

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA



102
Ejemplar

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

“PROYECTO SOBRE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DE PIEZAS
ENGRANADAS POR INDUCCION ELECTRICA”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

HECTOR MANUEL GONZALEZ QUINTERO

GUADALAJARA, JALISCO. 1990



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE.

INTRODUCCION.	1
ANTECEDENTES.	4
CAPITULO 1. <u>TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS</u> . . .	1-1
1.1 Estructura y cristalización de los metales.	1-2
1.1.1 El átomo y los elementos.	1-2
1.1.2 Enlaces atómicos.	1-4
1.1.3 Estructura cristalina	1-6
1.1.4 Nucleación y cristalización	1-8
1.2 Solidificación de aleaciones con formación de soluciones sólidas	1-12
1.3 Endurecimiento de los aceros.	1-15
1.3.1 Hierro y acero.	1-15
1.3.2 Principios de los tratamientos térmicos . . .	1-23
1.3.2.1 Austenización	1-25
1.3.2.2 Ecuilibrado.	1-27
1.3.2.3 Templado.	1-27
1.4 Templabilidad	1-32
1.5 Enfriamiento.	1-35
1.5.1 Porcentaje de extracción de calor	1-36
1.5.2 El medio de enfriamiento.	1-36
1.6 Endurecimiento superficial.	1-37
CAPITULO 2. <u>EL CALENTAMIENTO POR INDUCCION ELECTRICA.</u>	2-1
2.1 La inducción electromagnética	2-2
2.1.1 Principios generales.	2-2
2.1.2 El calentamiento superficial por inducción.	2-4
2.2 Endurecimiento.	2-9
2.3 Diseño del inductor de calentamiento.	2-10

2.4	Equipo utilizado.	2-16
2.4.1	Suministro de energía	2-19
2.4.2	Estación de trabajo	2-19
2.4.3	Construcción.	2-21
2.5	Selección de la frecuencia, potencia, y duración del calentamiento.	2-24
2.5.1	Selección de la frecuencia.	2-24
2.5.2	Selección de la potencia.	2-25
2.5.3	Selección de la duración del calentamiento.	2-27
 CAPITULO 3. <u>DISEÑO DEL EQUIPO</u>		 3-1
3.1	Generalidades	3-2
3.1.1	Operaciones	3-3
3.2	Cálculo del equipo.	3-6
3.2.1	Datos preliminares.	3-6
3.2.1.1	Método de endurecimiento.	3-6
3.2.1.2	Area total a ser calentada.	3-6
3.2.1.3	Profundidad de endurecido	3-10
3.2.2	Selección de la frecuencia.	3-12
3.2.3	Cálculo de la potencia.	3-12
3.2.4	Duración del calentamiento.	3-13
3.3	Equipo.	3-16
3.4	Equipo de alimentación del sistema.	3-17
3.4.1	Funcionamiento.	3-20
3.5	Calentamiento progresivo contra calentamiento a un sólo tiempo.	3-25
3.6	Control	3-27
3.6.1	Control de calidad.	3-27
3.6.2	Control del proceso	3-27
 CAPITULO 4. <u>EVALUACION DEL PROYECTO</u>		 4-1
4.1	Preliminares.	4-2

4.2 Cotizaciones.	4-3
4.3 Comparación de costos anuales de operación.	4-10
4.3.1 C.A.O. del sistema actual	4-10
4.3.2 C.A.O. del sistema propuesto.	4-12
4.4 Período de recuperación de la inversión a valor presente (PRIVP).	4-13
CAPITULO 5. <u>ADIESTRAMIENTO, CAPACITACION</u> <u>Y SEGURIDAD INDUSTRIAL.</u>	5-1
5.1 Adiestramiento y capacitación	5-2
5.2 Seguridad industrial.	5-5
5.2.1 Protección del equipo	5-5
5.2.2 Protección del área de trabajo.	5-6
5.2.3 Protección personal	5-8
5.2.3.1 General	5-8
5.2.3.2 Especificaciones.	5-8
5.2.3.3 Protección para los ojos.	5-8
5.2.3.4 Protección para las manos	5-9
5.2.3.5 Protección para los pies.	5-9
5.2.3.6 Protección para la cabeza	5-10
CONCLUSIONES.	6-1
BIBLIOGRAFIA.	7-1

INTRODUCCION

INTRODUCCION.

