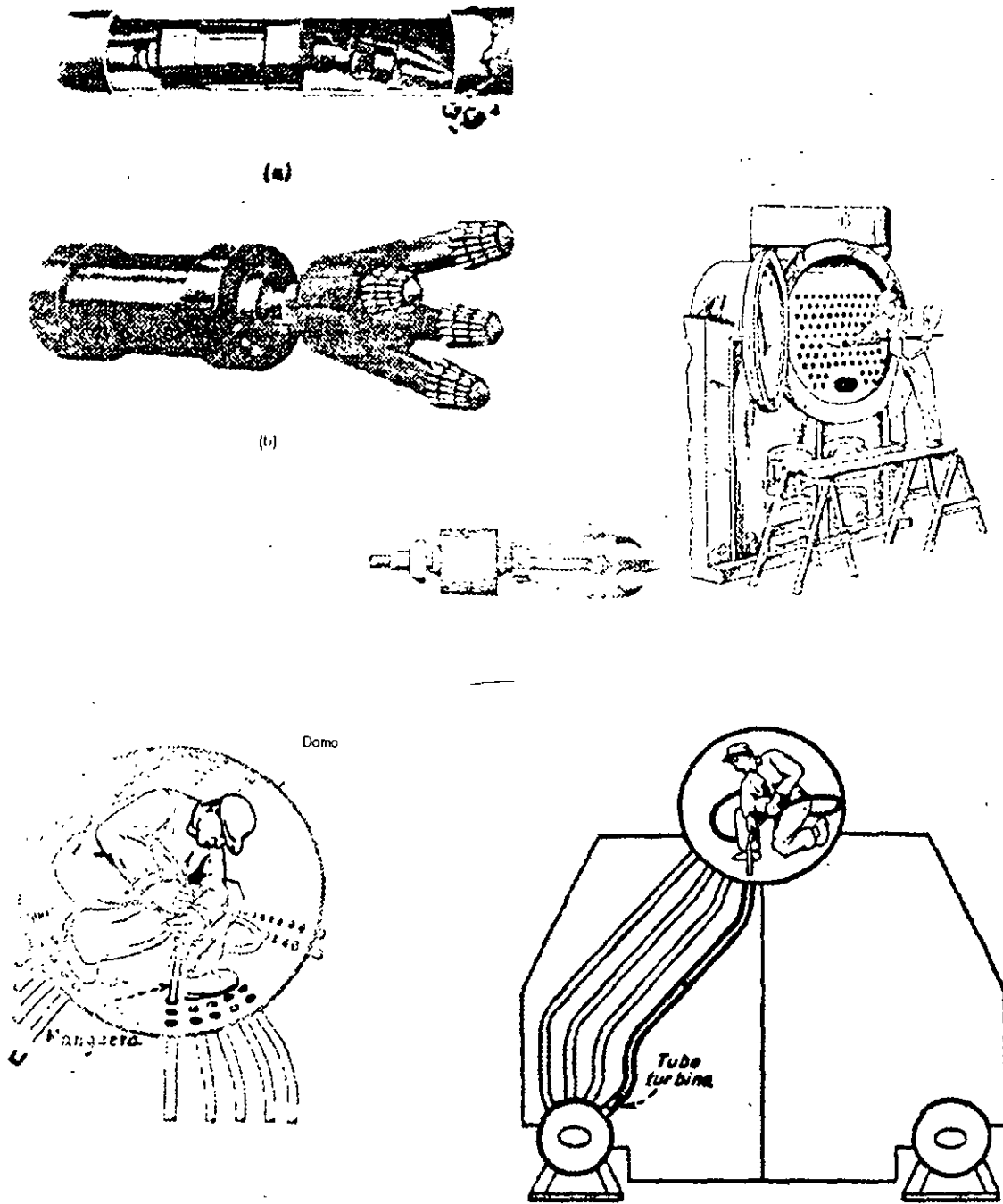


FIG. II-1.- LIMPIADORES DE TUBOS DE CALDERAS

- En tubos de caldera curvos el operador permanece en el domo superior mientras se está limpiando el tubo.
- En calderas de tubos rectos las cubiertas de los registros de mano deben retirarse para ganar acceso a los tubos
- El domo inferior, los cabezales inferiores y las líneas de purga deben limpiarse completamente para remover la incrustación, antes de que la caldera se regrese a servicio

Los procedimientos de limpieza química han sido aplicados satisfactoriamente al interior de las calderas y cambiadores de calor; éste método de limpieza se adapta particularmente a unidades con tubos curvos o pequeños. La limpieza mecánica es tediosa y consumidora de tiempo, pero la limpieza química puede hacerse en cosa de horas aún en unidades grandes, éste decremento en el tiempo de salida es un factor importante.

La limpieza química es hecha segura y satisfactoriamente por especialistas que suministran un servicio completo; muestras de incrustación se obtienen de los tubos empleando un limpiador mecánico u otro medio adecuado. Estas muestras se analizan y después que ha sido identificado el tipo de incrustación se especifica la solución correcta de limpieza, éstas soluciones consisten de ácidos con materiales agregados conocidos como "aceleradores" para asegurar el ataque sobre la incrustación, y otros materiales conocidos como "inhibidores" para disminuir el ataque sobre el metal de la caldera, es decir la solución se hace selectiva de manera que disuelva la incrustación particular sin corroer la superficie del metal.

La selección de la solución limpiadora involucra un conocimiento no solo de la incrustación sino también del material del cual esta fabricada la caldera o el cambiador de calor, las consideraciones para la limpieza química incluyen lo siguiente:

- Tipo y concentración de la solución solvente a ser usada
- Cantidad y tipo de acelerador
- Cantidad y tipo de inhibidor
- Temperatura a la cual se aplicará el solvente
- Tiempo que la solución permanecerá en contacto con el material
- Método de aplicación
- Las precauciones de seguridad involucradas son la prevención de que el solvente y la solución neutralizadora no entren en contacto con el personal y el posible peligro debido a la formación de gases explosivos o venenosos

Para una aplicación efectiva se requiere equipo especial en la forma de trailers tanque, bombas y cambiadores de calor; la unidad que va a limpiarse se llena con el solvente en el menor tiempo posible y entonces se circula el solvente a través de la unidad y el cambiador de calor para mantener la temperatura necesaria.

Durante la operación se analiza la solución para checar el avance de la limpieza; cuando los análisis muestran que la unidad está limpia, se remueve el solvente y se introduce la solución neutralizante. Después que la unidad ha sido drenada y lavada con agua, se encuentra lista para el servicio.

La limpieza ácida produce buenos resultados no sólo en el tipo usual de incrustación fácil de remover, sino aún las formas difíciles de sílice y plateado de cobre se remueven satisfactoriamente.

Los depósitos de compuestos de sílice en las calderas de alta presión han sido muy difíciles de remover con limpiadores mecánicos, el cobre disuelto de los tubos de calentadores de agua de alimentación se deposita en las calderas causando incrustación y corrosión.

A diferencia de la limpieza mecánica, la limpieza ácida remueve la incrustación de cabezales, tubos y domos; la limpieza química ha ganado mucho terreno para reducir el tiempo y el trabajo penoso involucrado en la remoción de incrustación y en la actualidad es el método primario de limpieza.

Las calderas se diseñan y construyen para una producción o potencia máxima, pero cuando ésta se excede se incrementa el mantenimiento. Altos regímenes de generación de vapor puede perturbar o desorganizar la circulación en la caldera, y cuando esto ocurre se tienen las siguientes consecuencias:

- El calor no es retirado y el metal se sobrecalienta.
- El alto régimen de flujo de vapor puede causar que se arrastre humedad con el vapor que sale del domo de la caldera.
- Las altas temperaturas de gases pueden quemar o distorsionar las mamparas y los ductos.
- Se pueden formar escoria en el hogar o en los tubos limitando la combustión y obstruyendo el flujo de gases.
- Altos flujos de gases pueden incrementar la erosión.
- Perturban o desorganizan la circulación.

Aunque se puede obtener una alta capacidad por un corto tiempo, puede ser necesario sacar de servicio la caldera debido a la formación de escoria o la falla de partes vitales del equipo de combustión, por lo que se recomienda operarla dentro de las limitaciones de diseño y evitar capacidades excesivas.

La cantidad y distribución correctas del aire de combustión son consideraciones importantes en la reducción del mantenimiento; demasiado aire para la combustión resulta en serias pérdidas de calor en los gases de escape, mientras que insuficiente aire causa excesiva temperatura del hogar y esto puede causar formación de escoria y fallas tempranas en las paredes del hogar, arcos y emparrillados.

A pesar de que los sopladores de hollín son valiosos en la remoción de cenizas, hollín y escoria del lado de gases de los tubos, también pueden ser causa de salidas de calderas y mantenimiento; cuando los sopladores de hollín no están ajustados correctamente, el vapor de las toberas erosiona los tubos de caldera y causan fallas. Para prevenir posibles daños de los elementos de sopladores de hollín, se deben ajustar en tal forma que las toberas no soplen directamente contra los tubos y las mamparas

La escoria sobre los tubos de la caldera restringe el flujo de gases y reduce la cantidad de calor que puede ser absorbida; esto tiende a reducir la máxima producción de la caldera y causa alta temperatura del hogar. La formación de escoria puede ser causada por operación incorrecta del equipo de combustión o por combustible no adecuado para el hogar.

Los sopladores de hollín convencionales no son efectivos para remover la escoria de los tubos del hogar, por lo que en las grandes calderas se instalan elementos especialmente diseñados para remover esta escoria, un tubo conectado a una manguera de aire comprimido y operado a través de las puertas de limpieza puede ser efectivo en la remoción de escoria de los tubos. Esta operación manual de quitado de escoria debe realizarse frecuentemente para evitar que la escoria se "puentee" entre tubos; en algunas ocasiones se rocía agua sobre los tubos para ayudar en la remoción de escoria, pero no se recomienda porque puede dañar las mamparas y trabajo refractario. Cuando la escoria está depositada a través de todo el primer paso y punteada entre los tubos, se recomienda sacar de servicio la caldera para una limpieza completa.

Las calderas dependen de equipo auxiliar para el suministro del agua, combustible y aire necesarios; éstos auxiliares incluyen bombas, emparrillados (stokers), pulverizadores, ventiladores, etc., los cuales bajo condiciones normales tienen que ser reparados ocasionalmente, y frecuentemente cuando no se lubrican en forma apropiada. Los rotores y carcasas de los ventiladores de tiro inducido se desgastan por la acción abrasiva de las cenizas volantes, a menos que sean precedidos por equipos de limpieza de gases como por ejemplo precipitadores electrostáticos o cuartos de bolsas.

Las bombas de agua de alimentación sufren desgaste y se les debe dar mantenimiento a intervalos regulares para asegurar su operación continua.

La tubería, válvulas, controles e instrumentos requieren ajustes y reparación o reemplazo de partes

La selección y aplicación incorrecta de materiales por el diseñador y fabricante puede resultar en falla prematura de partes y en mucho mantenimiento; cuando hay fallas repetidas que no pueden ser atribuidas a mala operación, entonces el diseño o material, y en algunos casos ambos, deben de cambiarse. Si un arco de un hogar debe reemplazarse frecuentemente, podría ser económico usar un mejor grado de material o instalar paredes de agua.

Los trabajos de mantenimiento de la planta de caldera deben realizarse sobre un programa establecido para evitar que el equipo tenga salidas de servicio forzadas por fallas, los trabajos de mantenimiento programado hacen posible tener otras calderas disponibles para llevar la carga o realizar el trabajo cuando las calderas no son requeridas.

Adicionalmente las refacciones, herramientas y personal de mantenimiento necesarios deben estar disponibles para realizar el trabajo eficientemente. Por otra parte, en el caso de salidas forzadas, se pierde producción, las refacciones necesarias no están disponibles y probablemente no hay suficiente personal de mantenimiento para el trabajo. En la actualidad se emplean unidades grandes de calderas tanto en las plantas industriales como de potencia, y puesto que sus fallas causan pérdidas de un importante % (en algunos casos 100%) de la capacidad de la planta, es esencial evitar las salidas forzadas.

El problema es como pueden evitarse o reducirse al mínimo las salidas forzadas, detalles que parecen sin importancia a veces causan o contribuyen a dificultades mayores, como por ejemplo:

- La interrupción de la línea de alimentación de químicos al domo de la caldera en si mismo no es importante, pero si la caldera se opera por un periodo sin tratamiento de agua, los depósitos de incrustación resultantes pueden causar la falla de tubos.
- Un defecto en la alarma de bajo nivel de agua puede resultar en una falla del sostenimiento del nivel de agua y en una explosión de la caldera.
- La falla de agua de enfriamiento o aceite en el cojinete del ventilador de tiro inducido puede resultar en falla del cojinete y en una salida de la unidad caldera completa.

No hay nada mas que agregar a la impresión de que una planta tiene buen mantenimiento que su limpieza, la buena limpieza es una parte del mantenimiento preventivo. El mantenimiento de una planta limpia requiere de un equipo de trabajo de parte del personal, de la gerencia, mantenimiento, operación y limpieza, el personal de mantenimiento debe comprender que el trabajo de reparación no esta completo hasta que el material viejo y sobrante haya sido retirado.

Es deseable asignar un equipo específico de limpieza y hacerlos responsables de la conservación de la misma, y en ésta forma el individuo puede tener orgullo en hacer bien su trabajo o esperar ser reprimido en caso de descuidarlo, éstas asignaciones deben darse con consideraciones cuidadosas para ver que el trabajo se distribuya igualmente entre los responsables. Se debe coordinar el trabajo para evitar que un trabajo de limpieza deposite polvo sobre otro equipo ya limpio, en algunos lugares se sopla el polvo de los motores con aire de una manguera, lo que podría consumir tiempo para limpiar la maquinaria de junto antes de la limpieza de los motores por éste método.

La gerencia debe ver que se dé toda la ayuda posible para mantener la planta limpia; es difícil para los operadores conservar el interés en la limpieza cuando equipo impropriadamente diseñado o mantenido continuamente permite descargas de ceniza, aceite, carbón o polvo. En ocasiones el diseño no toma en cuenta la accesibilidad para la limpieza.

Para el trabajo de limpieza se debe tener disponible equipo adecuado, herramientas y suministros, limpiadores por vacío (aspiradoras) son de gran utilidad, y en las plantas de carbón pulverizado se clasifican como una necesidad de seguridad. Gabinetes para herramientas, suministros y lubricantes mejoran la apariencia de una planta y facilitan el trabajo.

Se debe establecer un programa de lubricación y uno de mantenimiento preventivo. A pesar de que algunos operadores dependen de la memoria para determinar cuando se debe hacer una inspección, lubricación de un cojinete, etc., y a pesar de que en algunos casos es satisfactorio, en plantas grandes de rápida expansión, por lo general la memoria es inadecuada; tarde o temprano alguna cosa se descuida y resulta en una salida. La base de los programas de lubricación y mantenimiento son las recomendaciones del fabricante y la experiencia en la operación de la planta, no debe dependerse de la memoria.

III. LA GESTION DEL MANTENIMIENTO

1. GENERAL. ANTECEDENTES

Los objetivos del mantenimiento son los siguientes:

- Aumentar el tiempo medio entre fallas (TMEF)
- Disminuir el tiempo medio de reparaciones (TMR)
- Controlar y optimizar los recursos y actividades de mantenimiento

La necesidad de resolver los problemas de mantenimiento es por lo siguiente:

- Elevado costo inicial de la instalación y por lo tanto, la necesidad de una utilización completa y racional de la misma, en condiciones de máximo rendimiento.
- Repercusión de los paros sobre producción.
- Elevado nivel de mecanización, crecimiento y complejidad de la maquinaria

Las acciones que deben llevarse a cabo para lograr los objetivos, son las siguientes.

- Definición y creación de una estructura de organización adecuada para la preparación de trabajos, plazos, programas y aprovechamiento de materiales.
- Realizar intervenciones especializadas, tanto preventivas como correctivas y predictivas.
- Definir y negociar los trabajos que deben realizarse por compañías externas
- Mejorar técnicamente los medios de que el mantenimiento dispone.
- Vigilar que se lleve a cabo capacitación y entrenamiento del personal obrero y de supervisión
- Colaborar en la puesta en servicio, para adquirir conocimientos de planeación en futuros mantenimientos.
- Difundir el conocimiento de la maquinaria y las instalaciones
- Colaborar con la experiencia para retroalimentar futuros proyectos
- Participar en la búsqueda de nuevas técnicas organizativas
- Llevar el historial del mantenimiento en registros simples pero significativos.

De lo anterior expuesto, resulta que para lograr los objetivos señalados, los responsables de la gestión del servicio de mantenimiento deben resolver los siguientes problemas:

- Dimensionar adecuadamente los medios técnicos y humanos de mantenimiento.
- Determinar los tipos de mantenimiento a efectuar
- Decidir los trabajos que van a subcontratarse.

- Determinar la calidad y cantidad de refacciones y de materiales.
- Establecer cuanto mantenimiento preventivo debe efectuarse.

Adicionalmente, el mantenimiento debe vigilar la eficiencia de la caldera, el costo en tiempo y dinero para la renovación de partes desgastadas y las fallas de diseño de equipos

Por lo anteriormente señalado, puede comprenderse que el mantenimiento pasa de ser una actividad auxiliar, a ser una función que contribuye al nivel de productividad.

2. FACTORES MÁS IMPORTANTES DEL MANTENIMIENTO

La función del mantenimiento es la de proporcionar un servicio para mantener el equipo en condiciones operables y seguras, debiéndose cumplir con lo siguiente:

- Rápida respuesta a las necesidades de operación
- Accesible a operación
- Productiva en la relación del trabajo
- Innovativa en la forma de hacer el mantenimiento
- Disciplina para el control de trabajo

Para que la gestión de mantenimiento sea efectiva, es necesario que se construya sobre objetivos realistas que proporcionen políticas positivas para las operaciones de mantenimiento y pueda tenerse un control positivo sobre las circunstancias que lo afectan.

Normalmente el área en la cual falla la gestión de mantenimiento es, la de implementar una política para lograr los objetivos, debido principalmente a la forma de manejo simple a través del cual se intenta implantar políticas sin la valoración plena de los factores externos que tienen influencia sobre esas políticas y prácticas.

Para evaluar un programa de gestión de mantenimiento es esencial que los conceptos del mantenimiento se definan en términos comunes, debiéndose responder a las preguntas fundamentales de cuales son los objetivos, como se alcanzarán y como se medirán los logros.

Tipicamente los seis factores que tienen mayor influencia sobre la gestión de mantenimiento, son los siguientes:

- a) **Organización.** La estructura de la organización es la cimentación de un mantenimiento efectivo. La mejor forma de establecer una organización es la de evaluar las secuencias de un trabajo típico que debe acompañarse para completar una tarea o proceso de mantenimiento.

- b) **Técnicas de Planeación.** En esta área se pueden implementar actividades para minimizar las influencias externas. La planeación es el acto de organizar los recursos para asegurar su uso efectivo, programado el trabajo en una secuencia lógica y ejecutando el plan de acuerdo con el programa.
- c) **Sistemas administrativos.** Son los ingredientes que mantienen unido al programa de mantenimiento, siendo la base para implementar acciones que aseguren el logro de las metas que pueden ser para la determinación de que, como y cuando hacerse, así como la configuración y medición de los efectos de lo que se ha hecho. Son las herramientas para convertir políticas y procedimientos en acciones específicas.
- d) **Métodos y Estándares de Trabajos.** Deben producirse estándares de calidad o métodos de trabajo para ayudar a los técnicos en su trabajo, debiendo incluir pre-requisitos, limitaciones y medidas de criterios de aceptación. Son documentos de ingeniería, que en el caso de no aplicar los requerimientos del procedimiento, pueden alterar el comportamiento del equipo; para iniciar la institución de los métodos y estándares de trabajo, se deberá contar con lo siguiente:
- Una política con relación a su uso
 - Actividades estándar en donde se use
 - Procedimiento para controlar el uso y revisión del estándar
 - Un programa para medición del comportamiento contra el estándar.
- e) **Ingeniería de mantenimiento.** Proporciona la capacidad analítica para mejorar la confiabilidad de los equipos y para reducir la demanda del trabajo de mantenimiento. Las funciones principales de la ingeniería de mantenimiento son:
- Análisis predictivo de fallas. Incluye la evaluación de todas las posibles fuentes de datos para identificar el deterioro e impedir fallas en los equipos.
 - Análisis de fallas inesperadas. Se evalúa el mismo tipo de datos del análisis predictivo de fallas y adicionalmente se desensambla e inspecciona el equipo, se miden claros, se hacen exámenes no destructivos, etc., para determinar el origen o la raíz de la causa y tomar acciones correctivas.
 - Evaluación de los programas de mantenimiento preventivo y predictivo. Se hacen en equipos individuales basados en consideraciones de operación existentes.
 - Evaluación de problemas inesperados encontrados durante la revisión del equipo.
 - Preparación de especificaciones para la sustitución de equipos.
 - Ingeniería de modificaciones pequeñas de la caldera.

- f) **Entrenamiento del Personal.** Deben hacerse esfuerzos adicionales para formalizar y proporcionar una forma estructurada de entrenamiento basado en la valoración de necesidades, determinando los conocimientos esenciales, las habilidades necesarias y la actitud más positiva, para todos los niveles de personal.

3. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Para estos trabajos se requiere contar con un medio para reportar los defectos y solicitar los servicios de mantenimiento. Este medio debe tener las siguientes características.

- Ayudar a la superintendencia de mantenimiento a determinar prioridades cuando compile los programas de trabajo.
- Proporcionar un medio para verificar que el defecto ha sido corregido a satisfacción de la Superintendencia de Operación.
- Proporcionar un registro del trabajo hecho para el historial de la planta y para el sistema del archivo central.

4. MANTENIMIENTO PREVENTIVO PLANEADO CON LA UNIDAD EN FUNCIONAMIENTO

Este es un sistema de mantenimiento rutinario, que ayuda a prevenir defectos y roturas, debiéndose tener una cuidadosa consideración para lograr el óptimo nivel de mantenimiento.

La naturaleza y frecuencia de este mantenimiento, pueden ser mejorados progresivamente por medio de los siguientes:

- Monitoreo del comportamiento de la caldera
- Tendencia del comportamiento
- Modificación de programas

Los objetivos de este sistema de mantenimiento preventivo planeados, son los siguientes:

- Determinar los requerimientos de mantenimiento rutinario de cada equipo es decir, definir que trabajo debe ser hecho y su frecuencia.
- Asegurarse que el mantenimiento rutinario se llevó a cabo.
- Proveer un registro de que el mantenimiento rutinario se ha llevado a cabo y la naturaleza de cada trabajo adicional que pueda encontrarse necesario.

Es necesario auxiliarse de hojas de registro en donde se incluya:

- Número de código e información de la caldera, como plano de referencia etc
- Servicios de rutina llevados a cabo, indicando la fecha.
- Número de defectos reportados, que pueden ser un simple sistema de señalización.
- Frecuencia del mantenimiento rutinario y breve descripción de la rutina.

5. MANTENIMIENTO PREVENTIVO PLANEADO CON LA CALDERA PARADA

Debido a los altos gastos en que se incurren con las unidades fuera de servicio por mantenimiento, es necesario elaborar cuidadosamente un plan de trabajo, para que la duración del paro se reduzca al mínimo. El proceso de planeación debe empezar varias semanas o meses, antes de que el paro tenga lugar

Las estimaciones de tiempo no deben considerar los registros pasados que puedan estar distorsionados por dificultades específicas, como falta de mano de obra o equipo, etc., que se haya tenido en ese tiempo y las estimaciones deben hacerse sobre bases realistas actualizadas.

Todos los trabajos a ser realizados pueden ser agrupados en la siguiente forma

- Trabajos preparatorios
- Trabajo esencial mínimo
- Trabajo que debe hacerse preferiblemente durante el paro
- Otros trabajos

En el análisis de la ruta crítica, la primera etapa de planeación es la identificación de los trabajos que deben realizarse y secuencia lógica; durante la programación, se designa cuando deben realizarse dos trabajos distintos. Después de completar los trabajos, se debe hacer una revisión de las actividades para auxiliar la futura planeación.