El proyecto que seleccioné para desarrollar como tesis lo considero una síntesis de los conocimientos que adquirí durante mi carrera, abarcando las tres áreas que básicamente conforman el plan de estudios: el área mecánica; el área eléctrica y el área industrial.

Debido a las escasas fuentes de información acerca de la inducción eléctrica en el calentamiento superficial, la presente tesis puede servir como manual para realizar la selección de cualquier equipo similar al que aquí expongo.

En el primer capítulo desarrollo lo que podrían ser los preliminares para poder entender qué es lo que sucede en los tratamientos térmicos. Explico en forma secuencial desde el átomo hasta las transformaciones cristalinas que sufren los aceros, basado en el diagrama hierro-carbono; para terminar con el endurecimiento superficial, su obtención, su utilidad y los métodos para lograrlo.

Una vez explicado esto, paso al segundo capítulo, donde explico, a través de teoría, fórmulas, diagramas y dibujos, el método de la inducción eléctrica para lograr el calentamiento superficial. Todo esto sentará las bases para la elección del equipo necesario y la instalación que requiera.

El diseño del equipo, que es lo que corresponde al tercer capítulo, está basado en la teoría expuesta en los capítulos precedentes. Comenzaré por describir la pieza que se va a tratar, y cuyo nombre técnico es sprocket o gatarina, y la zona que recibirá el tratamiento térmico, las razones y el método a seguir. Una vez analizado lo anterior estaremos en condiciones de seleccionar un equipo que se ajuste a las necesidades de la planta, así como un equipo auxiliar para el manejo de las piezas.

Hasta aquí es lo que corresponde a la parte técnica. En el capítulo cuatro realizaré la parte que corresponde al análisis económico, que incluye los costos anuales de operación del sistema actual y del propuesto y un análisis del periodo de recuperación de la inversión para el equipo de inducción.

El quinto capítulo trata sobre las reglas de seguridad industrial que deben de tomarse en cuenta antes y después de la instalación del equipo, así como una pequeña guía de adiestramiento y capacitación para el óptimo manejo del equipo.

Para finalizar expongo las conclusiones a las cuales llegué, comparando las ventajas y desventajas que presentan tanto el sistema actual como el sistema propuesto.

Con esto termino lo que corresponde a la tesis, que representa la culminación de mi carrera. Espero que éste sólo sea un pequeño paso de los que en adelante vaya a dar.

Quiero agradecer a mis padres su sacrificio y el amor que me demostraron; que con sus consejos, comprensión y ejemplo, me enseñaron el verdadero camino. Sin ellos, hubiera sido imposible lograr tantas cosas.

A ella, mi compañera inseparable en las buenas y en las malas, que guarda un lugar muy especial en mi corazón, y que compartí conmigo las alegrías y tristezas de mi carrera.

A todas las personas que me ayudaron para la realización de esta tesis, a quienes demostraron tener confianza en mí y me acompañaron durante toda mi carrera, apoyándome y motivándome a seguir adelante.

A todos ellos, gracias. Espero no haberlos defraudado.

A N T E C E D E N T E S

ANTECEDENTES.

En la actualidad, la gran demanda del mercado y la competencia, ha obligado a los fabricantes a aumentar la velocidad de producción. Quien no produce rápido, no progresa.

Este problema se presentó en la empresa Dodge de México S.A de C.V. que se dedica a la fabricación de equipo para transmisión de potencia mecánica en El Salto, Jalisco. En su línea de producción existe un cuello de botella en el área de tratamiento térmico que provoca un retardo en el resto de la línea, gastos por demoras y aumento de inventarios de productos en proceso.

Ante esta situación, se hizo un análisis del problema y se encontró que el método que están utilizando para realizar el endurecimiento superficial de las piezas llamadas catarinas no es el adecuado. La principal razón para asegurar lo anterior es el tiempo que tarda en calentar las piezas. Su velocidad no es la misma con que funciona la línea. Su funcionamiento se basa en el calentamiento con flama oxiacetilénica. La pieza se coloca a una distancia de la flama y se pone a girar para que reciba el calor por todas sus caras hasta que alcanza la temperatura deseada.

Realizando un estudio más profundo, se encontró que el actual método también ocasiona altos costos de operación por el consumo de oxígeno y acetileno, que van aumentando gradualmente con el paso del tiempo.

Inicialmente se propusieron dos soluciones, pero sólo una llenaba los dos requisitos, el de rapidez y el de economía. La primera solución se refería a la instalación de otra estación de calentamiento con las mismas características de la anterior y así se podría aumentar el ritmo de producción. Pero si una estación provoca altos costos, dos los aumentarían al doble.

Sin embargo se pensó que la mejor solución sería la de cambiar el método de calentamiento por uno que bajara los tiempos y los costos de operación. Entonces se pensó en el calentamiento por inducción eléctrica, que llena ambos requisitos.

CAPITULO UNO

TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS

TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS

1.1 Estructura y cristalización de los metales.

1.1.1 El átomo y los elementos.

Toda la materia se considera que está formada por elementos químicos, los cuales son las unidades más pequeñas que pueden distinguirse con base en su actividad química y propiedades físicas. Estos elementos están formados a su vez por átomos que tienen una estructura que le da propiedades características a cada elemento. El átomo está constituido por tres partículas fundamentales: a) electrones, partículas pequeñísimas con carga eléctrica negativa cuya masa es de 9.11×10^{-28} gr. y representa $1/1800$ de la masa de un protón, b) protones, partículas con carga positiva, con masa de 1.673×10^{-24} gr., y c) neutrones, que son partículas con carga neutra y una masa de 1.675×10^{-24} gr. ligeramente más pesados que los protones.

El átomo está formado por un núcleo de carga positiva, con un diámetro del orden de 10^{-12} cm. donde se encuentran los protones y los neutrones, y rodeado por un número suficiente de electrones que mantienen al átomo como un todo eléctricamente neutro. Como el electrón y el protón tienen cargas iguales pero eléctricamente opuestas, el átomo neutral debe contener un número igual de electrones y de protones (fig. 1.1).

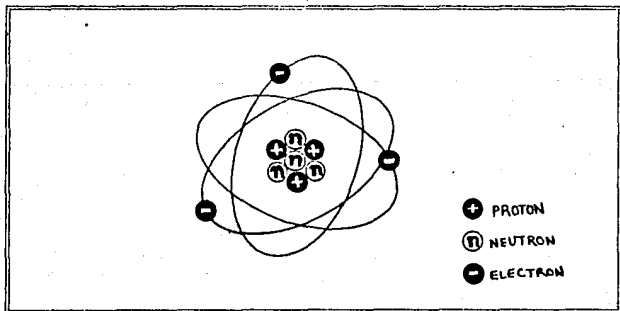


Figura 1.1 El átomo.

El número atómico de un elemento es igual al número de protones, o como el átomo tiene que ser eléctricamente neutro, el número atómico es también igual al número de electrones.

Los electrones, que dan vueltas sobre sus propios ejes conforme giran alrededor del núcleo, están arreglados en capas definidas. El máximo número de electrones que puede acomodar en cada capa es $2n^2$, donde n es el número de capa. Así, el máximo número de electrones que acomodará en la primera capa es dos, ocho en la segunda, dieciséis la tercera, treinta y dos en la cuarta, etc. A su vez, cada capa es subdividida en estados o niveles de energía. De acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, no puede haber más de dos electrones en cualquier nivel de energía, y si hay que acomodar dos en el mismo, deben ser de espín o giro magnético contrario uno al otro. El número de niveles de energía aumenta con la distancia desde el núcleo y los electrones tienden a ocupar los niveles de energía más bajos. Por tanto, las capas internas tienden a completarse primero, pero esto no siempre es cierto para algunos de los elementos más pesados.

Los electrones en las capas no llenas se conocen como electrones de valencia y causan, en gran medida, el comportamiento químico de los elementos (fig. 1.2).

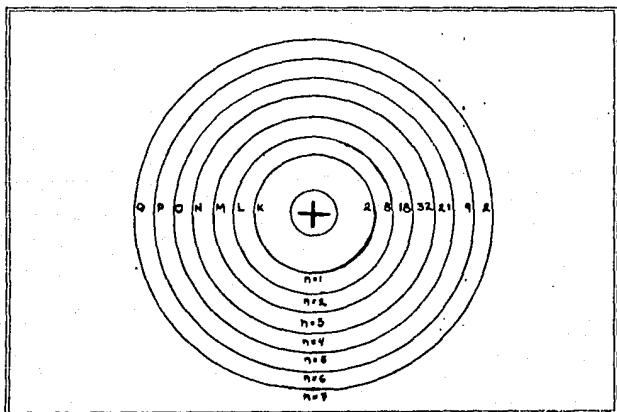


Figura 1.2 Electrones de valencia.