6. REGISTROS DE MANTENIMIENTO Y DE LA CALDERA

Para poder llevar a cabo los mantenimientos y servicios señalados en los puntos anteriores, es necesario contar con registros auxiliares para la toma de decisiones; estos registros incluyen los siguientes principalmente:

- a) Archivo de datos
- b) Memoria

- c) Análisis que pueda ser hecho de cualquier factor particular y que pueda influenciar futuras políticas de mantenimiento.
- d) Recordatorio de ciertos eventos
- e) Archivo histórico de la caldera

El análisis de la historia del mantenimiento de cada parte de la caldera, proporciona la clave para determinar los requerimientos óptimos del futuro mantenimiento, por lo que es necesario poder determinar rápidamente lo siguiente:

- Número de ocasiones en que un servicio rutinario se ha llevado a cabo
- Cuantos defectos en servicio han ocurrido
- Tendencias en el desgaste
- Deterioro del aislamiento
- Erosión, etc.

- f) Estándares de trabajo o instrucciones de mantenimiento preventivo (EMP's)

Muchas partes de las calderas tienen que ser desarmadas, reparadas, renovadas y reensambladas de una manera precisa, por lo que los oficiales de mantenimiento tienen que seguir instrucciones claras, con el objeto de cumplir con el trabajo sobre partes, en forma rápida y correcta.

Las EMP's son una guía detallada para los oficiales, sobre la cual se puede verificar cada etapa y es una forma de dar instrucciones y ejercer una medida de control sobre el trabajo.

Para que el EMP sea efectivo, se debe diseñar con mucho cuidado e indicar los siguientes puntos.

- Componente de la planta
- Todos los planos y documentos relevantes de referencia
- Herramientas y equipos especiales requeridos
- Instrucciones de etapa por etapa para desarmar, reparar, renovar y reensamblar.
- Necesidad de verificar y registrar tolerancias y claros, como por ejemplo, de cojinetes.

Se debe tener una política definida para la impresión, manejo, emisión, actualización, etc., de estos documentos.

Los servicios o registros anteriores, son proporcionados en cualquier grado de complejidad requerido, pero es necesario tomar en cuenta, que si el sistema se hace demasiado complicado, se vuelve caro de operar, especialmente si se requiere personal adicional y además los datos esenciales pueden ser ocultados por demasiado detalle.

7. SISTEMATIZACION

El tamaño y complejidad de las instalaciones de las calderas de potencia no permiten tener una actualización eficaz de toda la información de datos en forma manual que puedan consultarse e interpretarse correctamente sobre todo en lo relacionado al mantenimiento que incluye:

- Reparaciones
- Sustituciones
- Causas de fallas
- Costos

La gestión del mantenimiento y las decisiones urgentes, involucran una gran cantidad de datos complejos, que en algunas ocasiones son compromisos entre requerimientos contradictorios, que hace necesario el procesamiento automático de datos, que tiene en general las siguientes ventajas.

- Facilidad para el tratamiento de grandes cantidades de datos.
- Ningún problema en el caso de procedimientos, una vez establecida la programación (software).
- Oportunidad, precisión, consistencia, abundancia y confiabilidad de la información de salida
- Elevado nivel de automatismo en la gestión de datos.

El propósito general de un sistema de información, es el de mejorar la calidad de la información en cuanto a.

- Oportunidad
- Precisión
- Consistencia
- Abundancia
- Significatividad

Adecuada diversificación del grado de agregación, en función de los niveles decisionales.

8. CODIFICACION.

La fase inicial de un sistema para organizar el servicio de mantenimiento y la gestión de refacciones, es el estudio de un sistema de codificación eficaz, que es la clave que permite la construcción de un sistema informativo correcto y productivo. Los sistemas de codificación, pueden dividirse entre categorías:

- a) Códigos progresivos o cronológicos
- b) Códigos de tipo funcional
- c) Código de tipo descriptivo genérico o por características

Este último (codificación por características), permite lo siguiente:

- Una identificación unívoca entre cada uno de los componentes y todos los datos que se recaban y almacenan como base para definir políticas de MP y estudios de confiabilidad.
- La intercambiabilidad de refacciones y el seguimiento de su gestión (de las refacciones).
- Realizar análisis de confiabilidad y disponibilidad.

9. DEFINICION DE UN PLAN

La realización de una política de mantenimiento puede ser lograda a través de las siguientes etapas.

- a) Recolección sistemática de los datos de mantenimiento correctivo (MC) y organización de los mismos en un archivo histórico.
- b) Análisis del MC para descubrir fallas repetitivas
- c) Introducción del MP en donde se incluye paro, en el plan periódico del mantenimiento a corto plazo.
- d) Creación y actualización de estándares de MP (EMP's) incluyendo tipo, modalidades, recursos para su realización e identificación de la frecuencia para aumentar el plan de mantenimiento
- e) Gestión de las grandes revisiones, con objeto de que se puedan llevar a cabo todos los trabajos programados en el menor tiempo posible.
- f) Definición y realización de un plan óptimo de mantenimiento periódico, con unidad parada, incluyendo
 - Descripción de los trabajos de sustitución o reparación preventiva.
 - Cálculo de la fecha del trabajo.
 - Tiempo total del trabajo
- g) Definición en "tiempo real" de un plan de mantenimiento óptimo en paro forzoso de la unidad.

- h) Planeación de los trabajos a corto plazo, que incluyen lubricación, inspección y reparación de menor importancia técnica y económica.
- i) Equilibrado de las cargas de trabajo periódico, entre las distintas secciones y cuadrillas.
- j) Planeación de materiales que incluyen el control de disponibilidades en almacén, de materiales y refacciones para un determinado trabajo.

La realización de una política de gestión de existencias de refacciones debe llevarse a cabo en las siguientes etapas.

- a) Creación y actualización continua de los materiales disponibles y su ubicación en el almacén
- b) Definición de una política de gestión para cada categoría de materiales, incluyendo sus primeros parámetros.
- c) Registro de los movimientos y control de niveles de baja existencia y valoración de estas
- d) Cálculo de los parámetros de gestión (cantidad económica de reaprovisionamiento, nivel de seguridad, nivel de pedido), para cada código según criterios económicos.
- e) Análisis de las características de proveedores (calidad, precio, seguridad de suministro y plazo de entrega).
- f) Emisión automática de órdenes de elaboración de requisiciones, control de procesos, de adquisición, etc.

La realización de un control de gestión del servicio de mantenimiento, se establece con los puntos siguientes:

- a) Control de los costos de mantenimiento de cada componente.
- b) Comparación entre los costos previstos y reales
- c) Cálculo de los índices (mano de obra y otros), comparándolo con otros periodos.
- d) Elaboración de las estadísticas de indisponibilidad, parámetros de confiabilidad y análisis de fallas de cada equipo.

Las ayudas recomendables a la línea operativa del servicio de mantenimiento, incluyen lo siguiente:

- a) Control continuo de la ejecución de trabajos.
- b) Obtención en tiempo real de diversos documentos (ST's, OT's, etc.).
- c) Consulta del archivo de almacén (inventario, órdenes de compra, etc.)

10. ACTIVIDADES DE PLANEACION Y CONTROL

Puede definirse a la planeación como el método por el cual la gestión ve hacia el futuro y descubre los cursos alternativos de acción.

Una forma de estudiar o analizar el método de planeación es identificar las actividades que en conjunto forman el sistema; una lista de las actividades de planeación no es otra cosa que un recurso analítico útil para descubrir los elementos básicos inherentes al trabajo de planeación.

El departamento de Planeación y Control se forma dentro de la organización de mantenimiento para:

- Preparar programas de trabajo de MP planeados.
- Preparar OT para colocación en la supervisión a la atención de los jefes de Departamento.
- Registrar en los archivos del historial, detalles del trabajo hecho, tal como se extrae de los reportes de trabajo completados.
- Asegurar que cuando cierta parte de la caldera se saca de servicio, todos los trabajos establecidos en la forma de defectos se atiendan por cada departamento simultáneamente.
- Mantener registros de operación de la caldera, disponibilidad, eficiencia y costos de mantenimiento.
- Preparar listas de licencias o permisos de trabajos para someterse al Staff de operación
- Definir los requerimientos de planeación a largo plazo y programas de "overhaul" de la unidad.
- Archivar clasificadas las OT establecidas agrupadas en:
 - Espera de un paro
 - Espera de refacciones o materiales
 - Espera de mano de obra
- Conservar registros de inspección de caldera y equipos
- Extraer información de las compañías de inspección.
- Introducir información relevante en los archivos del historial, en adición a los trabajos de mantenimiento.
- Archivar las hojas de especificación de trabajos y emitirla con las OT en la forma apropiada.
- Archivar copias de manuales de mantenimiento, libros de instrucciones y planos comúnmente usados.

11. IMPLANTACION DE LA PLANEACION Y EL CONTROL DEL MANTENIMIENTO

Dos herramientas muy valiosas para implementar un programa de gestión de mantenimiento son la ingeniería de apoyo y la planeación.

Los sistemas y componentes deben monitorearse contra los parámetros de diseño para determinar

- Pérdida de eficiencia

- Deterioro de los límites a los cuales deben reemplazarse
- Causas de fallas
- Acciones recomendables para mejorar la operación

La ingeniería de apoyo es el área de los esfuerzos de mantenimiento para extender el tiempo medio entre fallas (TMEF), los principales esfuerzos para extender el TMEF, son primariamente por medio de:

- Análisis predictivo
- Análisis de fallas
- Revisión del historial de reparaciones; y además esfuerzos secundarios para:
 - Interfases en salida
 - Proyectos pequeños
 - Especificaciones de reemplazo de equipos

Los datos generados por operación para determinar necesidades de mantenimiento, son principalmente los siguientes:

- Temperatura
- Presión
- Flujo
- Vibraciones

Adicionalmente se requiere el monitoreo en línea, con evaluación sistemática, para detectar fallas, de:

- Vibración
- Expansión térmica
- Alineamiento en operación
- Altura neta positiva de succión (NPSH)
- Evaluación acústica

La planeación coordina todos los aspectos que contribuyen a implantar y completar los trabajos de mantenimiento en forma.

- Oportuna
- Eficiente
- Efectiva

Adicionalmente, la planeación:

- Evalúa el alcance del trabajo
- Verifica que los recursos de personal y materiales estén disponibles para realizar el trabajo

- Selecciona el marco de tiempo para implementar el trabajo dentro de un programa.

La implantación de un programa efectivo de gestión de mantenimiento requiere de los siguientes elementos:

- Personal de planeación
- Un sistema de ordenes de trabajo (OT's) efectivo:
 - a. Formas de OT's
 - b. Sistema de prioridades
 - c. Sistema de archivo
- Un sistema de información uniforme:
 - a. Sistema de registros
 - b. Sistemas de estándares, procedimientos y estimaciones de trabajo uniformes
 - c. Programa de reportes
 - d. Un programa de mantenimiento preventivo (MP)

El elemento clave en los programas de gestión de mantenimiento es el personal de planeación o planeadores, cualquier programa es tan bueno como la gente que lo implementa. Normalmente el mejor planeador es el que tiene experiencia en hacer el trabajo y ha mostrado una forma organizada en sus actividades como supervisor de primera línea.

El segundo elemento más importante es el sistema de OT's, todos los elementos existen para soportar este sistema. El sistema de OT's provee un documento de ingeniería alrededor del cual se construye un paquete de trabajo, que es específico con relación a:

- Prioridad
- Programación
- Obreros
- Estándares, procedimientos
- Materiales
- Condiciones requeridas

También el sistema de OT's debe establecer una ruta de flujo funcional en lo siguiente:

- De el originador a través del proceso de planeación.
- Para completar el trabajo.
- Evaluación de la retroalimentación y su retención para el historial.
- Regreso al originador como notificación de terminación.

Adicionalmente, para facilitar su efectividad, la forma de OT deberá considerar lo siguiente:

- Poder medir su proceso de revisión a través de previsiones de fecha y firma del planeador para conocimiento de recepción, revisión apropiada y programación planeada del trabajo.
- Tener espacio para indicar el tipo de personal necesario para realizar el trabajo y las horas requeridas para completarlo.
- Además tener espacio para.
 - i. Una adecuada descripción de detalle del trabajo.
 - ii. Problemas encontrados o
 - iii. Soluciones que puedan mejorar el proceso de trabajo.

El sistema de prioridades de las OT's debe ser simple y el criterio para establecer prioridades debe ser definido claramente; el originador debe ser el responsable de fijar las prioridades

El sistema de archivo de OT's debe tener cuatro archivos separados:

- Archivo semanal, con OT's planeadas y con paquetes de trabajo para la semana.
- Archivo de trabajo en proceso, que contiene copias de OT's en proceso
- Archivo general que contiene OT's planeadas o en proceso de planeación y que pueden seleccionarse para la siguiente semana.
- Archivo de paradas, que contiene OT's listas pero que requieren el paro de la unidad

El sistema de información uniforme, con codificación única, debe estar conformado en la siguiente estructura.

- i El sistema de registros, debe permitir el acceso a todos los planos, diagramas, manuales técnicos, catálogos, refacciones e historial del equipo con la misma clave.
- ii El sistema de estándares, procedimientos y estimaciones de trabajo, cuya responsabilidad de preparación es del grupo de planeación, debe también poderse acceder con la misma clave
- iii. El programa de reportes, que debe manejarse por planeación y control, incluye típicamente los siguientes:
 - Productividad de los departamentos ejecutores, señalando como se completan las OT's dentro de las estimaciones.
 - % de utilización del trabajo planeado, señalando cuanto trabajo diario del departamento es planeado.
 - Utilización de la fuerza de trabajo, indicando cuanta gente está activa en trabajos del departamento con relación a los recursos totales.

- Estado de estándares, señalando cuantos se han generado y/o revisado con relación a la meta.
- Reportes de avance de salidas o paros de la unidad.

El programa de mantenimiento preventivo (MP) Este programa lo administra planeación, quien emite y monitorea las OT's en trabajos recurrentes como cambios de lubricante y filtros, inspección de equipos, limpieza, etc.; utiliza el historial para revisar frecuencias añadiendo o quitando trabajos del programa de MP y nivelando los requerimientos de h-h para optimizarlos. El programa de MP administrado por planeación cubre los siguientes aspectos: —

- MP tradicional (rutinario, recurrente, corto y largo periodo, etc.), como inspecciones periódicas, lubricaciones, cambios de filtros, trabajos de limpieza, etc.
- MP tipo diagnóstico, como por ejemplo, la adquisición periódica de datos de vibraciones de equipos seleccionados, pruebas de comportamiento, etc.
- MP relacionado con paros, como por ejemplo, PND de los sistemas de tubería de los equipos, pruebas de motores eléctricos, etc.

Las pruebas de diagnóstico no se limitan sólo al análisis de vibraciones, también se usan con éxito la termografía y el análisis acústico, aunque éste último requiere considerable experiencia para interpretar resultados y una buena base de datos para comparación.

Planeación actúa como una organización de servicio para apoyar los esfuerzos de las cuadrillas de mantenimiento, ya que:

- Toma y procesa una OT y entrega un paquete de trabajo completo para las cuadrillas de mantenimiento.
- Procesa las OT's terminadas en tal forma que generan toda la retroalimentación e historia necesaria.

La razón de la existencia del programa de planeación y del soporte de ingeniería, es el de apoyar los esfuerzos de las cuadrillas de mantenimiento; el área principal del departamento de mantenimiento, es precisamente el esfuerzo de las cuadrillas de mantenimiento. El éxito de los esfuerzos de la ingeniería de mantenimiento, depende directamente de la forma en que se usen los resultados de los programas de planeación y de la ingeniería de apoyo.

IV. FALLAS Y CAUSAS DE FALLAS

1. GENERAL

A pesar de que muchas condiciones pueden causar o llevar a una falla de un componente en el servicio, la responsabilidad de una falla puede ser atribuida a alguna de la siguiente clasificación:

- Diseño (flexibilidad o resistencia estructural, diseño de entalladuras, configuración y localización de juntas soldadas).
- Materiales (selección y manejo de materiales).
- Defectos de metal base (introducidos durante la fabricación y formado de fundiciones, forjado o trabajado de componentes y de tubería como válvulas y accesorios)
- Fabricación (manufactura, tratamiento térmico, o limpieza de la tubería durante la fabricación de taller o montaje de campo).
- Servicio (condiciones excesivamente severas de servicio).
- Errores humanos.

En algunos casos, la responsabilidad puede estar relacionada a una combinación de esta clasificación, por ejemplo, una soldadura de tubería conteniendo defectos de raíz como falta de penetración, puede no fallar durante el servicio hasta que una fatiga térmica o mecánica de severidad inesperada cause el rompimiento y propagación de rotura de defectos existentes a través del espesor de la pared. Si originalmente se especificó 100% de penetración de soldadura de raíz, entonces la falla podría clasificarse así:

Clasificación Primaria: Fabricación

Condición Soldadura impropia, falta de penetración en la raíz de la soldadura.

Clasificación Secundaria Servicio

Condición Fatiga térmica

Por otra parte, si en el ejemplo anterior, la calidad de la soldadura no se especificó cuando se hizo la soldadura, y se consideró aceptable algo de penetración incompleta en la raíz de la soldadura porque no se previeron condiciones de servicio de fatiga térmica, entonces la falla podría ser clasificada como sigue:

Clasificación Primaria: Servicio – excesivamente severo

Condición : Fatiga térmica

Clasificación Secundaria : Fabricación

Condición : Falta de penetración en la raíz de la soldadura, considerada aceptable bajo las especificaciones aplicables.

Una falla puede ocurrir por rotura o por corrosión, o algunas veces por una combinación de estos dos mecanismos, y por otra parte, la mayoría de las fallas ocurren gradualmente. En el trayecto del espesor de la pared de los componentes de tubería se desarrolla apertura en la superficie a través de la cual puede fugarse algo de vapor, líquido o gas que lleva el sistema, en efecto, esto produce una advertencia de una condición potencialmente peligrosa.

Son muy raras las fallas en donde ocurre rotura parcial a través de la pared seguida por una ruptura repentina del tubo o en donde ocurre una rotura repentina la cual no es precedida por un agrietamiento previo detectable. Este tipo de fallas de ruptura repentina son vistas con extremo interés porque pueden resultar en daños al personal o pérdidas de vidas y pueden volverse extremadamente costosas para la planta.

La iniciación de una falla puede relacionarse a tres condiciones que pueden ser reconocidas por la inspección del control de calidad y que son:

- Defectos estructurales y no-homogeneidad presente en los componentes originales.
- Defectos metalúrgicos y no-homogeneidades presentes en los componentes originales.
- Defecto o fragilización introducidos durante el servicio en materiales sanos estructural y metalúrgicamente.

Por lo general solo la primera condición se investiga por medio de técnicas de inspección no-destructiva.

En cualquier análisis de defectos debe reconocerse que comercialmente no se fabrican materiales y soldaduras perfectas.

Los defectos estructurales pueden variar desde la dislocación del tamaño del átomo en el metal, lo cual no puede ser observado aún con el microscopio de la más alta potencia, hasta discontinuidades mayores en el metal que son visibles a la vista. Muchos defectos toscos como pequeños niveles de porosidad de soldadura discernibles en película radiográfica pueden no reducir la vida de servicio de los componentes de tubería, sin embargo, muchos otros defectos visibles en la superficie e invisibles bajo la superficie pueden resultar en fallas del servicio.

Los defectos metalúrgicos representan diferencias en las propiedades de suficiente magnitud para volverse una causa potencial de falla; éstas condiciones pueden ocurrir dentro del mismo metal, por ejemplo, en donde el tratamiento térmico produce una área de alta dureza adyacente a una área de baja dureza. Las ranuras o entalladuras metalúrgicas pueden también representar un nivel alto de dureza en la zona afectada por el calor adyacente al metal base o metal de la soldadura, o puede ser debida a diferencias en las propiedades entre un metal

base forjado y un depósito de soldadura lo cual puede considerarse representante esencial de un material colado; también se incluyen trabajos en frío localizados y esfuerzos residuales. Entalladuras metalúrgicas mas aparentes ocurren entre combinaciones de metales disímiles, capas de soldadura y juntas disímiles soldadas.

Los efectos introducidos durante el servicio involucran grietas, fragilización o picaduras de corrosión y ranuras que pueden ocurrir en lugares en donde el material en sí mismo fue sano estructural y metalúrgicamente en la condición en que fue originalmente montado.

La habilidad de un defecto para propagarse en una falla, depende de las condiciones de servicio y de la dificultad para predecirlo; algunos defectos obviamente serios no se han propagado en 10 años de servicio en condiciones críticas de operación de altas temperaturas y presiones. Otros muchos menores o defectos de apariencia inconsecuente han fallado muy rápidamente bajo las mismas o muy similares condiciones de operación.

En los estudios de análisis de fallas y en los intentos de correlación con pruebas de simulación de laboratorio o mecánicas, es también extremadamente importante reconocer que cada prueba específica evaluará un material particular o un diseño de componente en comparación con otro material o diseño de componente probado bajo las mismas condiciones. La interpretación de los resultados de prueba y su correlación con las características de servicio reales, son cuando mucho solo aproximaciones, muy frecuentemente dichos resultados de prueba tienen poca o ninguna relación con el comportamiento real de servicio de componentes de tubería, sistema, material o junta de soldadura.

2. MECANISMOS DE FRACTURA EN FALLAS DE METALES

El análisis de fallas requiere de una combinación de:

- Conocimientos técnicos
- Observación meticulosa
- Labor de investigación
- Sentido común.

Adicionalmente existen factores que sirven para identificar en forma más fácil la causa de la falla, como por ejemplo:

- Conocimiento del comportamiento pasado del componente que falla, incluyendo el esfuerzo aplicado.
- Ambiente
- Temperatura

- Estructura
- Propiedades y cambios inesperados en cualquiera de estos factores.

El conocimiento de los mecanismos de fractura también puede revelar la causa de la falla de metales cuando son sometidos a esfuerzo; fundamentalmente existen cinco mecanismos comunes de fractura:

- Fallas dúctiles
- Fallas frágiles
- Fallas por fatiga
- Fallas por termofluencia
- Fallas debidas a corrosión por esfuerzo

Fractura dúctil

La fractura por ductilidad o dúctil, normalmente ocurre en forma transgranular (a través de los granos) en los metales que tienen ductilidad y tenacidad satisfactorias; con frecuencia se observa una buena cantidad de deformación, inclusive con estricción, en la parte que falla. La deformación ocurre antes de la fractura final, las fracturas dúctiles por lo general se deben a sobrecargas simples o bien a la aplicación de un esfuerzo excesivo en el material.

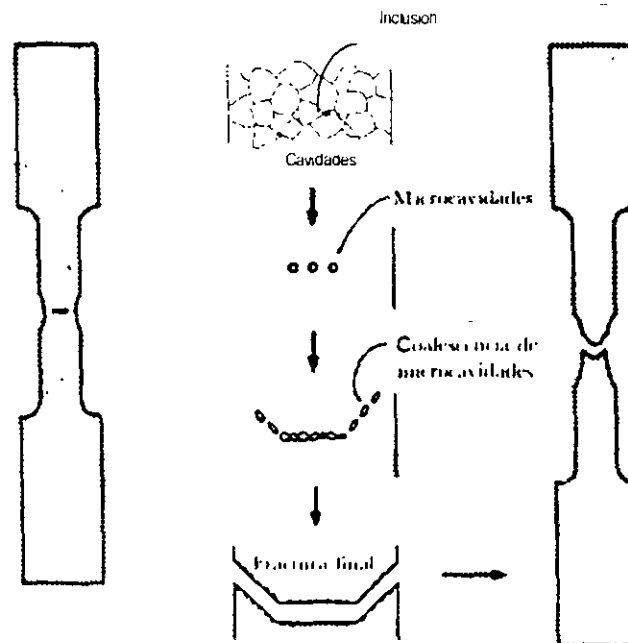


FIG IV-1.- CUANDO UN MATERIAL DUCTIL ES SOMETIDO A UN ENSAYO DE TENSIÓN SE ORIGINA UNA ESTRICCIÓN Y SE FORMAN MICROCAVIDADES, INICIÁNDOSE CERCA DEL CENTRO DE LA BARRA, POR NUCLEACIÓN EN LOS LÍMITES DE GRANO O EN LAS INCLUSIONES. CONFORME LA DEFORMACION CONTINUA, SE PUEDE FORMAR UN BORDE DE CORTE A 45°, PRODUCIÉNDOSE UNA FRACTURA FINAL DEL TIPO DE COPA Y CONO

La fractura dúctil en una prueba de tensión se inicia con la nucleación, crecimiento y coalescencia de microhuecos en el centro de la muestra (Fig. IV-1). Los microporos se forman cuando un esfuerzo alto provoca la separación del metal en los límites de grano o interfaces del metal y las inclusiones. Cuando el esfuerzo local continua incrementándose, crecen los microporos o microhuecos, se comunican y producen huecos mayores. Finalmente, el área de contacto metal-metal es demasiado pequeña para soportar la carga y ocurre la fractura final.

La deformación por deslizamiento contribuye también a la fractura dúctil de un metal. Se sabe que el deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante resultante alcanza el valor del esfuerzo cortante crítico y que los esfuerzos cortantes son mayores a un ángulo de 45° con el esfuerzo de tensión aplicado

Estos dos aspectos de la fractura dúctil confieren a la superficie que falló cualidades características que sirven para determinar cuando un metal falla por fractura dúctil. En las secciones metálicas gruesas se espera encontrar evidencia de estricción, con una parte importante de la superficie de la fractura teniendo una cara plana donde nuclean primero los microporos y coalescen, y un pequeño labio de corte, donde la superficie de la fractura se encuentra a 45° respecto del esfuerzo aplicado. El labio de corte, indicando que ocurrió un deslizamiento, confiere a la fractura una apariencia de copa y cono. La simple observación macroscópica de esta ruptura puede ser suficiente para identificar la falla como fractura dúctil.

El examen de la superficie de la fractura a gran aumento, utilizando un microscopio electrónico de barrido, revela una superficie rugosa. Las rugosidades son huellas de los microhuecos producidos durante la fractura. Normalmente, estos microhuecos son redondeados, o equiaxiales, cuando un esfuerzo de tensión produce la falla. Sin embargo, en el labio de corte, las rugosidades tienen forma ovalada, o alargada, con los óvalos apuntando hacia el centro de la barra de tensión donde se inició la fractura.

En placas delgadas se observa una estricción menor y toda la superficie de la fractura es una cara de corte.

3. ESFUERZOS EN EQUIPO TERMOMECHANICO

Los esfuerzos a que están sujetos los equipos termomecánicos de las plantas industriales están determinados por lo siguiente:

- Naturaleza del esfuerzo
- La geometría del elemento de la máquina
- La evolución en el tiempo

A continuación se describen estas características de los esfuerzos.

3.1 Naturaleza del esfuerzo

Los esfuerzos en los equipos termomecánicos de una planta industrial pueden ser clasificados en la siguiente forma:

- Esfuerzo mecánico. Es generado por una fuerza externa, producido por el agente de trabajo (por diferencia de presión, por impulso), por fuerza centrífuga, por fuerza gravitacional o por una fuerza aplicada al cuerpo desde el exterior.
- Esfuerzo térmico. Se genera por dilatación térmica impedida; se toma en cuenta tanto la dilatación frente a un soporte como la dilatación relativa de las fibras elementales del componente del material.
- Esfuerzo interno. Son tensiones remanentes, provenientes de tratamiento térmico de la pieza y de la deformación plástica en función del material.

3.2 Geometría del elemento

El valor del esfuerzo unitario varía dentro de cierta sección de la pieza esforzada; la variación del esfuerzo unitario se debe principalmente a

- Irregularidades geométricas
- Concentración de tensión
- Falta de uniformidad espacial

Muchos elementos de equipos termomecánicos normalmente se estudian con modelos geométricos regulares, lo cual es una simplificación desde el punto de vista del esfuerzo, por ejemplo:

- Tubería a presión
- Cuerpos cilíndricos (domos, colectores, conductos, carcassas de turbina, cuerpos de cambiadores de calor)
- Cuerpos en rotación como rotores de turbinas de vapor y de gas

3.3 Evolución del esfuerzo en el tiempo

Los principales esfuerzos tienen un carácter periódico, cierta categoría son de frecuencia elevada, por ejemplo, los esfuerzos en los álabes de las turbinas por el impulso del vapor, y otra categoría son de frecuencia baja, por ejemplo, los esfuerzos de naturaleza térmica y mecánica producidos por la modificación del régimen de funcionamiento de la instalación. Los esfuerzos periódicos producen fatiga de los materiales.

El material de los equipos termomecánicos están sujetos conjuntamente a otra forma de fatiga que se conoce como fluencia. La duración de vida de las piezas está determinada por el efecto combinado sobre el material respectivo de las dos formas de fatiga.

4. FACTORES QUE DETERMINAN EL ESFUERZO

4.1 Esfuerzo mecánico

La presión interior genera en un tubo bajo presión, esfuerzos unitarios normales según coordenadas de referencia en el espacio, elegidas en dirección axial, tangencial y radial (Fig. IV-2)

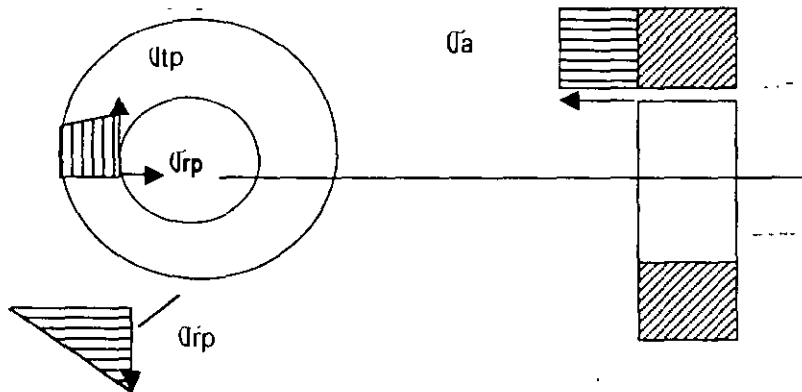


FIG. IV-2.- ESFUERZOS UNITARIOS MECANICOS

El esfuerzo unitario tangencial (σ_t) se opone a la ruptura del tubo en la sección donde se genera. El esfuerzo unitario axial (σ_a) se opone a la ruptura del tubo en una sección perpendicular a donde se genera. El esfuerzo unitario radial (σ_r), que varía en dirección radial entre el valor de la presión interior y exterior, se opone al desplazamiento radial de un punto de una sección perpendicular a donde se genera.

El esfuerzo unitario producido por fuerza centrífuga, depende de la velocidad periférica, de la distancia al eje y de la masa; este esfuerzo vence o desplaza al eje de rotación hacia la periferia de la pieza respectiva.

El esfuerzo unitario debido a fuerza gravitacional se produce por el propio peso de la flecha y discos de la turbina, el peso propio de las otras piezas, el peso del fluido transmitido (agua en los conductos), etc

El eje de la turbina está sujeto a un momento de torsión; este momento crece bruscamente en caso de corto-circuito y puede alcanzar valores hasta de 10 veces mayor que el momento de torsión ejercido por la potencia máxima de duración.

4.2 Esfuerzo térmico

El impedimento de la dilatación libre de una pieza bajo la influencia del calor, produce en esta pieza fuerzas de compensación; como ejemplo puede considerarse el conducto AB (Fig. IV-3), empotrado en un extremo.

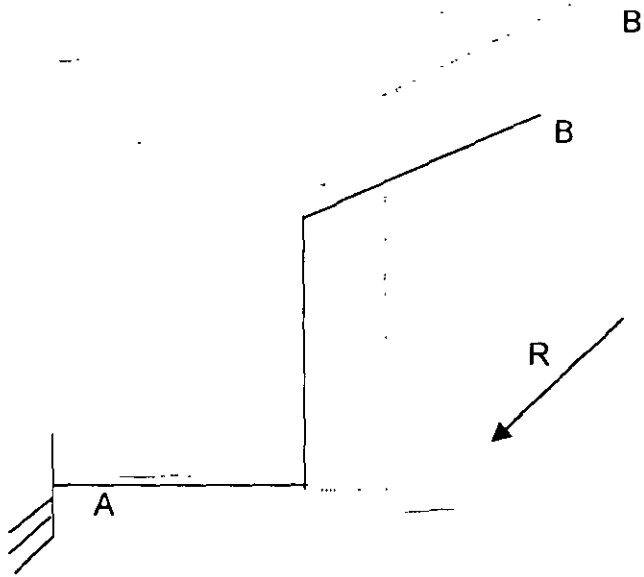


FIG. IV-3.- DILATACIÓN TÉRMICA DE UN CONDUCTO

Por dilatación térmica libre, el punto B se desplaza a B', para regresar éste extremo a la posición inicial B, es necesario que se aplique en el extremo del conducto una fuerza y un par. Estos son equivalentes a una fuerza R, que pasa por un punto cuyas coordenadas pueden ser calculadas, en relación con cada punto del conducto, la fuerza R da un momento de flexión y de torsión. A su vez, el momento produce en el material del conducto un esfuerzo unitario axial, tangencial y de torsión, que se suma al esfuerzo unitario producido por la presión interior, sobre estos se sobrepone el esfuerzo debido al peso propio del conducto, al aislamiento térmico, así como al peso del volumen de agua dentro del conducto.

La diferencial de temperatura en la sección de un material genera esfuerzo unitario por la deformación relativa de una fibra impedida de cohesión del material; las fibras con temperatura más elevada son parcialmente impedidas de dilatarse y se sujetan a esfuerzos de compresión. Las fibras con temperatura mas baja, se expanden de modo forzado y se sujetan a esfuerzos unitarios de expansión.

4.3 Tensión interna

Las tensiones internas pueden provenir de fabricación, montaje o de explotación. Por la contracción de después del colado y por el tratamiento térmico posterior a ciertos trabajos se pueden generar importantes tensiones internas.

En el enfriamiento de la soldadura, se producen tensiones internas, por la contracción del material de la soldadura, durante su solidificación, el valor de ésta tensión interna depende del tratamiento térmico efectuado para relevado de esfuerzos.

Durante la prueba hidrostática, se puede producir en el lugar de la sollicitación máxima, deformación plástica, que al desaparecer la presión genera tensión interna; la deformación plástica con este efecto, también se puede producir durante el curso de procesos transitorios de calentamiento o enfriamiento.

4.4 Esfuerzo condicionado a la modificación de fuerza o de forma

Para apreciar la duración de funcionamiento de un material, es necesario que se haga una diferencia entre el esfuerzo mecánico y el térmico, o en otras palabras, entre la sollicitación condicionada a la fuerza y la sollicitación condicionada a la forma.

En el dominio de sollicitación mecánica, la fuerza y su respectiva tensión mecánica, son medidas primarias, y la deformación es una medida derivada.

En el dominio de sollicitación térmica, la deformación es una medida primaria, y la tensión térmica es una dimensión derivada.

Una consecuencia de la diferencia anterior puede ser ilustrada por la comparación del comportamiento de una barra con sollicitación mecánica, con respecto a sollicitación térmica.

Si, por ejemplo, σ_r es el límite de ruptura a la fluencia después de 10,000 horas, la barra se rompe bajo el efecto de tensión después de 10,000 horas de funcionamiento. Considerando un fenómeno de dilatación térmica impedida, con un alargamiento impedido de dimensión $\epsilon = \sigma_r/E$, la barra bajo el efecto de esta sollicitación tiene una duración de funcionamiento ilimitada.

Este comportamiento se explica en el primer caso, por el crecimiento en el tiempo de deformación, y en el segundo caso por la disminución en el tiempo del esfuerzo unitario. Para que la barra se rompa por alargamiento impedido, es necesario que la dimensión de ésta, sea igual al alargamiento de ruptura, y para que se alcance semejante valor, es necesario una diferencia de temperatura del orden de 10,000°C, lo que prácticamente no tiene sentido. Igualando la dilatación térmica impedida con la deformación específica de ruptura, resulta la diferencia de temperatura necesaria:

$$\alpha \Delta t = \frac{\varepsilon_r}{100}$$

Para acero 10 C Mo 10:

$\alpha = 14.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ (para el intervalo de temperatura de 20 a 600°C)

para $\Delta t = 600^\circ\text{C}$, resulta $\varepsilon = 0.846\%$, valor muy por debajo de ε_r que tiene un mínimo de 20%.

Evidentemente, en una concentración de tensión, la deformación ε crece hasta que alcanza el valor de ruptura; resulta que una sollicitación estática puede producir ruptura del material si es de naturaleza mecánica, pero no produce este efecto si es de naturaleza térmica.

4.5 Esfuerzo unitario local máximo

Del total del esfuerzo unitario local de naturaleza mecánica y térmica, se obtiene el esfuerzo unitario normal local resultante, y de la composición de estos, según una teoría de resistencia, se obtiene el esfuerzo unitario local equivalente. A partir de la comparación de expresión de estabilidad para esfuerzo unitario normal local se puede hacer, para tubos bajo presión interior y calentamiento interior, las siguientes comprobaciones

- El esfuerzo unitario tangencial generado por la presión interior sobre la fibra interior, es mayor que el generado sobre la fibra exterior,
- El esfuerzo unitario radial producido por la presión interior amplifica el esfuerzo unitario equivalente de la fibra interior, en la fibra exterior es nulo;
- El esfuerzo unitario axial producido por la presión interior es igual en las dos fibras.
- El esfuerzo unitario tangencial y axial producido por la diferencia de temperatura es nulo para ambas fibras.

La conclusión final es que, para elementos de equipos termomecánicos con calentamiento interior, la fibra interior es la de mayor sollicitación.

4.6 Concentración de tensión

Las irregularidades geométricas (orificios, ranuras superficiales, modificación de espesor, etc.), tienen el efecto de aumentar localmente la tensión en el material. Asimismo, el ovalamiento de piezas de sección circular generan o amplifican la tensión, ya aumentada con el detalle de concentración; la amplificación de tensión, expresada por un coeficiente de concentración, tiene valores diferentes en función del tipo concentrador y de la naturaleza de la sollicitación (mecánica, térmica, estática, dinámica).

El esfuerzo unitario máximo que se genera en la zona concentradora de tensión puede provocar deformación plástica en el material; en éste caos, está limitado el flujo de material de la zona vecina con la zona de máxima sollicitación. En los materiales tenaces, se produce uniformidad del esfuerzo unitario después de la aparición de la deformación plástica local, pero en los materiales frágiles, esta uniformidad no se produce.

Como es bien conocido, la correspondencia lineal entre esfuerzo unitario y deformación específica, de acuerdo con la Ley de Hooke, es válida solo en el dominio elástico, este esfuerzo unitario no puede ser utilizado como medida de referencia en el dominio plástico, en cambio, la dilatación térmica impedida es un criterio de apreciación adecuado para las sollicitaciones que se producen tanto en le dominio elástico, como en el dominio plástico.

Se define un coeficiente concentrador de tensión τ , y un coeficiente concentrador de deformación ϵ , como.

$$\alpha_{\tau} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_N}; \alpha_{\epsilon} = \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_N}$$

en donde.

σ_N = tensión nominal

ϵ_N = deformación específica nominal en una sección no influenciada por el detalle concentrador.

σ_{max} = tensión máxima en la zona del detalle concentrador.

ϵ_{max} = deformación específica máxima en la zona del detalle concentrador.

Del diagrama tensión – deformación específica, resultan las leyes de variación de los coeficientes α_{τ} y α_{ϵ} representadas en la Fig IV-4.

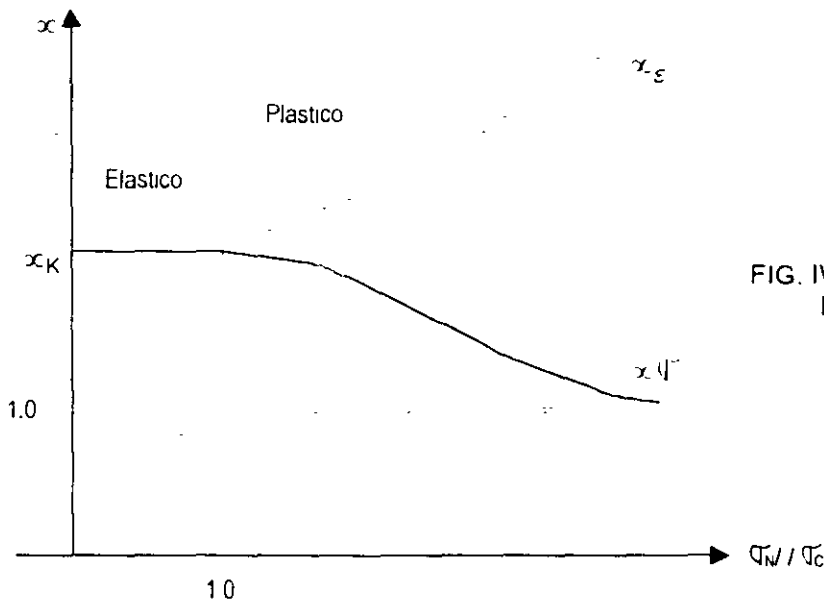


FIG. IV-4.- CURVA DE VARIACION DEL COEFICIENTE DE CONCENTRACION

En la zona elástica $\alpha_U = \alpha_\varepsilon = \alpha_k$.

En el dominio superelástico (plástico), α_U tiende asintóticamente hacia 1, debido a que (σ_N) (en el dominio superelástico) aumenta, al tiempo que (σ_{max}) (en el dominio plástico) aumenta muy poco.

El coeficiente α_ε aumenta en el dominio superelástico, debido a que la deformación plástica crece rápido, en la zona del detalle concentrador.

4.7 Esfuerzo cíclico de baja frecuencia

Si la sollicitación térmica tiene un carácter dinámico, con variación cíclica, puede dar lugar a fisuras por fatiga del material. La mayoría de los equipos termomecánicos están sujetos a esfuerzos de carácter dinámico, debido a paros y arranques, así como a variaciones de carga.

Es importante mencionar el hecho de que la sollicitación cíclica repetida no solo es característica de un régimen de funcionamiento de "pico" del equipo, sino también en la puesta en servicio cuando tiene lugar un número grande de paros y arranques por diversas causas: defectos de fabricación, falta de puesta a punto de automatización, etc.

En la Fig. IV-5a, se representa la variación, en función del tiempo, de la temperatura T de una fibra colocada en contacto con el agente térmico.

En la Fig. IV-5b, se representa la variación, en función del tiempo, de la diferencia de temperatura ΔT , en la sección del material, se constata el carácter de ciclo alternado de la variación de diferencia de temperatura y por consiguiente de la sollicitación en la sección del material.

En la fibra colocada en contacto con el agente térmico, durante el periodo de calentamiento (t_0-t_1), la temperatura aumenta, en el periodo t_1-t_2 permanece constante, en el periodo $t_2 - t_3$ disminuye el valor inicial, en el periodo $t_3 - t_4$ permanece constante y en el momento t_4 se inicia un nuevo ciclo de variación.

Durante el ciclo anterior, la diferencia de temperatura ΔT tiene una variación alternada, anulándose en los extremos del intervalo en que la temperatura de la fibra calentada sale de constante y se produce una igualación de temperatura en el material. Por lo general, la velocidad de calentamiento y enfriamiento es diferente, así como también el valor máximo y mínimo de la diferencia de temperatura en el material no son iguales.

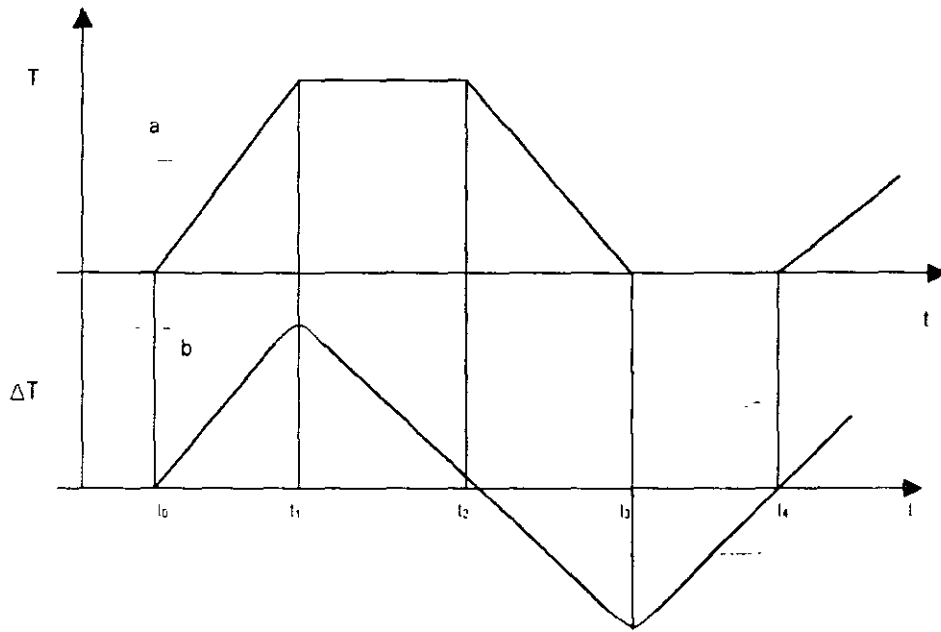


Fig. IV-5a. Variación cíclica de temperatura

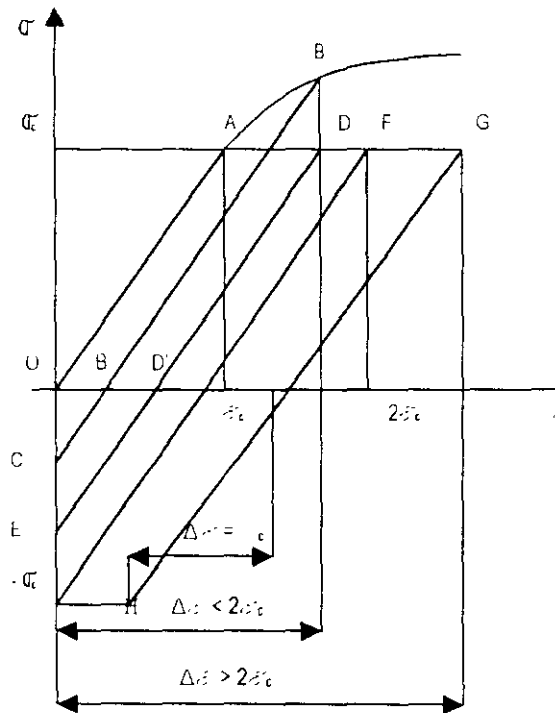


Fig. IV-5b. Deformación plástica cíclica

La deformación ϵ , es proporcional a la diferencia de temperatura ΔT , y a su vez, el esfuerzo unitario σ , es proporcional con la deformación en el dominio elástico, pero en el dominio plástico la deformación ϵ aumenta más rápido que el esfuerzo unitario σ .

En la Fig. IV-5a, se representa la evolución del esfuerzo unitario térmico σ y la deformación específica ϵ de una fibra situada en una zona concentradora de tensión, en el marco de una sollicitación cíclica en que se sobrepasa el límite de carga; para facilitar la presentación, se elige como origen la situación correspondiente al momento t_3 de la Fig. IV-5b.

En la Fig. IV-5b, se observa que el esfuerzo unitario crece proporcionalmente con la deformación, hasta el límite de carga σ_c (segmento OA), en el dominio plástico, la deformación crece más rápido que el esfuerzo unitario (curva AB). La distensión del material se produce según la línea BB'C; la fibra deformada plásticamente se reajusta a la fibra vecina inicial, por tensión interna de ligadura. En esta forma, al volver a las condiciones iniciales de funcionamiento, la fibra de la zona concentradora de tensión está sujeta a una tensión interna OC, para materiales tenaces, se puede sustituir la curva característica OAB con una de característica OAD con una de característica OAD de esfuerzo unitario ideal elástico/ideal elástico, y en éste caso, la distensión tiene lugar según la recta DD'E.

Se observa que, para una deformación total $\Delta \epsilon < 2\epsilon_c$, el ciclo se repite, sin repetir el fenómeno de carga aparecido en el primer periodo, y el material se comporta cuasi-elásticamente.

Por otra parte, si $\Delta \epsilon > 2\epsilon_c$, por ejemplo la evolución OAG, aparece al final de la distensión, una deformación plástica de vuelta HI; ϵ_c es la deformación específica correspondiente a la carga del material y por lo general tiene un valor admisible de 0.2%. Con la repetición del ciclo carga-descarga, el material sigue un bucle de histéresis IFGHI, este ciclo en forma repetida conduce a un estado de deformación plástica, lo que produce fatiga y aparición de fisuras en el material. Por lo anterior razón, las instrucciones de calentamiento y enfriamiento en periodos transitorios, se establecen en tal forma que la deformación específica total no sobrepase el valor de $2\epsilon_c$.

4.8 Fluencia

Los materiales de los equipos termomecánicos están sujetos a una fatiga de duración por el fenómeno de fluencia, con esfuerzo unitario constante y temperatura prácticamente constante, durante los procesos transitorios se producen esfuerzos unitarios mas grandes que los de régimen, lo cual acelera el proceso de fluencia. Este efecto debe tomarse en consideración para el cálculo de verificación de fluencia.

A temperatura elevada tiene lugar en los aceros modificaciones en sus fases de composición y en la morfología de sus constituyentes metalográficos, que ocasionan una disminución en la resistencia del material.

La modificación de la estructura de los aceros, sujetos durante tiempo prolongado a sollicitación constante, se manifiesta por una deformación continua y remanente, por el flujo lento de material en el tiempo, que recibe el nombre de FLUENCIA.

La fluencia es un fenómeno que se desarrolla en el tiempo como se muestra en la Fig. IV-6.

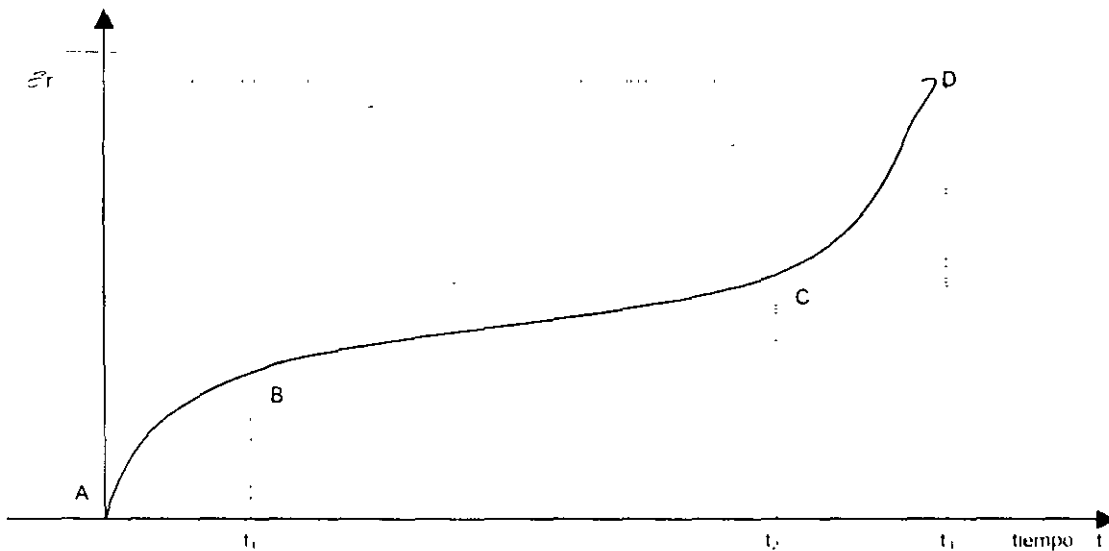


FIG. IV-6.- EVOLUCIÓN DEL FENÓMENO DE FLUENCIA

En la Fig IV-6. el primer estado (zona AB) se denomina estado primario de fluencia, en éste estado, el fenómeno todavía no se estabiliza. El segundo estado (zona BC), es el estado de fluencia propiamente dicho, en que el fenómeno progresa uniformemente en el tiempo. El tercer estado (zona CD), se conoce como fluencia acelerada y corresponde al periodo anterior al momento de destrucción por rotura del material; en ocasiones, el tercer estado se divide en dos. la primera parte se denomina fluencia acelerada, y la segunda parte fluencia destructiva.

La fluencia es un fenómeno que se inicia desde el momento de poner en servicio el material, aún en el inicio del primer estado, se puede constatar una disminución en la densidad de la probeta, y con el tiempo se producen microfisuras, que se ponen en evidencia sobre todo en el estado final. El carácter destructivo se modifica a la vez con el aumento de temperatura; al principio, la destrucción es intercrystalina, y después, iniciando a la temperatura llamada equicohesiona, la destrucción se convierte intercrystalina.

A temperatura relativamente baja y esfuerzo unitario grande, se forman microfisuras en forma de pluma en el plano de separación entre cristales, que se extienden y se unifican con el tiempo (Fig. IV-7).

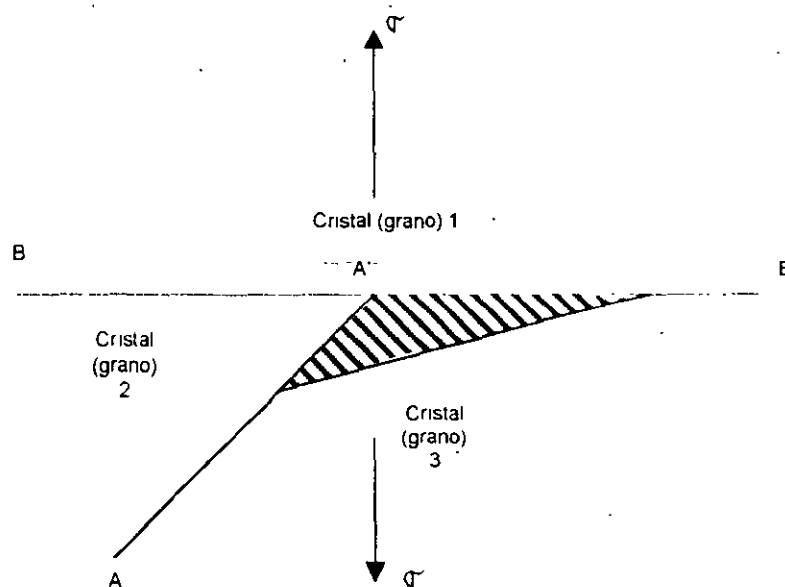


FIG. IV-7.- DESTRUCCIÓN INTERCRISTALINA POR FORMACIÓN DE MICROFISURAS EN FORMA DE PLUMA.

A temperaturas mayor y esfuerzo unitario relativamente pequeño, se forma una serie de poros en el plano de separación entre cristales, que por fusión finalmente forman discontinuidad en el material (Fig IV-8).

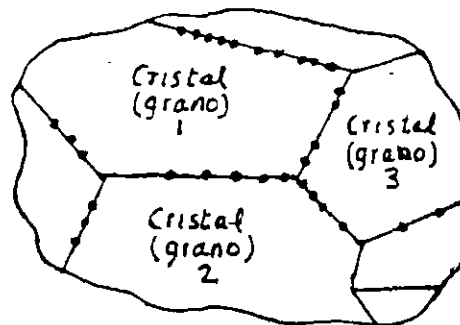


FIG. IV-8.- DESTRUCCIÓN INTERCRISTALINA POR FORMACIÓN DE POROS

Debido a la forma de producirse las fisuras, las pruebas de fluencia de corta duración y esfuerzo elevado, no dan información correcta sobre el fenómeno real de fluencia, que se produce con esfuerzo menor y en periodo de tiempo mayor; por este motivo, es necesario que las pruebas de fluencia utilizadas en extrapolación para determinar las características del material se efectúen con una duración bastante mayor (por ejemplo 10,000 h).

En instalaciones en operación, la fluencia se acelera si se sobrepasa la temperatura nominal. Para aceros austeníticos, en exceso de solo 5°C en la temperatura de operación nominal reduce la duración de funcionamiento de 23 a 33%; para aceros ferrítico-perlítico aleado, la reducción es de 33 a 46%. En la Fig. IV-9, se presenta el efecto del exceso de temperatura sobre la reducción en la duración de funcionamiento.

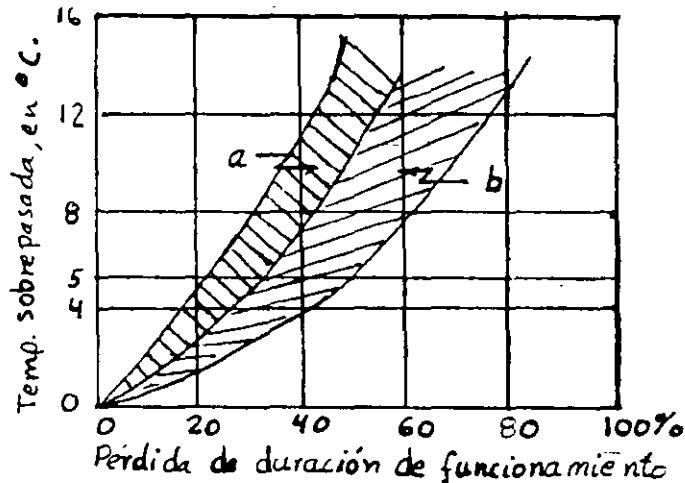


FIG. IV-9- EFECTO DE SOBREPASAR LA TEMPERATURA SOBRE LA DURACION DE FUNCIONAMIENTO
 A) ACERO AUSTENITICO
 B) ACERO FERRITICO Y FERRITO-PERLITICO

4.9 Deterioro del estrato de magnetita

Las superficies de los elementos bajo presión en contacto con agua, son protegidas de la corrosión por un estrato de magnetita; el esfuerzo unitario no debe sobrepasar la resistencia a la ruptura de este estrato, porque en caso contrario se producen fisuras por corrosión de esfuerzo alternado.

5. ESQUEMA DE CALCULO DE ESFUERZOS EN EQUIPO TERMOMECAÁNICO

5.1 General

El cálculo de las sollicitaciones en equipo termomecánico tiene una estructura compleja, el inicio de la modificación del estado de un agente térmico comprende.

- El cálculo del coeficiente de transferencia de calor.
- Determinación del campo o dominio de temperatura en el material de la pieza estudiada.

- Cálculo de la sollicitación mecánica y térmica.
- Composición de la sollicitación y comparación de la sollicitación equivalente con la sollicitación admisible.

En la resolución de ésta etapa son necesarias diferentes técnicas de cálculo en función de:

- La naturaleza del fenómeno
- La estructura de la pieza estudiada
- La hipótesis de simplificación admitida

5.2 Método de Cálculo

La síntesis de los métodos de cálculo se muestra en la Fig IV-10, caracterizados por

- Los principios de cálculo
- La tecnología de resolución
- Los resultados obtenidos

En la categoría de empírico o normativa técnica entra por ejemplo la relación para el cálculo del espesor de la pared de un recipiente a presión

El método analítico se utiliza en casos idealizados, es decir, para.

- Cuerpos geoméricamente regulares
- Propiedades constantes del material

5.3 Condiciones particulares de transmisión de calor

En la categoría del método analítico entra por ejemplo el cálculo del esfuerzo en las paredes de un conducto cilíndrico en régimen de calentamiento cuasiestacionario.

El método diferencial se utiliza para determinar el campo de temperatura; la ecuación de base del método se establece con ayuda del balance térmico de elemento de masa comprendido entre la sección 5 y la 5+ds.

Para determinar el esfuerzo local en un cuerpo de forma complicada, como la carcasa y el motor de una turbina, se utiliza el método numérico.

El método del elemento finito o método matricial requiere un volumen grande de cálculo por lo que se necesita equipo de cómputo.

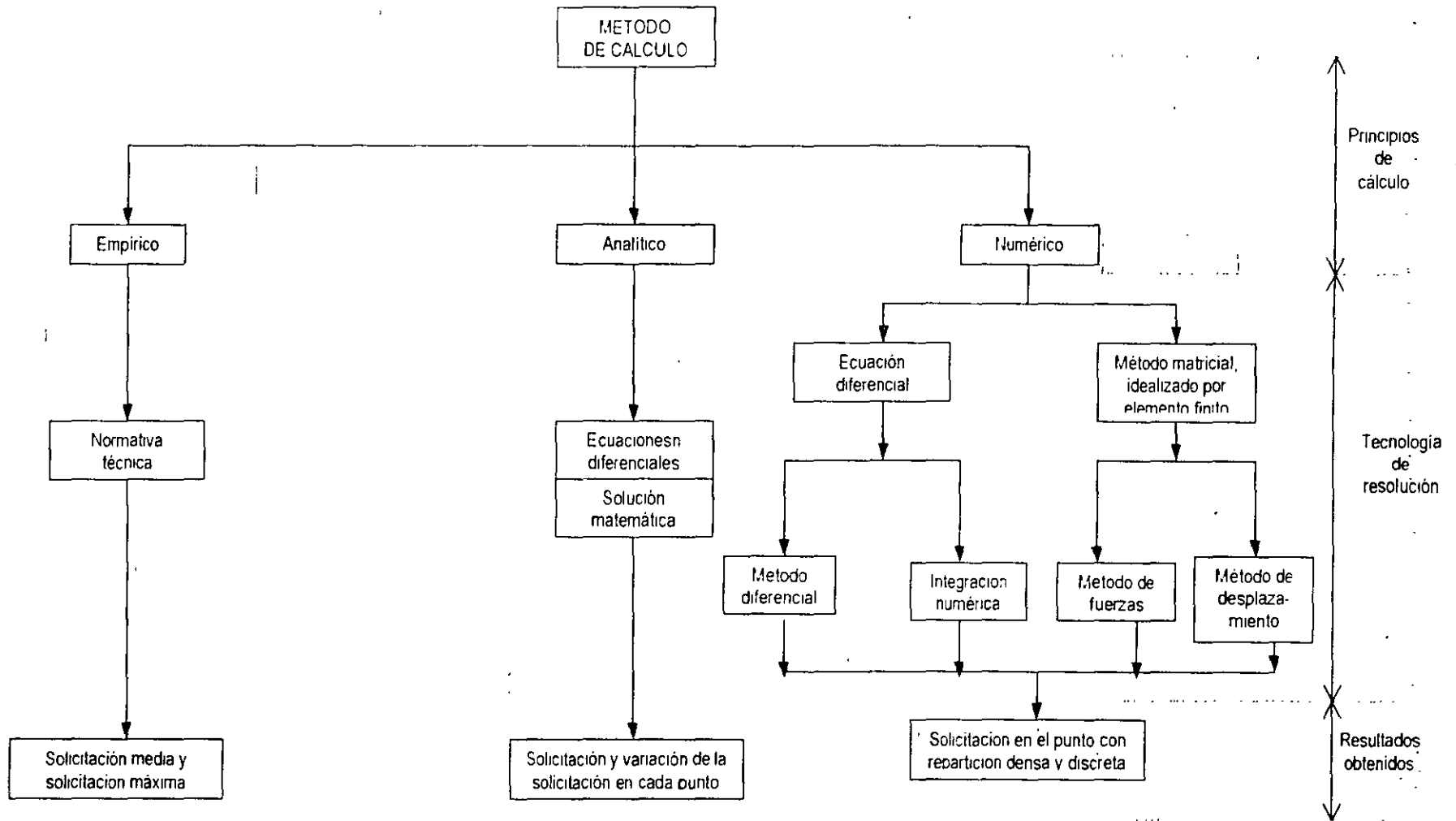


FIG. IV-10.- DIFERENTES MÉTODOS DE CALCULO DE SOLICITACIONES DE EQUIPO TERMOMECAÁNICO

La pieza que se va a calcular se divide en elemental de dimensiones finitas, y estos elementos representan los puntos de nodos. Cada elemento está caracterizado por una cierta relación carga-deformación de lo que resulta la rigidez relacionada al nodo respectivo. El ensamble de los puntos nodales determinaron la rigidez total de la pieza.

Determinando los datos de la fuerza externa se determinan la sollicitación y la deformación desconocidas del punto nodal. Tomando en consideración el equilibrio de fuerzas y la deformación igual de la longitud de un lado común de elemento se obtiene un sistema de ecuaciones lineales cuya solución proporciona los datos conocidos.

5.4 Coeficiente de transferencia de calor

Durante los periodos transitorios de funcionamiento, el coeficiente de transferencia de calor varía en forma importante; para determinarlo se necesita conocer las condiciones de flujo. El caso más complicado es el rotor de la turbina, a lo largo del cual se produce la expansión del vapor, con variación de parámetros de vapor y del coeficiente de transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia varía aproximadamente en una relación de 3 : 1 entre las partes de entrada y de salida de la turbina, y en una relación de 8 : 1 entre las fases de arranque y la de plena carga.

5.5 Dominio de temperatura en el material de la pieza estudiada

La relación analítica puede ser establecida solo en casos ideales, en que la forma de la pieza se simplifica y se reduce a forma geométrica regular, y aún en este caso, el volumen de cálculo es importante.

En realidad la forma de la pieza es complicada, y el proceso de cambio de calor es así mismo complicado, tanto por la variación local de temperatura causada por la expansión del vapor, como por la variación del coeficiente de difusividad térmica, en función de la temperatura; el campo de temperatura se modifica en el curso de procesos transitorios. En el rotor de una turbina, las isotermas al inicio del arranque forman aproximadamente un cilindro alrededor del eje de la turbina, y durante el funcionamiento estacionario con carga, las isotermas son aproximadamente perpendiculares al eje.

5.6 Esfuerzos :

Los esfuerzos a que están sujetos los equipos, son de naturaleza mecánica (presión, fuerza centrífuga, gravedad, etc.) y de naturaleza térmica; la sollicitación total es seguramente la suma de estas sollicitaciones. Durante el curso de ciclos calentamiento-enfriamiento, las sollicitaciones actúan en un sentido o en otro, y durante este tiempo con intensidad variable, las sollicitaciones térmicas son de dimensión reducida en régimen estacionario de funcionamiento, cuando la

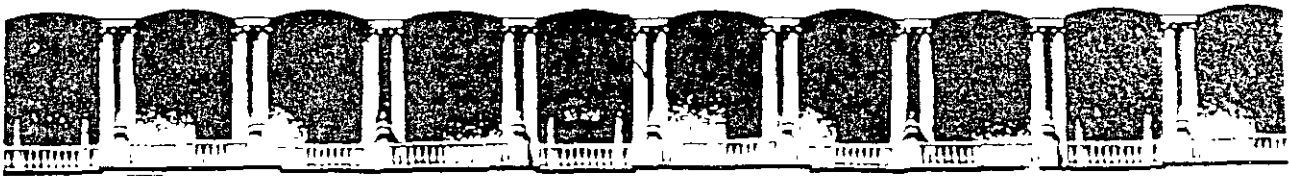
solicitación mecánica es preponderante. En régimen transitorio las solicitaciones térmicas aumentan mucho.

El efecto concentrador de tensión puede ser tomado en consideración en forma aproximada por el coeficiente de concentración o por el cálculo de la solicitación local en esta zona, con ayuda del método numérico de cálculo.

5.7 Características del material

La solicitación efectiva se compara con la solicitación admisible, que depende del material, la comparación se hace tanto de la solicitación estática de duración de fluencia, como de la solicitación dinámica cíclica de fatiga. No existen suficientes datos experimentales que establezcan la interdependencia de estas medidas, dado el efecto de relajación, así como la admisión de un coeficiente de seguridad relativamente grande, el cálculo se hace con la finalidad de asegurar una duración de vida y cierta solicitación estática para un número dado de ciclos de carga.

En el cálculo, debe tomarse en cuenta la variación de las propiedades del material con la temperatura, los procesos transitorios y en especial el límite de carga



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

**ING. ALFONSO RODRÍGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

VII.- Soldadura por arco eléctrico

Las necesidades de unir materiales de las instalaciones de las plantas industriales son extremadamente importantes y van en aumento cada día, sin embargo, existen muchos problemas debido al gran número de combinaciones de las siguientes variables :

- Diferentes tipos de equipos de soldadura
- Diferentes tipos de materiales de soldadura
- Diferentes clasificaciones de materiales a ser soldados
- Diferentes métodos empleados para realizar las operaciones de soldadura

Para asegurarse que la soldadura es adecuada para el propósito intentado, se requiere definir un método uniforme para realizar el proceso de soldadura, mediante un procedimiento en donde se especifique con significativo detalle para cada uno

- Tipo de equipo a ser usado
- Materiales que pueden ser unidos por soldadura
- Materiales de soldadura permisibles
- Método para realizar la operación de soldadura
- Configuración permisible de la junta de soldadura
- Necesidades de tratamiento de precalentamiento o postcalentamiento (relevado de esfuerzos).

Adicionalmente cada procedimiento de soldadura debe ser clasificado en la forma siguiente :

- Mediante la aprobación satisfactoria de una prueba de soldadura sobre una probeta producida, realizando una soldadura real de acuerdo con el procedimiento que esta siendo calificado ; los métodos y procedimientos de prueba son los establecidos por los códigos asme (american society of mechanical engineers) e incluye lo siguiente :

- A. pruebas de flexión
- B. pruebas de tensión
- C. análisis de radiografía
- D. análisis químico

- aprobación de cada soldador individual de una prueba similar a la prueba de soldadura descrita antes, sobre una muestra de junta de soldadura sujeta a las mismas pruebas, con lo cual el soldador queda calificado para el procedimiento en particular

Un soldador calificado puede perder su calificación en los siguientes casos :

- Si produce un número determinado de soldaduras malas
- Si no realiza una soldadura satisfactoria usando un procedimiento especificado dentro de un período de tiempo establecido por código o por proyecto.

La calificación perdida en la forma anterior puede recuperarse produciendo soldaduras aceptables bajo examen radiográfico.

Los equipos para soldadura con arco eléctrico se encuentran en gran variedad de formas y tamaños, requiriéndose primariamente energía eléctrica ; los equipos empleados para soldadura son los siguientes :

- Generadores movidos por maquinas de gasolina o diesel (es el método mas caro), que se emplean en la etapa temprana de construcción y en áreas externas alejadas.
- Conjuntos individuales de motor generador, cuando la energía temporal esta disponible.
- Unidades tipo rectificador, cuando ya se tiene energía temporal.
- Sistema centralizado (cuando el edificio empieza a tomar forma), en donde la unidad de potencia consiste de uno o mas paquetes de energía localizados centralmente y conectados a un sistema de red ; cuando se usa este sistema, se necesita una pieza secundaria de equipo que es una unidad tipo rectificador, individual o múltiple, que se conecta al sistema de red y se emplea para proveer a cada soldador con la corriente eléctrica necesaria.
- Equipo para realizar las operaciones de recalentamiento y postcalentamiento de relevado de esfuerzos, que consiste de una maquina sencilla de soldadura que alimenta a una bobina de calentamiento por resistencia enrollada y cubierta alrededor del tubo, con control de temperatura manual o automáticamente.
- Cable de soldar eléctrico de calibre grueso en cobre o aluminio para conectarse al equipo de soldadura, empleando en promedio cada soldador 50m. para corriente y 8m. para tierra, con un régimen de reposición anual de 15% ; los cables tienen conectores macho-hembra y cubierta protectora para no exponer partes metálicas cuando estén desconectados.
- Equipo para el soldador como casco, careta, guantes, protectores, etc. ; en áreas excepcionalmente calientes o cuando la soldadura produce flamas tóxicas, puede ser necesario equipar la careta del soldador con una manguera de aire fresco o equipos auxiliares de respiración. en determinadas circunstancias es necesario emplear rejillas resistentes a la flama y ropas retardantes de la flama.

En general los métodos de soldadura con arco eléctrico, pueden ser clasificados en las tres siguientes :

- A) Soldadura de arco metálico manual, que requiere el empleo de un dispositivo de sujeción manual conectado al cable de soldar para sujetar y maniobrar el electrodo, así como para establecer y mantener el arco de soldadura que se forma al pegar el electrodo con el metal aterrizado, formando una zona de metal fundido que transporta el metal del electrodo para soldadura.
- B) El método de tungsteno con gas inerte (tungsten inertgas= tig) se emplea mucho para soldar aceros austenicos : en este método, el sujetador del electrodo tiene un tubo conectado a un suministro de gas inerte (argón o helio) que rodea el arco de soldadura y el electrodo es un alambre de tungsteno que se dirige a un punto en el final del arco, con lo que este se encuentra dentro de un cono de gas inerte. cuando se usa metal de relleno, se suministra por una varilla de alambre desnuda alimentada al área de metal fundido del arco. el gas inerte puede suministrarse de cilindros individuales o de un sistema centralizado, necesitándose en ambos casos un regulador de flujo para alimentar la cantidad apropiada de gas.
- C) El método metálico con gas inerte (metal inergas=mig) es un proceso similar al tig, solo que en lugar de emplear electrodo de tungsteno utiliza para el relleno un alambre metálico alimentado por un motor a través del sujetador y se emplea para establecer el arco ; este método se aplica en trabajos de placas planas, y en tubería con maquinas automáticas principalmente.

Los tres métodos anteriores son los que principalmente se usan para los trabajos de campo en soldadura manual, teniéndose a la fecha todavía muchos problemas para el empleo de maquinas de soldadura automática a pesar de las ventajas significativas que tiene, entre las que se encuentran las siguientes :

- Menores horas-hombre para realizar una soldadura
- Alta calidad del trabajo producido con lo que se tiene una gran economía al no tener que hacer trabajos de reparaciones de soldadura
- No se requiere contar con muchos soldadores calificados

La soldadura es una de las actividades de construcción que requiere mayor verificación de control de calidad ; en el caso de sistemas nucleares o de seguridad, el control que se realiza es el siguiente :

- Cada parte conectada con soldadura debe ser completamente verificada y documentada.
- Cuando llegan las varillas de soldadura al almacén, debe verificarse la certificación del material.
- Las varillas de soldadura se proporcionan al campo, únicamente después de que la documentación de sus propiedades físicas y químicas ha sido aprobada.
- Los soldadores deben de obtener las varillas de soldaduras de un almacén controlado.
- En la orden al almacén por soldadura debe especificarse :

- * Tamaño y tipo de varilla
- * Numero de material
- * Soldador que saca la varilla
- * Soldadura de campo donde se utilizara

- El número de varillas que se sacan deben ser contadas y verificadas por el soldador.
- Las varillas que no se usan y las quemadas parcialmente deben regresarse al almacén.
- Cualquier diferencia entre las varillas sacadas y usadas y regresadas al almacén, debe documentarse.

Se deberán mantener registros en archivos de cada soldadura en la que trabaje un soldador en que se incluye :

- Fecha
- Procedimiento usado
- Si la soldadura fue aceptada o rechazada
- Fecha de calificación de cada procedimiento
- Fecha en la que el soldador, hizo la ultima soldadura de cada procedimiento
- Indicación si el soldador se esta aproximado al limite de tiempo permitido entre soldaduras de cualquier procedimiento

Cuando un soldador ha producido una soldadura inaceptable en un procedimiento, se deben inspeccionar en este procedimiento el 100% de soldaduras en lugar del 10% que indican los códigos.

Deberá mantenerse la historia de la soldadura en donde se indique :

- Procedimiento de soldadura usado
- Tamaño, tipo, etc. de varilla de soldadura
- Anillo de respaldo o inserto usado

- Fechas de inicio y terminación.
- Fecha de inspección

Las actividades que deberán inspeccionarse antes de iniciar la soldadura incluyen las siguientes .

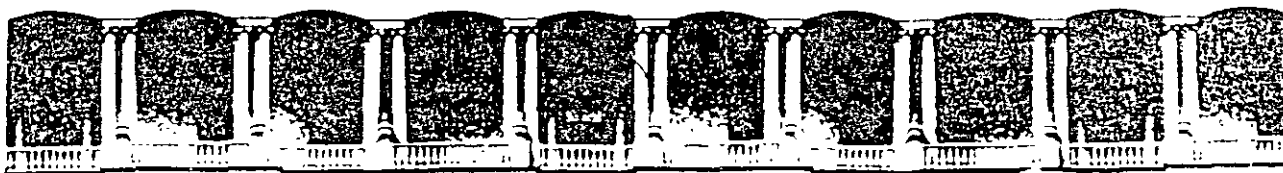
- Limpieza de la tubería o equipo y la junta
- Configuración y condición de la preparación de los extremos de soldadura
- Instalación y uso apropiado de anillo de respaldo o insertos consumibles
- Alineamiento de la junta con las tolerancias permisibles
- Purga correcta del interior de la tubería o equipo a la atmósfera
- Flujo correcto de gas inerte

Las verificaciones de las actividades de soldadura, incluyen la inspección de lo siguiente :

- Paso del fondo, base o raíz
- El comportamiento apropiado
- El espesor de la soldadura, si se para el procedimiento
- Una inspección visual de la soldadura en cualquier etapa y a su terminación
- La temperatura del metal base antes de la soldadura y entre pasos de soldadura
- Condiciones bajo las cuales se conserva la varilla de soldadura

La historia de la soldadura incluye lo siguiente :

- Notaciones respecto a la condición de la superficie
- Altura y ancho de la capa de soldadura
- Traslape o recorte
- Resultado de inspecciones de partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ultrasonido y radiografías



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

TRATAMIENTO DEL AGUA DE CALDERAS

**ING. JUAN PELAYO ROJAS
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

VIII.- Tratamiento del agua de calderas

En la operación de calderas la calidad del agua es un factor crítico.

En su estado natural el agua pura no tiene olor, sabor ni color y es el solvente mas universal. Los varios tipos de agua pueden clasificarse en :

- Aguas superficiales, de corrientes, ríos, estanques, lagos y depósitos.
- Aguas subterráneas, de manantiales y pozos someros y profundos.

El agua es evaporada de la superficie de la tierra por el sol y regresa a la tierra en la forma de lluvia, granizo y nieve ; en su retorno :

- Cuando desciende a través de la atmósfera absorbe oxígeno, nitrógeno y bióxido de carbono.
- En el suelo lava el lodo y arena y las lleva a los lagos y ríos.
- Absorbe la materia orgánica de plantas y árboles y las acumula en los lagos y depósitos.

El agua que se filtra a través del suelo a depósitos de agua subterránea, disuelve minerales y químicos del suelo ; las impurezas que recoge el agua pueden ser divididas en dos clases :

- Sólidos suspendidos. Son los que no se disuelven en el agua y pueden ser removidos por filtración.
- Sólidos disueltos. Son los que se dispersan en el agua y no pueden removerse por filtración. Los gases pueden disolverse en el agua, pero a menos que se combinen químicamente con otras impurezas en solución, pueden ser liberados con la evaporación del agua.

Los principales minerales y químicos que crean problemas en la operación del sistema de caldera son los siguientes :

- Bióxido de carbono (CO_2). Produce corrosión en las líneas de vapor y condensado.
- Sulfatos (SO_4). Se suma al contenido de sólidos del agua y se combina con l incrustación del sulfato de calcio.
- Cloruros (CL). Se suma al contenido de sólidos del agua e incrementa el carácter corrosivo del agua.
- Nitratos (NO_3). Se suma al contenido de sólidos.
- Sílice (SiO_2). Es la fuente de incrustaciones en los sistemas de caldera y de enfriamiento y de álabes de turbinas.
- Oxígeno (O_2). Produce corrosión de calderas, líneas de condensado y cambiadores de calor.
- Calcio (Ca). Fuente de incrustación en calderas.
- Magnesio (Mg). Fuente de incrustación en calderas.

La formación de incrustación en las superficies de calentamiento de las calderas es el problema más serio en la producción de vapor; el propósito de tratar el agua antes de que entre a la caldera es el de reducir la cantidad de incrustación y los depósitos formadores de lodos, sin embargo, como ningún tratamiento externo puede remover todos los químicos perjudiciales, se debe proveer un tratamiento interno del agua de caldera.

La causa primaria de la formación de incrustación es la disminución en la solubilidad de las sales debido a un aumento de temperatura, es decir, que mientras más altas son la temperatura y la presión en las calderas, las sales formadores de incrustación son más insolubles.

La incrustación ocurre en dos formas básicas :

- Primero, el agua entra a la caldera y al elevarse la temperatura, el carbonato de calcio (CaCO_3) se deposita en el acero de la caldera y se endurece (horma) en el lugar como incrustación.
- Segundo, la incrustación también se deposita de la sobresaturación local del agua de la caldera, especialmente en calderas con circulación lenta.

La película delgada de agua de caldera inmediatamente adyacente a la superficie de calentamiento tiende a volverse más concentrada que el resto, con lo que la solubilidad de las sales se reduce en esta área y se deposita incrustación en las superficies de calentamiento.

La incrustación en una caldera crea un problema porque en todas sus formas tiene un bajo coeficiente de conductividad de calor. La presencia de incrustación crea una barrera aislante al flujo de calor y disminuye la eficiencia de la caldera; la temperatura en la chimenea aumenta porque la caldera absorbe menos calor de los gases de combustión, con el consiguiente aumento de costos. Aún un 2% ó 3% de reducción en el calor transferido resultan en pérdidas económicas importantes.

Más importante que lo anterior es un posible sobrecalentamiento del metal de la caldera por la falta de transferencia de calor (enfriamiento) debido a la incrustación; los daños resultantes por el sobrecalentamiento pueden ser el quemado de tubos y "ampollas" en los domos de vapor y agua.

Las sales de calcio y magnesio son las fuentes más comunes de incrustación en las calderas, por lo cual :

- El tratamiento externo como desmineralización, evaporación, suavización, caldosa, etc., se diseña para remover las sales de calcio y magnesio del agua.
- El tratamiento interno busca evitar depósitos de sales residuales y mantener limpias las superficies de la caldera.

Con relación al magnesio se tienen las siguientes características y condiciones :

- Las sales de magnesio presentes en el agua de alimentación por lo general son más fáciles de prevenir que formen incrustaciones que las sales de calcio.
- Normalmente el magnesio se precipita en forma de hidróxido de magnesio.
- Las sales de magnesio encontradas en la incrustación de las calderas son :
 - * hidróxido de magnesio
 - * silicato de magnesio
 - * fosfato de magnesio
- El fosfato de magnesio no es una incrustación muy dura, pero el silicato de magnesio forma una incrustación extremadamente dura, por lo general en lugares de alta transferencia de calor.

Tanto el magnesio como el calcio causan problemas en la operación de las calderas que pueden estar mezclados con depósitos de sílice que se combinan con ellos para formar depósitos complejos, especialmente en calderas que operan a alta presión. La prevención de incrustación en las calderas por sílice puede resolverse en la siguiente forma :

- Por tratamiento externo (más común)
- Por mantenimiento de altas concentraciones de alcalinidad y alto residual de fosfatos.

Para evitar la coacción de las sales de calcio y magnesio en las superficies de calentamiento de la caldera, el tratamiento interno involucra :

- Fosfato de sodio
- Fosfato trisódico
- Fosfato disódico

Una vez que los químicos anteriores entran a la caldera reaccionan con el calcio para formar fosfato tricálcico un precipitado floculento (lanudo). Para asegurarse que se realiza ésta acción se debe mantener una alta alcalinidad ; a un pH de 9.5 ó menor el calcio no se precipita adecuadamente.

En algunas aguas con muy alta alcalinidad en que se desea reducir el Ph pueden usarse fosfatos ácidos como el metafosfato de sodio y fosfato monosódico. La acción que producen cuando entran a la caldera es exactamente la misma que el fosfato trisódico pero reducen la alcalinidad.

Una vez que las sales de calcio y magnesio se precipitan es necesario conservarlas en forma fluida para purgarlas de la caldera. La realización de esto es con el uso de compuestos orgánicos como derivados de :

- Taninos. Se extraen de la madera y la corteza, tienen un peso molecular alto y son químicamente complejos.
- Ligninos. Son sustancias orgánicas complejas.
- Almidones. Forman junto con las algas marinas, las bases para la química polímera que permiten a las concentraciones de sólidos totales ser disueltos en el agua de la caldera sin la formación de incrustaciones.

- Algas marinas. Igual que los almidones.

Todos estos agentes orgánicos forman una cubierta alrededor de los precipitados inorgánicos disminuyendo su tendencia a adherirse a las superficies de la caldera. Los agentes orgánicos son también importantes para efectuar la formación de cristales, es decir, inhiben directamente los depósitos de incrustación.

A pesar de la efectividad del tratamiento del agua contra la formación de incrustación, es esencial seguir un programa diario de pruebas para controlar el tratamiento químico y las purgas.

Los procedimientos de prueba para llevar a cabo dependen de las condiciones de la planta, pero deben incluir la verificación de los siguientes constituyentes del agua de caldera :

- Dureza. Es la suma de las sales de calcio y magnesio en el agua.
- Alcalinidad. Previene la corrosión ácida y ayuda en la precipitación del calcio y el magnesio.
- Cloruros. Para calcular el régimen de purga.

La prueba de dureza que se realiza mas fácilmente, determina la precipitación de las sales de calcio y magnesio con una solución estándar de jabón. La precipitación de los jabones de calcio y magnesio ocurre y no aparece ya espuma hasta que se ha agregado suficiente jabón para precipitar todo el calcio y el magnesio de la solución. Los resultados se miden en ppm como Ca CO_3 ; cuando el tratamiento es correcto el agua de caldera mostrará dureza cero.

La prueba de alcalinidad se determina por titulación (graduación, análisis volumétrico) con una solución ácida estándar. En esta medición el punto final se considera el punto de cambio en el color de indicadores orgánicos conocidos como :

- Fenoftaleina
- Naranja metil (Metil orange)

El cambio de color muestra la calidad ácida neutralizante de la muestra probada. La alcalinidad del agua de caldera debe ser :

- Suficientemente alta para proteger de la corrosión al metal de la caldera, y
- Suficientemente baja para evitar arrastres de sólidos con el vapor.

Se debe evitar la presencia de alta alcalinidad a la naranja metil porque con el calor en la caldera el bicarbonato de sodio se rompe y libera bióxido de carbono (CO_2) con el vapor, que corroe las líneas de vapor condensado.

Dependiendo de la planta, una alcalinidad de 300ppm como Ca CO_3 debe ser suficiente para precipitar las sales formadoras de incrustación y al mismo tiempo reducir la posibilidad de generación de CO_2 .

Los cloruros de calcio, magnesio, sodio y otros elementos en el agua son extremadamente solubles y normalmente no se precipitan fuera de la solución.

Puesto que los cloruros no se precipitan, entonces la cantidad presente en el agua de caldera es proporcional al total de sólidos disueltos ; en la práctica, el régimen de purga se gobierna controlando el contenido de cloruros en el agua de caldera.

La determinación de cloruros en el agua de alimentación junto con la del agua de caldera provee una base precisa para determinar el régimen de % de purga (especialmente con purga continua) ; la fórmula que aplica es la siguiente :

$$\frac{\text{Cl en agua de alim.}}{\text{Cl en agua de caldera}} \times 100 = \% \text{ de purga}$$

La concentración de cloruros se usa también para estimar el % de agua de repuesto para la caldera ; para encontrarlo se determina la cantidad de cloruros en el agua de alimentación de repuesto de caldera y retorno de condensado. Para una verificación gruesa y determinar la presencia o ausencia de cloruros en el efluente de un suavizador de zeolita de sodio, unas pocas gotas de nitrato de plata en el efluente aparecerá como una nube láctea conforme la plata se precipita como cloruro de plata.

En la prueba de cloruros, el agua que contiene cloruros se titula con nitrato de plata en presencia de cromato de potasio ; los cloruros se precipitan como cloruro de plata y el punto final se alcanza cuando una gota adicional de nitrato de plata produce un color rojo. El exceso de sulfito en el agua de caldera puede interferir con esta prueba por lo que el sulfito debe oxidarse a sulfato con la adición de peróxido de hidrógeno.

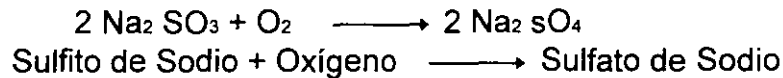
Una caldera libre de incrustación, con purga controlada, ayuda a la operación eficiente de la caldera, pero aparece otra fuente de problemas por el oxígeno en el agua de caldera. Aún con un buen deareador el oxígeno entra a la caldera y causa lo que se conoce como "picadura" (pitting) de oxígeno.

El oxígeno disuelto puede entrar a la caldera no solo a través del agua cruda sino también por aire de fugas en el retorno de condensado cuando este trabaja con vacío ; el oxígeno disuelto en ella agua de caldera se libera por un incremento de la temperatura y ataca el metal de la caldera causando picaduras.

La localización de las picaduras por oxígeno puede variar con el diseño de caldera, pero por lo general se concentra al nivel del líquido en el domo de vapor y fuertemente concentrada donde el agua de alimentación entra a la caldera.

La etapa mas importante en la eliminación de oxígeno del agua de alimentación es la deareación del agua, sin embargo, es necesario que a la deareación mecánica siga una recogedora o barredora de oxígeno química inyectada a la línea de repuesto de agua o directamente a la caldera.

Este químico es el sulfito de sodio y las propiedades recogedoras del oxígeno se muestran en la siguiente fórmula :



Se requieren cerca de 10 kg. de sulfito de sodio para absorber 1 kg. de oxígeno, pero a pesar de las cantidades teóricas es importante mantener concentraciones residuales de sulfito en el agua de caldera, para asegurarse que todo el oxígeno es recogido. Se desarrolló el sulfito de sodio catalizado para remover el oxígeno del agua fría, sin embargo el grado típico de sulfito de sodio comercial es efectivo para la mayoría de las calderas.

La prueba para la presencia de sulfito en la caldera se basa en la titulación de una muestra con yodato de potasio que produce un color azul en presencia de una solución de almidón.

Además de la picadura de oxígeno, el metal de la caldera puede ser atacado por una condición ácida en el agua de la caldera. Si se mantiene la alcalinidad correcta para precipitar las sales de calcio y magnesio en forma de lodos, no es necesario el vapor del pH como un control, aunque si se recomienda como un chequeo de la alcalinidad ; para el promedio de calderas industriales normalmente se mantiene un pH de 10.5

La prueba del pH se utilizó por primera vez en la fabricación de cerveza en Dinamarca durante el proceso cervecero y se le dio la designación de pH, de "potencial hidrógeno", una definición mas exacta es el logaritmo del recíproco de la concentración del ion hidrógeno.

En forma simple, el pH varía entre 0 y 14 denotando varios grados de acidez o alcalinidad ; sobre la escala del pH :

- 7 es exactamente neutral
- A "0" la solución es altamente ácida
- Más de 7 la solución es alcalina

El valor del pH puede determinarse de varias formas : una es con papel pH que se usa sumergiéndolo en la solución y según el cambio de color, que se compara con un estándar ajustado, el papel indica la lectura aproximada del pH.

En la determinación del pH también se tiene el método colorimétrico que utiliza la comparación de color con estándares específicos y una aparato electrométrico de electrodos de vidrio y que utiliza un potenciómetro para determinar el voltaje desarrollado entre dos electrodos en contacto con la solución.

Otra determinación requerida para asegurar el control completo del agua de caldera es la cantidad de sólidos totales disueltos (STD) en el agua. La cantidad de STD se usan también para determinar el régimen de purgas ; dependiendo de la temperatura y presión de la caldera, es posible ahorrar mucha energía permitiendo que los STD se eleven previo a los niveles no aceptables.

La determinación de los STD puede hacerse solo en laboratorio bien equipado, que incluye la evaporación de la mezcla de una muestra medida y el pesaje del residuo remanente o bien con otros dispositivos comerciales.

Después de tener asegurada una caldera limpia, sin incrustación y sin corrosión, se pueden analizar otras secciones del sistema de condensado y vapor que requieren cuidado para prevenir la incrustación y la corrosión que son un problema en muchas plantas. Las fallas mas frecuentes ocurren en juntas roscadas debido al adelgazamiento de la tubería en esas partes ; la acción corrosiva resulta en estriado del la tubería y picadura del metal.

La corrosión de las líneas de vapor y condensado es causada principalmente por los gases disueltos, bióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2) :

- La fuente de oxígeno es el agua de alimentación de la caldera o infiltración en: un sistema de retorno con vacío. Un deareador mecánico eficiente y el uso de sulfito catalizado eliminan la mayoría del oxígeno causante de corrosión.
- La fuente primaria de CO_2 es la alcalinidad de bicarbonato y carbonato del agua de repuesto que cuando se sujeta a la temperatura de la caldera se descomponen. los carbonatos y liberan CO_2 que entran con el vapor. El CO_2 es la causa usual de corrosión de la línea de vapor y de retorno, y se caracteriza por un adelgazamiento general de la pared de la tubería o acanaladura a lo largo del fondo de la tubería.

Con objeto de controlar adecuadamente todos los factores en el tratamiento del agua de caldera es esencial que el agua de caldera y el retorno de condensado se prueban diariamente mediante procedimientos estándares de prueba que deben realizarse por personal de operación como parte de sus actividades regulares.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

**PROCEDIMIENTO DE HERVIDO DE CALDERAS, LIMPIEZA QUÍMICA
Y ALMACENAMIENTO**

**ING. ALFONSO RODRÍGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

IX.- Procedimiento de hervido de calderas, limpieza química y almacenamiento

Cuando una caldera nueva se pone en servicio por primera vez o después de una reparación mayor, esta se puede limpiar hirviéndola con una solución detergente y alcalina para retirar todas las sustancias extrañas, principalmente aceite y grasa de la superficie de metal de la caldera, pares de agua, economizador y sobrecalentador. Si el sobrecalentador es del tipo no drenable no debe intentarse su hervido. Se sugiere la instalación temporal de cristales de nivel durante las operaciones de hervido o limpiar los cristales después del mismo.

Un tratamiento como el que se emplea para este propósito requiere una solución de 2 kg. de cada uno de los siguientes reactivos para cada 1000 kg. de agua contenidos por las partes a presión a limpiarse: Carbonato de sodio (Na_2CO_3), Fosfato trisódico dodecahidratado ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), Sosa caustica (NaOH) o detergente Dow f-57 a 0.025% por volumen, es decir, 2 litros por cada 4,000 lts. de agua.

La soda ash, al ser calentada con el agua, forma hidróxido de sodio dando como resultado un p.h. alto (13 aprox.). Este ph alto, a la temperatura del hervido, tiende a disolver la sílice, así como a emulsionar los aceites, grasas y otros agentes similares dentro de la caldera.

El fosfato trisódico se usa por su acción detergente. Se obtiene comercialmente en su forma dodecahidratado, es decir, sus cristales se componen de 12 partes de agua por una parte de sal. La dosificación de 2 kg. por cada 1000 lt. de agua esta basada en el dodecahidrato.

Si solo puede conseguirse fosfato trisódico anhídrido, es decir, puro, entonces se reduce la dosificación al 50%, o sea, 1 kg. por cada 1000 lt. de agua.

Con el objeto de desestimular al máximo el contacto entre el agente disolvente NaOH y la grasa, se recomienda el detergente, el cual disminuye la tensión superficial del agua y promueve la humectación completa NO DEBEN USARSE detergentes ordinarios para uso domestico. Si no es posible obtener precisamente el Dow f.57, de los representantes de Dow Chemicals, es preferible omitir esta substancia.

La unidad a limpiar se llena inicialmente hasta la mitad del cristal de nivel con agua caliente de preferencia. Disuélvase las substancias químicas completamente e introdúzcanse gradualmente en el agua, de preferencia a través del registro de hombre en la parte superior, Cíerrese la caldera y enciéndase un fuego ligero, suficiente para tener circulación positiva en todas las partes de la caldera. Continúese este hervido por unas 24 horas.

Auméntese el régimen de fuego de manera que se llegue a una tercera parte de la presión normal de trabajo o mas de 21 kg/cm² (300 lb/pulg) para unidades con presión de diseño

superior a kg/cm^2 (9 lb/pulg), con el venteo del sobrecalentador abierto. Púrguese una cantidad equivalente a $\frac{1}{2}$ cristal de nivel, dividiendo la purga entre el domo de todos y las paredes de agua sucesivamente y recupérese nuevamente el nivel con agua limpia y caliente. Repítase lo anterior varias veces hasta que el agua de purga sea clara. Permítase enfriar la caldera y después drénesse y lávense las superficies internas por medio de una manguera. Debe darse atención particularmente al lavado de los domos inferiores, cabezales, y todos aquellos puntos en donde las incrustaciones desprendidas, óxido o suciedad, puedan acumularse.

El procedimiento anterior puede substituirse por otras fórmulas para limpieza u otros procedimientos, siempre y cuando estos estén aprobados por el fabricante de la caldera o por un consultor calificado.

Limpieza química

Durante operación normal, depósitos de óxidos metálicos gradualmente crecen en las superficies internas de los tubos, especialmente en las áreas de alto intercambio de calor tales como la zona del quemador de la caldera. Los depósitos deberán periódicamente ser removidos ya que pueden causar sobrecalentamiento, corrosión acelerada y falla de tubos.

Solamente un aspecto de la limpieza química tocaremos en esta sección: **Actividades soporte de mantenimiento.**

Estas actividades soporte, incluyen la instalación, prueba, aislamiento y remoción de tuberías asociados con la limpieza química. Normalmente el proceso de limpieza química se hace bajo la supervisión del grupo de ingenieros de operación y químicos, la sobrecarga para el grupo de mantenimiento es muy larga, con mucho del trabajo empezando cuando hay un paro de calderas.

Actividades soporte de mantenimiento

preparaciones para la limpieza química

La mejor planeación química de una caldera empieza con una junta, durante la cual los químicos a usarse, el tiempo y secuencia de la limpieza y preparaciones de mantenimiento se discuten y confirman. El procedimiento recomendado tiene que incluir a todos los participantes de la limpieza de tal manera que no solo conozcan su parte sino también las partes de la otra gente que trabajara durante la limpieza. Las precauciones de seguridad son vitales durante la limpieza y es durante la junta donde se pueden revisar y finalizar.

Las preparaciones de mantenimiento son extensas y las siguientes actividades son normalmente requeridas:

- a) Inspección de todas las tuberías temporales que se usaran durante la limpieza. Cualquier tubería corroída, dañada o no adecuada deberá reemplazarse.

- b) Mover los cilindros de nitrógeno al domo superior de la caldera que se usaran durante el drenado.
- c) Instalar las válvulas reductoras de presión en la línea de llenado de hidrogeno.
- d) Instalación de vidrios de niveles temporales en el domo de la caldera. estos vidrios de nivel deberán protegerse de rupturas o corruptoras accidentales y deberán proveerse con conexiones de venteo y drenaje adecuadas.
- e) Colocar ventiladores para ventilar las áreas donde tiendan a colectarse gases durante la limpieza.
- f) Colocar extensiones de venteos hacia el exterior.
- g) Instalar alumbrado temporal, especialmente en el área de mezclado y bombeo de químicos.
- h) Instalación de tuberías temporales. Las tuberías deberán ser soldadas o bridadas dependiendo de la presión y temperatura usadas. Se podrán usar mangueras flexibles para purgas de agua, líneas de nitrógeno, extensión de venteos y usos similares.
- i) Establecer una restricción de área. El área de limpieza química tiene que ser restringida al uso de flamas abiertas, soldaduras, etc.
- j) Todo el personal de mantenimiento que se requiera estar presente durante la limpieza química, debe tener el equipo apropiado de protección incluyendo goggles.

Las actividades de mantenimiento durante la limpieza son relativamente menores, si la limpieza marcha bien y no hay fugas o fallas de quipos. No se hacen trabajos en la caldera mientras la limpieza se efectúa y solamente trabajos limitados pueden hacerse alrededor de la caldera.

Después que la limpieza es completada, los trabajos de mantenimiento arrancan otra vez. Deberán desconectarse las tuberías temporales, lavarlas, secarlas y almacenarlas. Los registros del domo, cabezales, tapas de registro de hombre y de mano deberán abrirse para hacer inspección interna y los cabezales internos del domo deberán lavarse para eliminar el lodo remanente.

Cambiar el vidrio de nivel temporal por el vidrio permanente de alta presión reemplazando todos los empaques.

planeación

la planeación de una limpieza química se tiene que hacer con meses de anticipación para planear cuidadosamente los trabajos y el personal incluido en la limpieza. cada grupo de

mantenimiento, incluyendo los electricistas, instrumentistas y mecánicos tendrán su propia lista individual de trabajo.

procedimiento de lavado químico

limpieza ácida

1. Después de que se llena la caldera con agua desmineralizada, debe elevarse la temperatura del agua con encendidos a fuego mínimo o utilizando el agua calentada en el deareador, de tal manera que se maneje una temperatura de $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ en el agua que se va a usar para la limpieza ácida.
2. Llene el tanque de químicos con agua desmineralizada hasta un tercio de su capacidad, agregue inhibidor y mezcle con agua después, agregue la cantidad necesaria de ácido cítrico y los otros químicos especificados. Mezcle todo correctamente en el tanque con la bomba de químicos.
3. Antes de enviar la solución ácida a la caldera, asegure lo siguiente :
 - a) Que la válvula de venteo del domo este abierta.
 - b) Que el indicador de nivel provisional del domo este en buenas condiciones.
 - c) La temperatura del agua debe checarsse continuamente y registrarse.
4. Vacíe la solución ácida a la caldera, controlando durante una hora por medio de la bomba de circulación de químicos y la bomba de químicos. La temperatura de la solución ácida debe mantenerse entre 75 y 85°C .

Cuando el nivel del domo se establece en el indicador, debe operarse continuamente la bomba de circulación de químicos.

5. El nivel del domo durante la limpieza química debe mantenerse en el nivel normal de operación de la caldera.
6. Inmediatamente después de vaciar la solución ácida a la caldera deben de tomarse muestras de dicha solución. Estas y las muestras subsecuentes deben ser analizadas de ph y fe. El muestreo y análisis deben repetirse cada hora hasta que se determine saturación de concentración en fe. En general, el tiempo de limpieza se efectúa satisfactoriamente en menos de 6 horas.
7. Drene la solución ácida de la caldera. La caldera deberá drenarse completamente por medio de gas nitrógeno ($0.2-0.6 \text{ kgr/cm}^2$), a través de su línea de venteo de aire.

lavado con agua

1. Llene la caldera con agua desmineralizada a su nivel normal.

2. Opérense las bombas de condensado y circulación de químicos. El agua en la caldera deberá reemplazarse. Esta operación debe continuarse hasta que el pH y la concentración total de Fe sean : $\text{pH} = > 3$ y $\text{Fe} = < \text{ppm}$.

enjuague con ácido cítrico, neutralización y pasivación.

1. Para el enjuague con ácido cítrico establezca la recirculación de agua en la caldera con la bomba de circulación de químicos. La temperatura de esta agua debe aumentarse con inyección de vapor auxiliar. La temperatura del agua a la entrada del calentador de mezcla deberá ser de $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

Una vez que se alcanza la temperatura de 30°C se termina la operación de precalentado.

Llene la caldera con solución de ácido cítrico controlado durante 30 minutos por medio de las bombas de circulación de químicos y de químicos.

Después de llenar el sistema con la solución de cítrico, debe de continuarse la circulación por una hora.

neutralización

- a) Agregue solución de amoníaco.
- b) Asegúrese que el valor de pH del agua para enjuague aumente entre 9.5-10

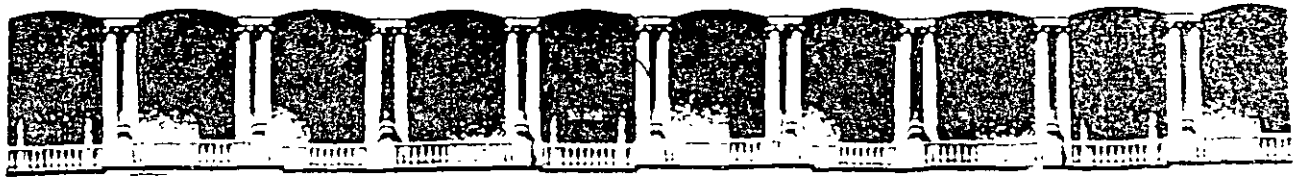
pasivación

- a) Después de terminada la neutralización incremente la temperatura de la solución a unos 270°C .

Agregue posteriormente solución hidrácida

- b) Circule durante dos horas manteniendo la temperatura del sistema a 10°C , en esta forma debe terminarse el problema de pasivación.

A. Drene la solución de pasivación de la caldera utilizando gas nitrógeno.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

INCRUSTACIÓN, DEPÓSITOS, CORROSIÓN Y EROSIÓN

**ING. ALFONSO RODRÍGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

X.- Incrustación, depósitos, corrosión, erosión

Control general de las condiciones químicas

El presente capítulo referente al control de las condiciones químicas dentro de las calderas de vapor para aumentar su seguridad durante la operación, ha sido agrupado en la siguiente forma :

- Limpieza interna de las calderas
- Calderas fuera de servicio
- Depósitos
- Corrosión
- Agrietamiento y fragilización del acero en calderas
- Contaminación de vapor

En cada caso se ha intentado establecer en forma simple, concisa y explícita los problemas, las características por las cuales pueden ser reconocidos y los principios por medio de los cuales pueden ser corregidos.

Para salvaguardar vidas y propiedades, se recomienda que la limpieza química de las calderas y el control de todas las condiciones del agua, se establezca y supervise por personal especialmente calificado por entrenamiento y experiencia, en estos campos altamente técnicos. Tal personal puede estar formado por empleados de la compañía propietaria de la caldera, representantes de terceros interesados en el ramo, como por ejemplo: Fabricantes de calderas, compañías que suministren equipos o productos químicos o pueden ser encomendados a compañías consultoras.

limpieza interna de las calderas

limpieza interna de calderas nuevas. Una vez montada una caldera nueva debe estar razonablemente libre de escamas de laminación, productos de corrosión y otras materias extrañas.

Antes de que una caldera nueva sea puesta en servicio, debe limpiarse cuidadosamente a fin de eliminar la grasa y otras materias orgánicas, óxidos, escamas de laminación, películas protectoras aplicadas por el fabricante para evitar corrosión atmosférica, fundente de soldadura y cualquier otro material inherente a la fabricación y al montaje.

El objetivo a lograr durante la limpieza de una caldera nueva es producir una superficie metálica limpia en todas las partes de la misma que están en contacto con el agua y el vapor durante la operación. Deben eliminarse todos los compuestos solubles en agua, los ácidos grasos, aceites, grasa, escamas de laminación, óxido, pintura y materiales similares, cualquier solución usada deberá ser un buen agente limpiador para este propósito.

Limpieza alcalina. Esta operación se efectúa por medio de la solución detergente alcalina para retirar materiales extraños, tales como aceites y grasa, de la superficie interna de la caldera, economizador y sobrecalentador.

Limpieza ácida. esta operación se lleva a cabo con una solución ácida inhibida, primordialmente con el propósito de retirar escamas de laminación y productos de corrosión. Debido al control químico requerido y a los riesgos involucrados con el uso inapropiado de ácidos que destruyen metales ferrosos y no ferrosos y producen gases explosivos, este tipo de trabajo debe ser supervisado por personal especialmente calificado, por medio de entrenamiento y experiencia, en este campo altamente técnico.

Limpieza interna de calderas después de ponerlas fuera de servicio. Siempre que una caldera sea puesta fuera de servicio para cualquier propósito, debe limpiarse internamente al ponerla nuevamente en servicio, ya que el almacenamiento sea en estado seco o en húmedo. El material suelto, en forma de tierra, basura, escamas de laminación o depósitos, deben eliminarse por medio de lavados u otros medios mecánicos.

Los depósitos, escamas y productos de corrosión que no sean expulsados fácilmente por simple lavado, pueden ser eliminados por limpieza química interna. Siempre es conveniente el análisis químico de los materiales que van a ser eliminados, para determinar el programa de limpieza química y la composición de las soluciones a emplear.

Calderas fuera de servicio

Cuando una caldera es puesta fuera de servicio, deberá ser enfriada. La caldera deberá ser vaciada y lavada sólo hasta que la temperatura del agua se encuentre abajo del punto de ebullición. Deberá llevarse a cabo una inspección para determinar los trabajos de reparación necesarios y la limpieza química o mecánica que tenga que hacerse. Se tomará entonces una decisión sobre la forma de almacenamiento ya sea en estado seco o en húmedo.

Almacenamiento en estado seco. Este procedimiento es preferible para calderas que están fuera de servicio por periodos largos, o en lugares donde puedan presentarse temperaturas de congelación; este método es preferible generalmente para recalentadores.

- a) La caldera ya limpia deberá secarse perfectamente ya que cualquier humedad presente en la superficie metálica causaría corrosión en un período largo de almacenamiento. deberán tomarse precauciones para evitar la entrada de humedad en cualquier forma, a través de las líneas de vapor, línea de alimentación o aire.
- b) Para este propósito, se colocan en el interior de los domos, charolas con materiales absorbentes de la humedad, tales como cal viva en una proporción de 1 kg, o gel de sílice, en una proporción de 5 kg. por cada 4 m³ de capacidad. después se cierran los registros de hombre y se sellan perfectamente las conexiones de la caldera.

La efectividad de los materiales para estos propósitos y la necesidad de renovarlos, se podrá determinar por medio de inspecciones regulares del interior de la caldera. Otra alternativa, es circular aire seco a través de la misma.

Almacenamiento en estado húmedo. Se prefiere este procedimiento cuando las calderas van a estar fuera de servicio por un periodo corto o cuando sea probable que vayan a necesitarse en servicio repentinamente. Este procedimiento no debe ser usado para recalentadores ni tampoco para calderas instaladas en lugares donde puedan ocurrir temperaturas de congelación.

a) La caldera ya limpia y vacía, deberá cerrarse y llenarse hasta el tope, dejando fluir el agua a través del sobrecalentador, usando condensado o agua de alimentación, los cuales deben ser tratados químicamente para disminuir a un mínimo la corrosión durante el almacenamiento ; por ejemplo : Pueden emplearse concentraciones prescritas de sosa cáustica y de un absorbente de oxígeno tal como el sulfito de sodio o bien hidrazina. Pueden usarse para este propósito concentraciones aproximadas de 450 ppm de sulfito de sodio o hidrazina. Después de cerrar el derrame del sobrecalentador, el agua dentro de la caldera se mantendrá a una presión mayor que la atmosférica durante el periodo de almacenamiento.

Depósitos

Los materiales sólidos encontrados en las superficies internas de la caldera, después de haber estado esta en operación, pueden ser tanto incrustaciones y lodos como productos de corrosión. Puede haber aceite en las superficies de la caldera ya sea con depósitos de materiales sólidos o sin ellos.

Incrustación. La incrustación es un depósito formado sobre las superficies y por lo general es cristalina y densa, frecuentemente su estructura es laminar, y ocasionalmente columnar. La incrustación resulta del uso de aguas naturales con la ausencia de constituyentes que favorezcan la formación de lodos.

Bajo ciertas condiciones las sustancias que normalmente forman lodos, pueden depositarse en forma densa y adherente.

La incrustación es objetable, debido a que puede dar como resultado sobrecalentamiento de las superficies del acero, en las cuales se forme, con el consecuente abolsamiento o falla.

Para evitar la incrustación, se requiere generalmente la administración de un tratamiento químico apropiado al agua de alimentación antes y/o después de entrar a la caldera.

El tratamiento químico seleccionado, ya sea interno o externo con respecto a la caldera, deberá ser controlado por medio de análisis periódicos de muestras de agua, como sea necesario, para mantener las superficies de evaporación libres de incrustación.

El tipo y frecuencia de tales pruebas o análisis de control, serán en función del tipo de tratamiento, del carácter específico de agua y de las características físicas del medio ambiente en cada planta en particular. No se puede indicar límites generales de alcalinidad, sólidos disueltos, fosfatos, sulfatos u otros constituyentes del agua para aplicarse universalmente.

La eliminación de la incrustación, por métodos químicos o mecánicos, se debe llevar a cabo con precaución para reducir daños a la caldera y al personal.

Lodos. El lodo es un depósito de sedimentación formado por el agua, comprende depósitos suaves y generalmente no adherentes; formados por precipitados del agua de la caldera, pero puede incluir los sólidos suspendidos que lleva el agua. Por lo general el lodo no tiene la suficiente cohesión para mantener su forma física cuando se elimina por medios mecánicos de las superficies en las que se deposita, pero puede aglomerarse antes de su eliminación y volverse duro y adherente. La acumulación del lodo en una liberación de calor alta, puede causar daños al metal por sobrecalentamiento y/o por corrosión.

Puede mantenerse el lodo en un estado favorable no adherente por medio de un tratamiento adecuado del agua. su acumulación debe regularse por medio del control de las purgas que mejor se apegue a las condiciones de la planta en particular.

Cuando una caldera se pone fuera de servicio se aconseja mantener el agua en su interior hasta que se haya enfriado, con objeto de dejar el lodo en la condición mas fácil para eliminarlo. entonces es aconsejable eliminar tanto el lodo suelto como el adherido por medio de lavabos, tan pronto como sea posible.

El aceite en el agua de la caldera es sumamente indeseable ya que puede depositarse particularmente junto con el lodo e impedir la transmisión de calor a un punto tal que puede resultar dañino. El aceite puede, asimismo causar contaminación excesiva del vapor.

Es muy importante evitar la contaminación de aceite en el agua de alimentación. Cuando sea necesario eliminar aceite o depósitos combinados en una caldera abierta, deberán usarse uno o varios agentes limpiadores adecuados.

Corrosión

La corrosión puede ocurrir en una caldera en operación, cuando esta fuera de servicio y en almacenamiento en estado seco o en húmedo, deberán tomarse las precauciones apropiadas para disminuir a un mínimo la corrosión.

Corrosión dentro de la caldera y sobrecalentador. Sin haber incrustación, la vida probablemente del metal del domo, de los tubos de la caldera y del sobrecalentador, depende de la profundidad de picaduras localizadas, del adelgazamiento de la pared de la envolvente o de los tubos por corrosión general.

Las picaduras de un área relativamente grande, y no cubiertas por tubérculos pueden ser producidas por ácidos minerales libres en el agua de la caldera. Cuando el acero se encuentra cubierto parcialmente por escamas de laminación o por incrustación, pueden ocurrir picaduras en el área del metal expuestos al agua.

Las picaduras del acero en contacto con agua neutra o alcalina forma un tubérculo de óxido de hierro rojo o negro sobre cada pequeña área donde la corrosión esta produciéndose.

En general, la reacción de corrosión es acelerada por un aumento en ; La concentración de oxígeno disuelto, la temperatura, la concentración de las sales disueltas y la conductividad eléctrica resultante y concentración de ion hidrógeno (correspondiente a un descenso del valor del ph.).

Una concentración excesiva y localizada de los constituyentes alcalinos del agua de la caldera, en contacto con el acero particularmente en regiones de alta liberación de calor o de mala circulación, puede producir ataque químico en la forma de picadura irregular o un ranurado regular en la pared del tubo. Este tipo de ataque se observa mas frecuentemente en tubos horizontales o ligeramente inclinados, pero también puede desarrollarse en tubos verticales. Una corrosión similar puede producirse, aunque menos rápidamente por el agua de carácter neutro. Los productos finales de este ataque corrosivo, son óxidos magnéticos de hierro algunas veces adherentes, e hidrogeno.

El ataque general en la superficie interna de un tubo de sobrecalentador, con formación de una película continua de óxido de hierro negro magnético y formación de gas hidrogeno, es por lo general el resultado de la reacción del vapor sobre el metal calentado a una temperatura normalmente alta. Esta condición puede ser causada por una aportación alta de calor o por un flujo inadecuado de vapor, como por ejemplo, cuando debido a un severo arrastre, los depósitos de sales bloquean parcialmente o totalmente un tubo.

El ataque local en un tubo de sobrecalentador puede ser causado por arrastres de gotas de agua de la caldera concentrándose en la superficie metálica, por corrosión durante el almacenamiento en estado seco o en húmedo.

En las superficies donde los depósitos han causado un sobrecalentamiento severo, resulta algunas veces corrosión por la reacción química de los constituyentes de los depósitos con el metal.

El abolsamiento y ruptura de tubos de caldera y de sobrecalentador, no son precedidos necesariamente por una corrosión apreciable sino que pueden resultar de un simple sobrecalentamiento de las paredes del metal.

Destrucción de partes metálicas antes y después de la caldera. Los dos factores principales que contribuyen a la destrucción del metal en el ciclo de vapor y agua, antes y después de la caldera, son : Ataque mecánico o erosión y ataque químico o corrosión.

La cavitación, una forma agravada de erosión, acompañada o no por corrosión contribuye a la pérdida de metal en los impulsores y envolventes de bombas centrifugas y en los extremos de entrada de los tubos de cambiadores de calor, en las aspas de las turbinas y en las hileras superiores de los tubos del condensador, particularmente cuando el calor va acompañado por líquido finamente dividido o de partículas sólidas, erosiona las partes metálica y los productos pueden llegar hasta la caldera. Esta erosión puede estar acompañada de corrosión.

Los principales factores químicos que producen corrosión en la tubería y aparatos antes y después de la caldera son gases disueltos y ácidos minerales libres. Las altas concentraciones de álcalis, pueden también contribuir a la corrosión de ciertos aparatos en los que se usan aleaciones no ferrosas. Por lo general las picaduras o ataques locales del metal, se encuentran cubiertos por los productos de oxidación de las reacciones de corrosión, en forma de tubérculos. El ataque del bióxido de carbono a las líneas de vapor condensado, trampas y drenajes, se nota por ranurado del metal abajo de la línea de agua y por la ausencia de los productos de corrosión en las áreas corroídas. El ataque de ácidos minerales libres, incluyendo ácido sulfhídrico, puede notarse por la aparición de zonas relativamente grandes con las superficies gastadas o picaduras libres de productos de corrosión. Las altas concentraciones de álcalis en el agua pueden afectar a los materiales no ferrosos y a las aleaciones, particularmente las de las bombas de alimentación a la caldera. Se recomienda que la identificación del tipo de corrosión, se lleve a cabo por personal calificado, antes de tomar los pasos necesarios para su corrección.

El amoníaco producido en la caldera, no reacciona con los metales ferrosos dentro de los valores de temperatura y presión alcanzados en el ciclo de vapor. El amoníaco disuelto en el vapor condensado puede atacar metales no ferrosos, particularmente en presencia de oxígeno. El hidrógeno, la presencia del cual en instalaciones de alta presión y temperatura es mas notoria, no contribuye a la corrosión de los metales, siendo mas bien el producto gaseoso de la reacción de corrosión en una superficie transmisora de calor puede producir sin embargo daño intergranular en el acero calentado.

Inspecciones y pruebas. Cuando las paradas de una caldera lo permiten, deben hacerse inspecciones muy completas en todas sus partes internas, buscando la presencia de corrosión en cualquier forma y para la recolección de depósitos resultantes, para un examen posterior de los productos de corrosión. Cuando se encuentra un caso de corrosión no usual y extenso, deben obtenerse los servicios de personal calificado para determinar las causas y sugerir cambios en el tratamiento del agua y en la operación, para remediarlo. Esta sugerencia puede ser aplicada también a la inspección del equipo antes y después de la caldera. El estudio de laboratorio de los depósitos, puede prestar una valiosa información en la corrosión.

Cuando los tubos de una caldera requieren reemplazarse por alguna razón los tubos desechados ofrecen una excelente oportunidad para un examen minucioso de los efectos de la corrosión. Debe establecerse un registro de los resultados de la inspección, para futura referencia, como parte del procedimiento de inspección.

Cuando el programa regular en una planta, incluye pruebas de control para tratamiento, es deseable incluir las de oxígeno disuelto, pH, hidrógeno y también bióxido de carbono, cuando se encuentran altas concentraciones en operación normal. En general, estas pruebas debieran hacerse en el agua de alimentación entrando a la caldera, en el vapor en uno o más puntos del ciclo, y en otros puntos que puedan ser sugeridos por un estudio cuidadoso del diseño de la planta o por las recomendaciones de personal calificado. Las pruebas deberán hacerse tan pronto como sea posible en la operación de un sistema nuevo, y después a intervalos frecuentes, para detectar las variaciones en las condiciones, que puedan influenciar las reacciones de la corrosión y para suministrar una base para la pronta y adecuada corrección de las condiciones.

Corrección de las condiciones para evitar corrosión. Los daños a veces atribuidos a la corrosión, pueden ser realmente influenciados por la erosión, se requiere el conocimiento de expertos para distinguir las causas.

La corrosión puede ser causada por gases disueltos en el agua de alimentación. es conveniente excluir dichos gases, especialmente el oxígeno, por medio de equipos mecánicos adecuados de deaeración y depuración final, si fuera necesario, en el sistema de agua de alimentación y en la caldera con sustancias químicas eliminadoras. El producto más comúnmente usado para eliminar oxígeno, es el sulfito de sodio (o la hidrazina) que puede ser inyectado de preferencia en el agua de alimentación en un punto conveniente entre el calentador y la bomba de alimentación.

La dosificación puede regularse por medio de análisis diarios, para determinar el sulfito (o hidrazina) residual en las muestras extraídas de la caldera bajo condiciones de operación y protegidas del contacto con el aire hasta ser analizadas.

La eliminación práctica del bióxido de carbono y del amoníaco, es un problema que debe ser atendido por personal calificado, mediante entrenamiento y experiencia, considerando los factores de cada caso individual. El contenido mínimo deseable de estas sustancias depende de la calidad del agua disponible para alimentación a la caldera, tiempo de tratamiento químico y del diseño y operación de la planta. La concentración del bióxido de carbono en el condensado debe ser mantenida al nivel práctico mínimo. La eliminación del amoníaco requiere equipo especial.

Agrietamiento y fragilización del acero en calderas.

El desarrollo de grietas en el acero de los tubos y domos de calderas, es evidencia de condición peligrosa cuya causa y corrección deben ser determinadas inmediatamente con una investigación completa hecha por una autoridad competente.

Una grieta puede desarrollarse debido a una gran variedad de causas: Por lo general es el resultado de esfuerzos o combinación de esfuerzos y corrosión, y se caracteriza por ser transcristalina (a través de los granos) o intercristalina (entre los granos adyacentes).

Las grietas transcristalinas se deben principalmente a esfuerzos, y se atribuyen a una o más de las siguientes causas :

- a) El uso de acero de calidad inadecuada o el desarrollo de esfuerzos internos excesivos por tratamiento térmico incorrecto o por trabajo en frío durante la fabricación de la caldera.
- b) Prácticas inadecuadas, tales como el sobrerrolado de tubos o falta de relevo de esfuerzos de las juntas soldadas durante el montaje o reparación de una caldera.
- c) Esfuerzos internos originados por cambios de temperatura repetidos, enfriamientos súbitos o corrosión durante la operación de la caldera.
- d) Esfuerzos producidos por expansión y contracción durante ciclos de calentamiento y enfriamiento demasiados rápidos de la caldera.

El agrietamiento transcristalino se encuentra en fallas de tubos debidas a metal laminado o defectuoso, en toberas de los domos o juntas sujetas a fluctuaciones de esfuerzos y temperaturas, en asientos de tubos sobrecalentados, en fallas de metal causadas por vibración, en juntas soldadas que no han sido relevadas de esfuerzos apropiadamente y en superficies de metal agrietadas sujetas a enfriamiento y sobrecalentamiento alternados.

El agrietamiento intercristalino, más comúnmente conocido como fragilización cáustica, ocurre usualmente abajo del nivel de agua y en juntas, costuras o grietas en las cuales el agua de la caldera puede fugarse y producir altas concentraciones. Se requieren según opinión general cuatro condiciones simultáneas para que se desarrolle una falla de esta especie :

- a) El agua de la caldera debe contener substancias, particularmente hidróxidos, capaces de producir falla intergranular, cuando concentradas se encuentran en contacto con acero sujeto a esfuerzos.
- b) Debe haber una junta o intersticio por el cual, o a través del cual, el agua de la caldera pueda fugarse.
- c) El agua de la caldera debe concentrarse dentro de la junta o intersticio.
- d) El acero debe estar sobre esforzado localmente donde esta expuesto a la concentración de los componentes químicos.

Tales condiciones pueden desarrollarse particularmente en juntas de domos remachados y en asientos de tubos rolados, resultando la fragilización del acero y la falla final por agrietamiento. Los operadores deberán actuar con suspicacia ante cualquier fuga en las cubre juntas de los domos remachados, o en los asientos de tubos de las calderas que no puedan ser fácilmente selladas por un cuidadoso recalado o rerrolado respectivamente.

La investigación y la experiencia han indicado que manteniendo en el agua de la caldera ciertas relaciones de sales disueltas o ciertas sustancias llamadas inhibidores, se puede controlar este tipo de falla. Se han sugerido y usado los métodos siguientes para el control de la fragilización bajo gran variedad de condiciones de operación :

- a) Mantener ciertas concentraciones o relaciones de concentraciones de sustancias específicas en ella agua de la caldera.
- b) El uso de un tratamiento de agua que no produzca hidróxido libre en el agua de la caldera. estos métodos deberán ser establecidos y supervisados por personal calificado.

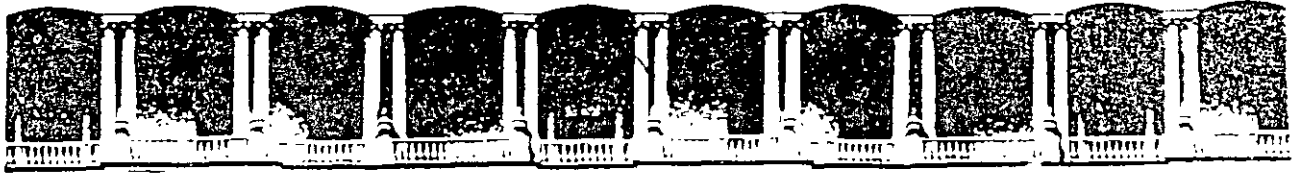
No existe un control químico fijo apropiado que pueda ser prescrito para toda la gama de condiciones de operación que pueden encontrarse en las calderas. Se han desarrollado varios sistemas de control químico, incluyendo el mantener ciertas cantidades de sulfatos, nitratos o de taninos o ligninos, en relación con el contenido alcalino del agua de la caldera, o el control de la relación de alcalinidad y fosfatos en el agua de la caldera, de tal forma que no exista presencia de sosa cáustica libre. Bajo cualquier condición dada de operación de una caldera de vapor se puede aplicar uno o mas de los siguientes sistemas :

- a) El sistema que recomienda el mantener ciertas relaciones de sulfato de sodio a alcalinidad total, expresadas en términos de carbonato de sodio ; la atención tenida a estas relaciones, se ha visto remunerada con una considerable reducción en el numero de casos de agrietamiento en juntas remachadas, de calderas estacionarias durante los años subsecuentes.
- b) La experiencia practica desde 1939 ha demostrado que los materiales orgánicos de la clase de taninos y ligninos, son efectivos en la prevención de agrietamientos en juntas remachadas de calderas locomóviles y estacionarias.
- c) La experiencia practica desde 1941, ha indicado al nitrato como particularmente efectivo en la prevención de agrietamiento en juntas remachadas de calderas tanto estacionarias como locomóviles. El mantener concentraciones relativamente bajas de este inhibidos, que varían hasta 0.4 partes de nitrato de sodio por cada parte de sosa cáustica en el agua de la caldera, se ha visto que actúa en forma adecuada.
- d) El fosfato propiamente dicho, no parece actual como inhibidos, sin embargo, es posible mantener la alcalinidad en el agua de la caldera por medio de fosfatos hasta el nivel correspondiente a la presencia de fosfato trisodico sin haber sosa cáustica libre. Este ha demostrado por la experiencia practica en calderas estacionarias, ser un método efectivo para prevenir el agrietamiento en juntas remachadas.

La tendencia fragilizante del agua de calderas con o sin tratamiento inhibidos, puede ser determinada con un aparato mecánico que produzca las condiciones simultáneas necesarias de fuga, concentración y esfuerzo.

Contaminación del vapor

Todas las impurezas sólidas y líquidas llevadas, fuera de la caldera de vapor generado, son consideradas como contaminaciones y comúnmente conocidas como "arrastre". La impureza líquida es el agua de la caldera no evaporada y la impureza sólida comprende los sólidos suspendidos y disueltos que esta agua lleva y las sustancias normalmente sólidas transportadas a su fase de vapor.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

GESTIÓN DE REFACCIONES

**ING. JUAN PELAYO ROJAS
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

XI.- Refacciones

La gestión de refacciones es una tarea compleja que comprende muchas funciones, no un trabajo sencillo como a veces se piensa en donde deben considerarse todas las funciones. para lograr un mejoramiento efectivo en un programa de gestión de refacciones, se requiere lo siguiente :

- Que todas las funciones estén incluidas en el programa
- Que las funciones individuales se realicen adecuadamente
- Que la gestión de refacciones ajuste en un programa completo muy bien coordinado.

En las siguientes notas se proporcionan guías generales que pueden emplearse para juzgar si un programa completo y sus partes individuales son adecuadas y llevar a cabo un análisis profundo, aunque no incluye problemas particulares ni se sugieren soluciones específicas.

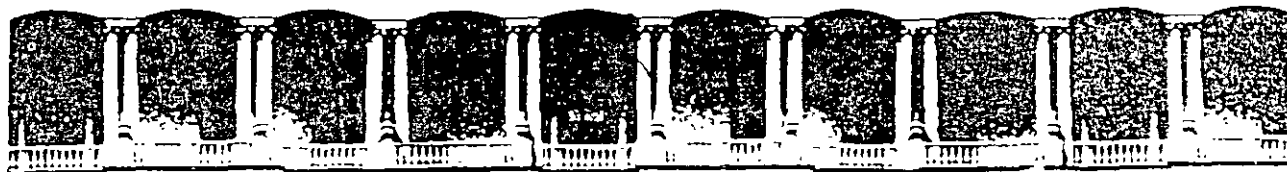
La realización de un análisis profundo satisfactorio, requiere de las siguientes consideraciones :

- 1) Se deben de tomar en cuenta todos los niveles de la organización y funcionales involucrado en el programa de gestión de refacciones, así como apearse lo mas posible a las practicas normales en caso de que estas no tengan que ser cambiadas.
- 2) Para hacer cambios efectivos, se deberán considerar todas las áreas funcionales por ejemplo :
 - La aplicación de criterios y métodos correctos par los niveles de existencia, no sirven de mucho si no se toman en cuenta los tiempos de compras.
 - No se deben cambiar los procedimientos de compras hasta que no se comprenda plenamente el impacto sobre los niveles de existencias y las decisiones de selección.
 - No se debe cambiar a un sistema computarizado hasta que no se hayan identificado completamente los problemas que la computadora debe resolver.

La identificación de los cambios necesarios es diferente a la justificación de los gastos que ello implique.

La gestión de refacciones es un conjunto de filosofías, sistemas, procedimiento y practicas por medio de las cuales se planea y controla el ciclo de vida de varias de las refacciones, que consta de las siguientes partes :

- A. Selección
- B. Asignación de niveles de existencia (stock).
- C. Adquisición
- D. Control de calidad
- E. Recibo y almacenamiento.
- F. Control durante el almacenamiento
- G. Obtención para su uso
- H. Reposición de inventarios.
- I. Reevaluación periódica



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

REPARACIONES

**ING. ALFONSO RODRÍGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

VI.- Reparaciones

Tubos

Cuando un tubo de caldera falla, es mejor reemplazarlo en lugar de soldarlo o bien intentar repararlo, hay dos métodos o procedimientos para remover tubos :

- Quemando el tubo fallado con un soplete de acetileno, 3 cm. o mas de la placa o del domo
- "Jalando" el tubo en toda su longitud a través de un agujero en el tubo

El tubo, tipo del caldera y arreglo de tubos determinan el método que debe ser usado, por lo general es aconsejable quemar el tubo viejo cuando esto es posible. todos los tubos curvos deben quemarse porque no pueden pasar a través de agujeros de tubos.

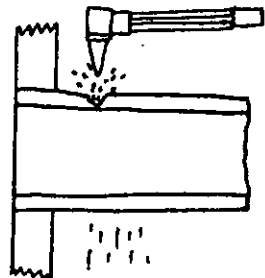
Algunas veces es necesario remover varios tubos buenos para alcanzar el que ha fallado; en calderas de tubos rectos, los tubos de los pasos exteriores pueden quemarse en el extremo, pero los de las filas interiores deben ser jalados a través de agujeros de tubos porque no pueden alcanzarse sin remover los tubos externos.

Cuando es necesario "jalar" en lugar de quemar el tubo, se pasa un limpiador mecánico con cabeza golpeadora a través del interior de tubo, esto es especialmente importante en el caso de calderas de tubos de humo, porque el limpiador remueve la incrustación exterior y hace mas fácil pasar el tubo a través del agujero.

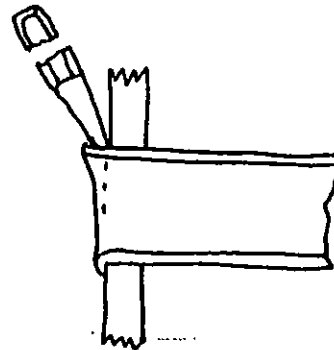
Por otra parte, cuando es posible llegar al exterior del tubo, quémelo con un soplete de acetileno a unos 3cm de cada extremo (fig. a) ; puede ser necesario cortar el tubo en varios piezas para facilitar su remoción. en calderas de tubos de agua se debe tener mucha precaución en la remoción de tubos para evitar daños a las mamparas.

En cualquier caso, se esta ya listo para aflojar el tubo en donde éste está expandido en placa de tubos, domo, cabezal o cubierta en la siguiente forma :

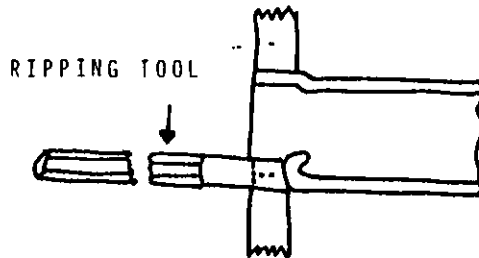
- Emplee un cincel para remover la pestaña o reborde del tubo, teniendo cuidado de no dañar el asiento (fig. b)



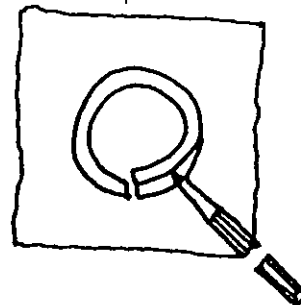
(a) corte de un tubo con soplete de acetileno



(b) corte de reborde o pestaña



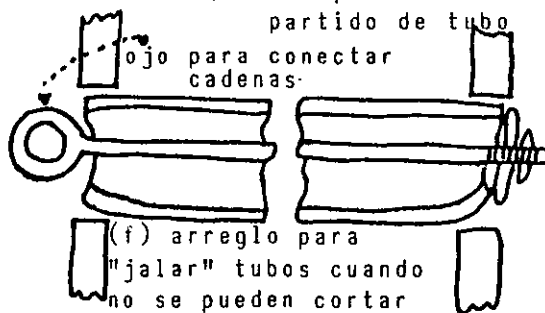
(c) uso de desgarrador para partir extremo de tubo



(d) colapsando extremo partido de tubo

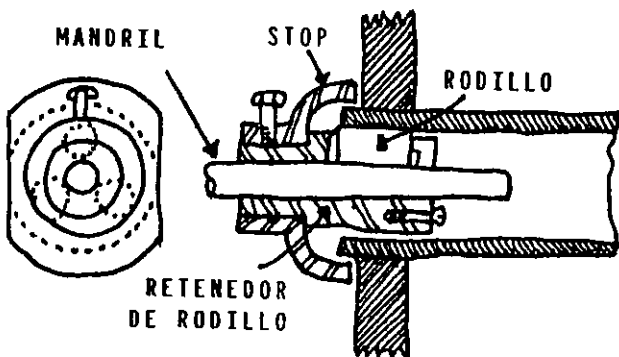


(e) doblado o rizado de extremo de tubo

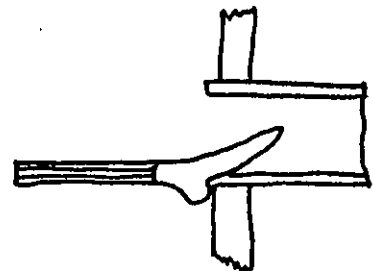


(f) arreglo para "jalar" tubos cuando no se pueden cortar

REMOCION DE TUBOS EN UNA CALDERA DE TUBOS DE HUMO



EXPANSOR ROLADOR



FORMACION DE PESTAÑA O REBORDE

- Use un desgarrador (fig. c) para cortar una ranura a través del tubo, en el asiento
- El extremo del tubo puede ahora ser colapsado en el asiento (fig. d y e)
- Si el tubo fue quemado, ahora el niple puede ser fácilmente removido, pero si no, el tubo debe ser jalado y movido fuera. en este punto se requiere alguna habilidad para usar el equipo disponible para jalar y mover el tubo a través del agujero del tubo (fig. f)

Después de que ha sido removido el tubo viejo, proceda en la siguiente forma :

- Limpie el agujero (asiento) e inspecciónelo por posibles cortaduras o daños
- Limpie y pula ambos extremos del tubo nuevo para asegurar el contacto entre metal y metal
- Inserte el tubo nuevo en su posición, nivelándolo para que la misma cantidad se extienda fuera del asiento en cada extremo
- Haga una indentación o mella con un martillo en el extremo del tubo para mantenerlo en su lugar
- Expande ambos extremos del tubo para obtener una junta hermética (fig.)
- Haga un reborde o pestaña en los extremos de los tubos de humo para evitar que se quemen los extremos y permitir que los tubos actúen como refuerzo de las placas de tubos (fig.)
- Después de reemplazar tubos en una caldera siempre aplique una prueba hidrostática para checar fugas.

Domos

La corrosión, fragilización cáustica y sobrecalentamiento hacen a veces necesario reparar o reemplazar domos, cubiertas y tubos de caldera ; estas reparaciones o sustituciones deben ser hechas siempre por mecánicos calificados de calderas.

Las bolsas en las cubiertas pueden ser reparadas por calentamiento y regresándolas a su lugar siempre que el metal no este muy dañado por sobrecalentamiento, según determinación hecha por el inspector de calderas ; en cualquier caso que el metal haya perdido su resistencia a la tensión o que el abolsamiento se extienda por una arrea grande, se debe aplicar un parche.

Cuando se ha desarrollado una ampolla, el metal defectuoso debe ser cortado y quitado para determinar la extensión del daño ; si la placa se ha debilitado, será necesario aplicar un parche.

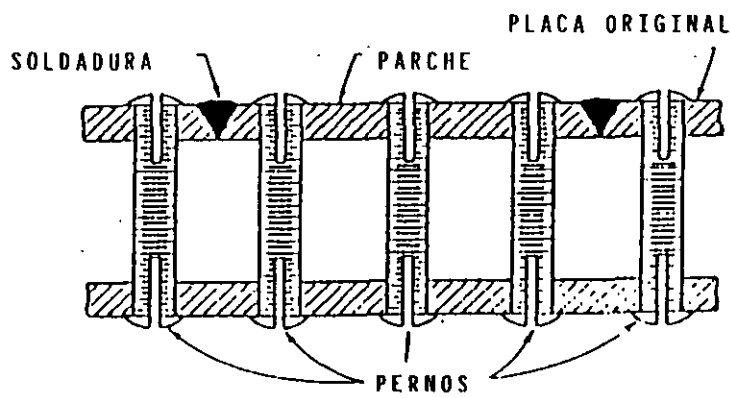
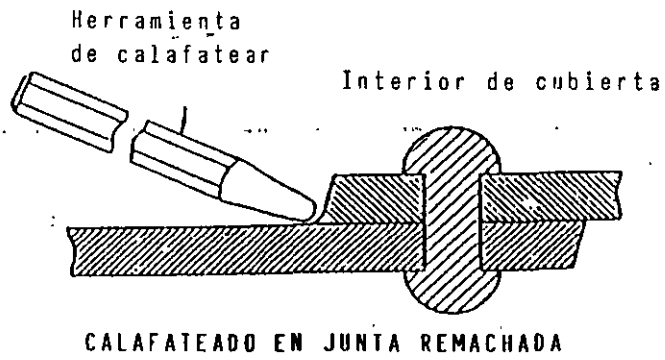
Los parches deben ser aplicados en el interior del domo o cubierta de forma que la presión tienda a mantenerlos en su lugar y prevenir la formación de una cavidad o depresión para acumulación de incrustación y lodos ; hay tres métodos de fijar los parches a las cubiertas y domos de las calderas :

- Por atornillado, conocido como parche blando
- Por remaches, conocido como parche duro
- Por soldadura, cuando el parche se agarra en su lugar por tornillo de refuerzos.

Los parches blandos se colocan en posición y se fijan con tornillos ; los tornillos pasan a través del parche y penetra en agujeros roscados en la cubierta ; esto elimina la necesidad de topes o agarres como en el caso de remaches. el parche se aplica en el interior de la cubierta sobre la sección defectuosa y se usan empaques entre el parche y la cubierta para prevenir fugas ; estos parches no son adecuados en áreas donde el calor transferido es alto o el calderas de alta presión, y se deben considerar de naturaleza temporal y reemplazar con un parche remachado o soldado tan pronto como sea posible.

Los parches duros o remachados son reparaciones permanentes de calderas, domos y cubiertas ; la sección fallada se corta y se quita, y se aplica el parche empleando una placa de cuando menos el espesor de la placa que esta siendo parchada, pero no mayor de 1/8" de espesor. el tamaño de los remaches y el espaciamiento se arreglan en tal forma que la junta en su área sin soportar sea al menos igual en resistencia a la parte más débil de la cubierta.

Todos los calafateados de juntas, parches y remaches deben hacerse en el interior de la caldera, en donde sea posible, como una precaución contra la fragilización cáustica (fig.) si se encuentran dificultades continuas con fugas en la junta o alrededor de los remaches, se tiene que inspeccionar la caldera.



PARCHE EN PIERNA DE AGUA

Remueva un remache y hágale una prueba de metal en un laboratorio para determinar la resistencia a la tensión y otras propiedades físicas. Si se encuentra una grieta en una junta longitudinal de la caldera, se deberá sacarla de servicio. Este lugar es difícil de parchar satisfactoriamente debido a los esfuerzos a que está sujeto, y en muchos casos una caldera en estas condiciones se descontinúa permanentemente del servicio.

Las fallas pueden ocurrir en la placa y en los tornillos de refuerzo de las piernas de agua en las calderas de tubos de agua; la placa no puede ser reparada con remaches porque solo es accesible por un lado. La soldadura de campo está permitida siempre que suficientes tornillos de refuerzo estén incluidos en el parche para soportar la presión sin considerar la resistencia de la soldadura; el metal quemado debe removerse y el parche ajustarse en el lugar y soldarlo de acuerdo con los estándares establecidos (fig.). Con el parche en su lugar perfora y rosca lo necesario en los agujeros de los nuevos tornillos de refuerzo y rosca los viejos; inserte los nuevos tornillos de refuerzo y remache sobre los extremos para hacerlos herméticos. Finalmente perfora los agujeros del indicador.

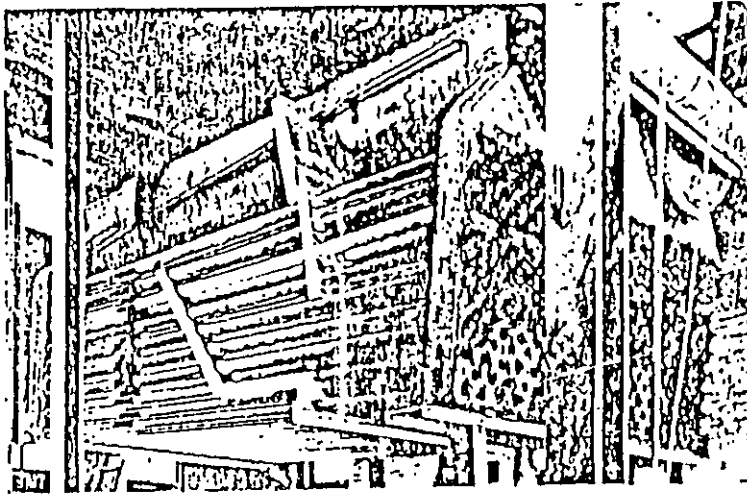
Las soldaduras de campo no pueden aplicarse en forma general a las calderas a menos que la sección soldada sea relevada de esfuerzos de acuerdo con los requerimientos de código y se radiografía; la soldadura sin relevado de refuerzos y sin radiografiar están restringidas a usarse como un sello donde no se requiere resistencia de partes a presión de la caldera.

Mamparas (baffles)

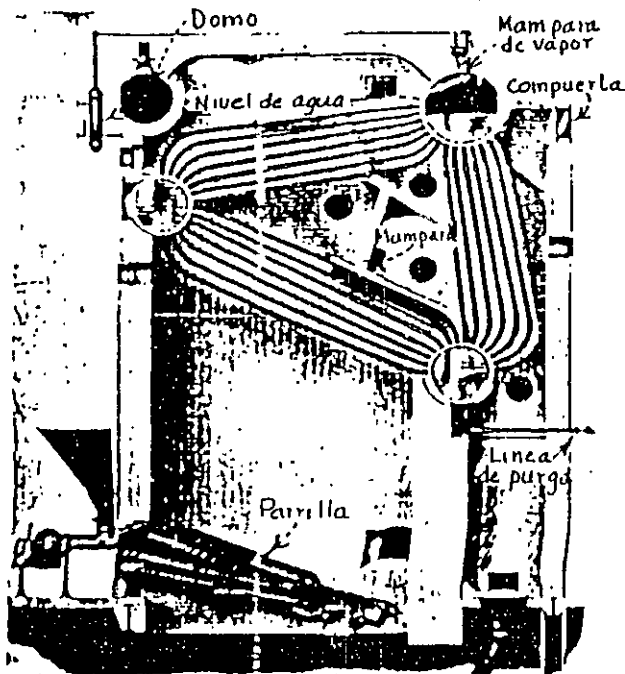
Algunos tipos de calderas requieren mamparas para dirigir efectivamente los gases para la máxima transferencia de calor a los tubos (fig.); las mamparas de las calderas están hechas de refractario, aleaciones o acero normal, dependiendo de la temperatura de los gases a los cuales están expuestas.

Las mamparas de refractario se usan cerca del hogar en donde hay alta temperatura, y se construyen de formas especiales de refractario, hechas para ajustar exactamente al lugar. Algunas mamparas descansan sobre hileras de tubos, y otras van en ángulo a través de los tubos; para hacer reparaciones es necesario obtener las formas de refractario para la aplicación específica, y esto requiere habilidad y paciencia para insertar estas formas de bloques o ladrillos en las mamparas que están a un ángulo con los tubos (cuando los tubos pasan a través de la mampara).

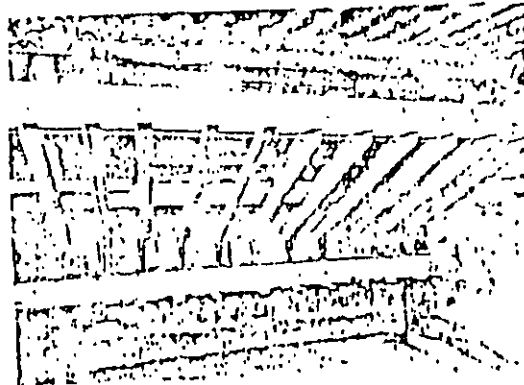
Mamparas de una pieza (monolíticas) en calderas de tubos rectos se muestran en la fig. ; estas mamparas están hechas de material refractario moldeable, y se construyen formas para retener el refractario y producir la mampara que dirija el flujo de gases.



MAMPARA MONOLITICA EN UN DOMO DE CALDERA DE TUBOS DE AGUA



CALDERAS DE TUBOS DE AGUA, 4 DOMOS



ACERO SOPORTE PARA UN ARCO DE REFRACTARIO PLASTICO EN EL HOGAR

Cuando los tubos pasan a través de las mamparas, se pueden hacer las formas pasando tiras de madera abajo a ambos lados del espacio donde se instala la mampara ; estas tiras retienen el material refractario conforme es trabajado entre los tubos. El material se cura o fragua y las tiras de madera se queman cuando la caldera se pone en servicio ; en algunos casos es recomendable envolver o enrollar papel duro alrededor de los tubos antes de la aplicación del material de la mampara. Este papel se quema dejando un espacio alrededor de cada tubo para permitir la expansión y el reembolso del tubo ; algunos materiales de mamparas se encogen lo suficiente para proveer el claro necesario alrededor de los tubos.

Las mamparas también se hacen de metales resistentes al calor ; un método es perforar una simple placa de metal para recibir los tubos. Esta mampara de placa simple de metal es difícil de reparar y causa interferencia cuando es necesario reemplazar tubos, por lo que es preferible usar mamparas compuestas de formas de tiras de metal que se ajusten a los tubos. Estas tiras se insertan entre los tubos y se atornillan juntas con barras de amarre para formar una mampara completa ; el mantenimiento de estas mamparas puede hacerse reemplazando las tiras individuales. Las secciones pueden sacarse para facilitar el reemplazo de tubos y luego re-ensamblarse.

Paredes de hogar

Algunas calderas y hogares requieren paredes refractarias (figs.) ; estas paredes refractarias significan una parte apreciable del mantenimiento de la caldera, por lo que es importante hacer un esfuerzo para reducir estos gastos.

Las paredes refractarias sólidas están revestidas con ladrillo refractario de primera calidad ; en muchas ocasiones este revestimiento puede ser parchado o reemplazado sin reconstruir la pared completa si la reparación se hace antes que la sección exterior se haya dañado demasiado. el revestimiento debe ser "acuñado" a la pared exterior y se deben proveer juntas de expansión.

Las paredes refractarias enfriadas con aire se construyen para proporcionar un espacio de aire entre la pared exterior y el revestimiento refractario ; este revestimiento puede ser una pared separada construida de ladrillo de primera calidad ; material refractario moldeable o bloques soportado por colgantes de hierro colado. La circulación del aire a través del espacio entre dos paredes arrastra afuera algo de calor, resultando en una reducción en la temperatura de la pared y en una posible disminución del mantenimiento. El revestimiento debe estar ligado adecuadamente a la pared exterior para prevenir expansión y contracción que causen pandeo y caída dentro del hogar ; los colgantes de hierro colado proveen soporte adecuado para los bloques de revestimiento, sin embargo el costo inicial de estas paredes es alto y se deben almacenar muchas formas de bloques para reemplazarlos. una vez que el revestimiento ha fallado, los colgantes de hierro colado son destruidos rápidamente por el calor del hogar.

Se debe dar una consideración cuidadosa a la calidad del material refractario ; los factores que deben considerarse cuando se seleccione el revestimiento refractario para el hogar son :

- temperatura de operación
- características de la ceniza
- formación de escoria
- incidencia de flama

Si la temperatura de fusión del revestimiento no es lo suficientemente alta para las temperaturas de operación, la superficie interior se vuelve blanda y en casos extremos se funde y fluye, resultando en un rápido deterioro.

La fusión de cenizas en la superficie de la pared causa que la cara interna se astille, esto es, que se rompa y caiga.

La remoción de clinker ya sea con la unidad operando o con esta fuera de servicio para mantenimiento, invariablemente romperá algo del revestimiento del hogar.

La incidencia de la flama resulta en una alta temperatura localizada y en fallas subsecuentes del revestimiento.

Las paredes del hogar (sólidas o enfriadas con aire) y arcos pueden construirse o reconstruirse usando material refractario moldeable que se suministra en condición húmeda para su colocación en el lugar ; para mantener en su lugar el revestimiento se emplean cuñas hechas de metal resistente al calor o bloques refractarios, o bien una combinación de ambos materiales. El material refractario se coloca en su lugar con un martillo neumático ; se deben proveer juntas de expansión a ciertos intervalos para prevenir el desarrollo de fuerzas excesivas.

En la fig. se muestran ángulos de acero en su lugar para soportar un arco refractario moldeable ; los colgantes se unen a estos ángulos y quedan embebidos en el arco refractario. Para soportar el arco durante construcción se emplean formas de madera ; el material refractario se coloca en su lugar alrededor de los insertos y se deben prever juntas de expansión adecuada.

En donde el servicio es especialmente severo causando salidas y reparaciones costosas, es ventajoso usar ladrillos o bloques especiales de alta calidad y alto costo ; frecuentemente estos materiales se emplean en las paredes justamente arriba de emparrillados (stokers) alimentados por abajo, en donde hay una combinación de alta temperatura y contacto con ceniza y clinker.

Estos materiales también se emplean en los arcos de la pared frontal en los emparrillados de esparcido (spreader-stoker) y en los entrepaños de pared de los alimentadores.

Las paredes de agua se instalan para reducir el mantenimiento, y a menos que no se aplique bien o se abuse, rara vez requieren reparaciones ; el procedimiento de mantenimiento depende del tipo de construcción de la pared de agua, si los tubos mismos

son los que fallan, la reparación es similar a las de reemplazo de cualquier otro tubo de caldera.

Los bloques de hierro colado usados en algunas paredes de agua puede ser necesario que se reemplacen después de un largo servicio continuo ; en este caso, el reemplazo se hace limpiando primero la superficie del tubo y luego aplicando pegamento o cemento conductor de calor, y finalmente atornillado en forma segura el nuevo block en su lugar.

Se deben hacer reparaciones y reemplazarlos al equipo de la caldera con suficiente frecuencia para evitar que trabajos pequeños se desarrollen en proyectos grandes, como la reparación de la pared del hogar antes de que se dañe el trabajo de acero. No se remueva ni reemplacen partes buenas para el servicio ; se espera y es permisible algo de adelgazamiento en las paredes del hogar y quemado de las fundiciones del emparrillado.

Las reparaciones del equipo generador de vapor debe cumplir exactamente los requerimientos ; todos los materiales y la construcción de los trabajos de reparación deben cumplir con los requerimientos de códigos. No deben hacerse reparaciones de soldadura a la caldera sin la aprobación de un inspector autorizado ; dichas reparaciones de soldadura deben ser acompañadas de las necesarias pruebas no destructivas y pruebas hidrostáticas para asegurar que se tiene la integridad de la soldadura.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

MANTENIMIENTO A CALDERAS

TEMAS:

INSPECCIÓN INTERNA Y EXTERNA

**ING. ALFONSO RODRÍGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

V.- Inspección externa e interna

El objetivo principal de la inspección externa e interna es el de determinar si la caldera y sus auxiliares se encuentran en condiciones seguras de operar.

Inspección externa

a.- Condiciones generales

- Accesibilidad a la caldera y aparatos auxiliares
- Limpieza general
- Fugas de agua o vapor, incluyendo cubiertas de aislamiento, soportes, mampostería o refractario

b.- Precauciones antes de entrar

- Se deben cumplir las reglas y disposiciones de seguridad
- Asegurarse que se tiene ventilación adecuada
- Ver que el local se encuentre libre de vapores dañinos
- Deberán permanecer otras personas además de la que efectúa la inspección

c.- Manómetros

- Comparar las lecturas con otro manómetro o bien con un patrón
- Se deben observar las lecturas durante las pruebas que se hagan
- Hay que reemplazar los manómetros defectuosos

d.- Indicador de nivel

- Observar purga y rapidez de retorno del agua. una respuesta lenta puede indicar obstrucciones
- Purgar separadamente las conexiones de agua y vapor

- Comprobar si el fogonero tiene y sigue la indicación exacta del nivel de agua

Asegurarse de que el nivel de agua indicado sea el correcto, probando el indicador como sigue :

- Cerrar la válvula inferior del cristal de nivel, abrir luego el grifo de drenaje y desalojar el cristal
- Cerrar el grifo de drenaje y abrir la válvula inferior del cristal de nivel. el agua deberá regresar al cristal medidor de inmediato.
- Cerrar la válvula superior del cristal medidor, abrir luego el grifo de drenaje y permitir que el agua fluya, hasta que corra libremente.
- Cerrar el grifo de drenaje y abrir la válvula superior del cristal medidor. el agua deberá regresar al cristal medidor de inmediato.
- Si el retorno del agua es lento, deberá repetirse la operación. una respuesta lenta puede indicar una obstrucción en las conexiones deberá corregirse a la brevedad posible, para evitar daños a los accesorios o una falsa indicación de la línea de agua.

Controles de presión (calderas de vapor)

El inspector deberá cerciorarse de que cada caldera de vapor de combustión automática, este protegida contra una sobrepresion, por lo menos con dos controles operados por presión, uno de los cuales puede ser un control de operación.

Controles de corte de combustible por bajo nivel de agua y controles de nivel

- a) El inspector deberá observar la simulación de una situación de bajo nivel de agua, por medio de la purga de estos controles, con el quemador en operación. el retorno a la condición normal, tal como el re-encendido del quemador en operación, el paro de una alarma, o el paro de una bomba de alimentación, deberán ser observados. una respuesta lenta puede indicar una obstrucción en las conexiones a la caldera. en caso de que no opere el corte de combustible por bajo del nivel de agua o no se indique el nivel de agua correcto, la caldera deberá sacarse de servicio hasta que haya sido corregida la situación insegura.
- b) Deberá probarse la operación de un control sumergido de corte de combustible por bajo nivel de agua, montado directamente en la envoltente de una caldera de vapor, reduciendo cuidadosamente el nivel de agua de la caldera. esta prueba solo se deberá hacer cuando se tenga la seguridad de que el medidor de nivel de agua este indicando correctamente.

e.- Válvulas de seguridad y de alivio

A presiones no mayores de 400 psi (27.6 bar), las válvulas de seguridad deberán probarse, permitiendo que la presión en la caldera se eleve hasta la presión de disparo, y luego dejarla bajar para comprobar la presión de disparo real, así como la purga. si esto no es practico, la válvula deberá probarse por parte del operario de la caldera para operación libre, mediante el uso de la palanca manual, siempre y cuando la presión de la caldera sea del 75% o mas de la presión de operación. en el caso de varias válvulas de seguridad, la ultima es la única prueba practica, a menos de que se haga una prueba de acumulación.

A presiones mayores de 400 psi (27.6 bar), se deben tener evidencias de que las válvulas fueron aprobadas a presión o desarmadas, rehabilitadas, probadas y de que la presión de disparo y la purga se verificaron cuando fue necesario, dentro de un periodo de tiempo aceptable. en forma alterna, se puede elegir hacer la prueba como se estipula en el párrafo anterior.

En donde la válvula tiene un tubo de descarga, deberá determinarse si este esta libre de acuerdo a los requisitos.

Cuando la inspección revela que alguna válvula de seguridad tiene fugas o que no esta operando en forma apropiada, lo que se hace evidente por la falla al abrir y cerrar respectivamente o que muestra signos de pegarse, la caldera se sacara de servicio y la válvula deberá ser reemplazada o reparada.

Deberá revisarse la placa de identificación de la válvula de seguridad o de alivio y seguridad, para verificar que la presión de ajuste es correcta y que la capacidad es adecuada. el inspector deberá también comprobar que sellan apropiadamente a las presiones de ajuste y de purga.

Cuando calderas de diferentes presiones de trabajo máximo permisible con calibraciones mínimas de válvula de seguridad que varían mas del 6% se conectan de tal modo que el vapor pueda fluir hacia las unidades de baja presión, estas ultimas se protegerán mediante el aumento de capacidad de las válvulas de seguridad, si es necesario, en el lado de presión mas bajo del sistema. la capacidad adicional de válvula de seguridad se basara en la cantidad máxima de vapor que pueda fluir hacia el sistema de presión mas baja.

f.- Protección y controles (corte de combustible por bajo nivel o control de alimentación)

- Observar prueba y respuesta después de abrir el drenaje
- Cerrar el drenaje y observar la rapidez de retorno a situación normal (alarma, b.a.a.)
- Una respuesta lenta puede significar obstrucción en las conexiones

- En caso de falla en controles o nivel, debe sacarse de servicio la caldera para corregir fallas

g.- Tubería, conexiones y accesorios

- Revisar que pueda expandirse libremente y que tenga los soportes adecuados
- Ver que no existan fugas
- La ubicación de válvulas de cierre y drenaje no deben permitir acumulación de agua cuando se cierre, para evitar golpe de ariete
- Observar que no haya vibración excesiva
- En cabezales de calderas múltiples, revisar conexiones para ver que no tengan tensiones excesivas por asentamiento en cimentaciones u otros factores
- Revisar que las clasificaciones sean para las condiciones de servicio

h.- Tubería de purga

- Revisar que durante la purga el flujo sea normal
- Observar que la tubería tenga libertad de expansión y contracción
- Ver que no tenga vibración excesiva

i.- Registros de operación y mantenimiento (o & m)

- Estudiar y analizar los registros de : operación, mantenimiento, tratamiento de agua, pruebas, controles, etc.
- Estudio y análisis de reparaciones efectuadas desde la ultima inspección

j.- Conclusiones

- Observar las practicas reales de operación y mantenimiento durante todas las pruebas, para determinar su aceptabilidad
 - Deberán hacerse recomendaciones sobre defectos o deficiencias de operación y mantenimiento
-

Inspección interna de la caldera

Las calderas deben tener al menos una inspección interna por año, de parte de un representante calificado de la compañía de seguros; durante el año el inspector de seguros debe examinar la caldera una o mas veces, dependiente de las condiciones. durante la inspección, algún representante del propietario debe estar presente para tratar con el inspector oficial y tomar notas específicas de las inspecciones acerca de :

- Depósitos de incrustaciones
- Corrosiones
- Erosiones
- Grietas
- Fugas
- Otras irregularidades

El cuidado de una caldera no debe empezar y terminar con una inspección anual, el personal de operación debe estar continuamente inspeccionando la caldera y estar alerta de posibles condiciones que lleven a problemas. el examen interno se hace primariamente para verificar el cuidado y mantenimiento.

La inspección interna debe incluir lo siguiente .

- Un examen de las reparaciones previas
- Lo adecuado de la unidad para la presión de operación
- La resistencia de las juntas, ligamentos de tubos y otras partes vitales
- Una decisión sobre la conveniencia de continuar con la caldera en servicio

Cuando se hace necesario determinar la posible seguridad y vida útil remanente de una caldera, se pueden emplear pruebas no-destructivas, para este propósito se pueden utilizar exámenes de rayos x y de ultrasonido así como otros tipos de pruebas no-destructivas con lo que se determina la condición existente en la caldera.

El método de magnaflux es útil para detectar la presencia de roturas y grietas en el hierro y el acero, esta prueba se realiza cubriendo primero el área a ser inspeccionada con un polvo fino magnético y entonces se somete a magnetismo. se puede observar fácilmente una grieta o rotura por el patrón desplegado o mostrado en el polvo magnético.

El método de penetración es aplicable a la localización de grietas en materiales metálicos y no-metálicos, esta prueba se hace puliendo el área y aplicando un líquido. Las grietas son localizadas fácilmente observando el área mientras esta iluminada con una luz ultravioleta.

El espesor de placas de metal o tubos puede ser medido por un generador de ondas de sonido ultrasonido, en este caso es necesario tener acceso a solo un lado de la placa o tubo para hacer esta medición. El generador puede estar calibrado para leer el espesor del metal y puede por lo tanto ser usado para determinar áreas en donde el espesor de la placa o tubo se ha reducido.

El escleroscopio se usa para determinar la dureza del metal, es útil para determinar el grado en que el metal de la caldera se ha endurecido por la aplicación de esfuerzos repetidos.

Cuando una caldera se saca de servicio para inspección se debe permitir que se enfríe lentamente y realizar las siguientes actividades :

- Operar los sopladores de hollín para limpiar los tubos y mampara, antes de que la temperatura haya caído lo suficiente que produzca humedad en los tubos.
- Cuando la caldera este lo suficientemente fría, ábranse las válvulas de purga y
- Remueva las cubiertas de los registros de hombre y las tapas de algunos registros de mano
- Lávese el interior del domo con agua a alta presión
- Antes de entrar a la caldera cierre la purga, la válvula del cabezal principal y las válvulas de agua de alimentación, bloqueándolas en la posición de cerradas o etiquetándolas para asegurarse contra la posibilidad de que sean abiertas mientras el personal de inspección y mantenimiento están dentro de la caldera.
- Revise las extensiones eléctricas para asegurarse que están en buenas condiciones.
- El inspector debe tener disponible una lista de las dimensiones y otros datos importantes, así como registros e historial de reparaciones e inspecciones de la caldera
- Remueva la acumulación de ceniza, escoria y hollín del hogar y pasos de la caldera
- La remoción de escoria dura de las paredes del hogar debe hacerse con cuidado para evitar daños al revestimiento refractario, la escoria se adhiere fuertemente al revestimiento y por lo tanto es mejor dejar que permanezca parte de la escoria a desprender una parte de refractario
- Remueva el hollín y cenizas de mamparas horizontales, embudos, etc.

- Debe evitarse la creación de polvos por falta de cuidado en su manejo o por soplar con aire comprimido cenizas, finos de carbón y hollín
- El uso cuidadoso de la chimenea o tiros de ventiladores mientras se hace la limpieza reducirá la cantidad de cenizas descargadas dentro de la sala de caldera
- No se acumulen en pilas las cenizas mientras se hace la limpieza porque pueden estar lo suficientemente calientes que causen serias quemaduras

Una inspección al interior de una caldera tubular de retorno, debe incluir lo siguiente :

- Un examen de la cubierta, tanto arriba como abajo de los tubos
- Cheque que no haya tirantes, refuerzos o sostenes rotos, probándolos con martillo
- Observe que no haya taponamientos en la entrada de agua de alimentación y conexiones de vapor incluyendo la tubería de secado.
- Examine las superficies de la cubierta y tubos por depósitos de incrustaciones, bolsas, ampollas, aceite y corrosión.
- Cheque por posibles picaduras o desgastes de metal en las juntas.
- Cuando se usen tapones fusibles observe su condición y reemplácelo si esta corroído, en cualquier caso, el tapón fusible debe ser reemplazado una vez al año
- Háganse arreglos de alumbrado que permitan ver entre los tubos, y cheque por posibles obstrucciones que puedan interferir con la circulación del agua.
- La inspección interior de calderas verticales y otras pequeñas de tubos de humo debe haberse observado las condiciones a través de los registros de inspección
- La inspección de la cubierta exterior de una caldera tubular de retorno se hace desde el interior del hogar. las grietas en las placas de la cubierta son peligrosas y deben ser investigadas y reparadas, una excepción son las grietas de fuegos que van desde el borde de la placa en los agujeros de los remaches de las juntas del cincho ; se puede permitir un numero limitado de estas grietas.
- En el interior del hogar cheque la guarnición (setting) por roturas y observe la condición de emparrillados y pared puente
- Si la caldera es del tipo a ras del frente (flush-front) inspeccione la mampara central por posibles fugas
- Vea que la tubería de soplado este protegida adecuadamente contra los gases calientes

- Abra las puertas de ambos extremos de la cubierta de la caldera e inspeccione los extremos de los tubos por

Quemaduras

Fugas en juntas

Corrosión

Tendencia a pandeado de placas

- Observe la apariencia exterior de la guarnición (setting), y cheque por fugas de aire en las juntas de la guarnición y cubierta

En la inspección de una caldera de tubos de agua, es necesario entrar a los domos, una inspección al domo de vapor deberá incluir lo siguiente :

Un examen de :

- Entrada de agua de alimentación
- Inyección de químicos
- Purga continua
- Conexiones de columna de agua por posibles taponamientos
- Domo y tubos por incrustación y corrosión
- Ligamentos de tubos y juntas por adelgazamiento o debilitamiento
- Separador o tubo seco por corrosión o incrustación
- Placas de domo, tubos y especialmente remaches por signos de fragilización cáustica

Domo inferior :

- Observe la naturaleza de los depósitos y la condición de los tubos
- Cheque las conexiones de purga por depósitos de incrustaciones y posibles taponamientos
- En calderas de tubos rectos es necesario remover las tapas de los registros de mano para inspeccionar el interior de los tubos.
- En algunas ocasiones es necesario pasar a través de los tubos un limpiador mecánico para determinar la naturaleza y extensión de las incrustaciones

Además de los domos, la inspección a una caldera de tubos de agua también incluye lo siguiente :

- Entrada al hogar y varios pasos de la caldera para inspeccionar la guarnición (setting), mamparas y exterior de los tubos
- Después de que se ha removido la escoria y ceniza de las paredes del hogar y tubos, cheque por la formación de bolsas
- Examine los tubos por posible erosión por choque de flama y acción de los sopladores de hollín
- Mantenga girando los sopladores y observe el ángulo de viaje para ver que no sople contra una pared o mampara y que las toberas no soplen directamente contra los tubos. háganse los ajustes necesarios al ángulo de soplado y al alineamiento con respecto a los tubos
- Examine todas las mamparas para ver que los gases no tengan cortos-circuitos, con lo cual fallan para entrar en contacto con todas las superficies de calentamiento
- Abra las compuertas de la chimenea o entrada de ventilador para ver que abran completamente y cierren herméticamente
- Observe las condiciones del exterior de la caldera, tuberías y accesorios
- Cheque el arreglo de válvulas e inspeccione los siguientes sistemas de tubería
 - i - Cabezal de vapor principal
 - ii - Válvulas de no-retorno y drenes
 - iii - Agua de alimentación
 - iu - Conexiones de manómetros de vapor
 - u - Líneas de suministro a sopladores de hollín
 - ui - Purga principal
 - uii - Purga continua
 - uiii - Válvulas de seguridad
 - ix - Descargas y drenes
 - x - Suministro de químicos al domo de la caldera
- Opere los mecanismos de control de combustión que mueven las compuertas y los dispositivos de alimentación de combustible
- Cheque el emparrillado por quemaduras, taponamientos o parrillas desgastadas, y daño o desgaste de mecanismos de alimentación de combustible

Cuando la caldera esta siendo inspeccionada, cheque los sopladores de hollín en lo siguiente :

- Vea que no se tiene cojinetes defectuosos o perdidos
- Observe que no haya elementos rotos o "pandeados"
- Revise que no falten toberas
- Opere cada elemento y compare el ángulo de soplado con las especificaciones
- Asegúrese que el ángulo de soplado es el adecuado para la limpieza, pero evite soplar directamente sobre los tubos, que puede resultar en erosión
- Haga las reparaciones y ajustes necesarios

Después de que se ha completado todo el trabajo necesario la caldera esta lista para cerrarse y llenarse con agua; asegúrese que se ha retirado todo el equipo de mantenimiento y que todo el personal esta fuera de la caldera.

Haga siempre una prueba hidrostática en la caldera después de que ésta ha sido abierta para inspección o reparación; a menos que se hayan hecho reparaciones grandes al domo o a la cubierta, no es necesario que la prueba sea $1\frac{1}{2}$ veces la presión de trabajo. La presión desarrollada por las bombas de agua de alimentación es suficiente para checar fugas de juntas de tubos y empaques de registros de hombre y de mano, si no hay fugas en la sección de presión de la caldera, ésta está lista para el servicio.