Los elementos químicos pueden clasificarse aproximadamente en tres grupos: metales, metaloides y no metales. Los elementos considerados como metales se distinguen por varias propiedades características: a) en el estado sólido existen en forma de cristales; b) tienen relativamente alta conductividad térmica y eléctrica; c) tienen la habilidad de ser deformados plásticamente y d) tienen relativamente alta reflectividad a la luz (lustre metálico). Los metales constituyen unas tres cuartas partes de los elementos.

Los metaloides se parecen a los metales en algunos aspectos y a los no metales en otros. Generalmente tienen alta conductividad, pero poca o ninguna plasticidad.

El resto de los elementos se conocen como no metales, lo cual incluye los gases inertes.

1.1.2 Enlaces atómicos.

Es característico del estado sólido que los materiales exhiban una estructura cristalina que significa un arreglo geométrico definido de átomos o moléculas. Los enlaces mantienen juntos a los átomos dentro de dicha estructura y existen cuatro tipos de enlaces posibles:

a) Enlace iónico: La estructura electrónica de los átomos es relativamente estable cuando las capas externas contienen ocho electrones, o dos en el caso de la primera capa. Cuando el elemento tiene un electrón en exceso, lo perderá fácilmente para conseguir su estabilidad. Entonces tendrá más protones que electrones y se le llamará ión positivo (átomo cargado) con una carga $+1$ y por el contrario si al elemento le falta un electrón para completar su última capa, aceptará uno con facilidad y se convertirá en un ión negativo con carga -1 . El enlace iónico se da entre metales y no metales. Los primeros ceden uno o varios electrones, produciéndose iones positivos y los no metales se apropian de ellos para su capa externa convirtiéndose en iones negativos. Estos iones por sus cargas se unen entre sí para formar el enlace (fig. 1.3).

b) Enlace covalente: En este enlace, átomos del mismo elemento o de diferentes elementos comparten electrones. En este caso, los iones no se forman, sino que el fuerte enlace se debe a la atracción que efectúan los núcleos positivos sobre los electrones compartidos. Este enlace es típico de la mayoría de las moléculas de gas y también recibe el nombre de homopolar (fig. 1.4).

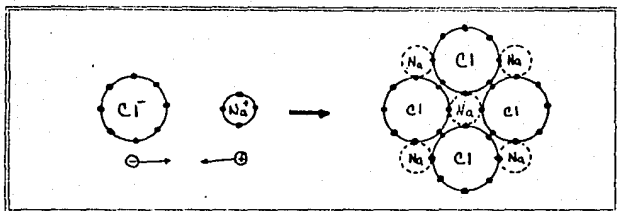


Figura 1.3 Enlace iónico.

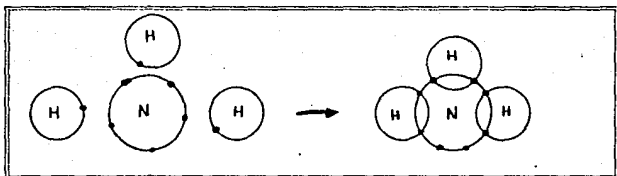


Figura 1.4 Enlace covalente.

c) Enlace metálico: La falta de iones cargados opuestamente en la estructura metálica y la falta de suficientes electrones de valencia para formar un enlace covalente verdadero hace necesario que más de dos átomos compartan electrones de valencia. Cada átomo de metal contribuye con sus electrones de valencia a formar un gas de electrones negativo. Estos electrones no están asociados con un ion particular, sino que se mueven libremente entre los iones metálicos positivos en niveles de energía definidos. Los iones metálicos se mantienen juntos en virtud de su atracción mutua para la nube electrónica negativa (fig.1.5).

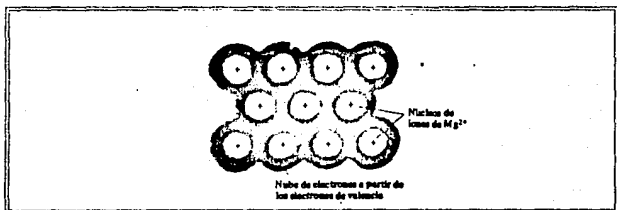


Figura 1.5 Enlace metálico.

d) Fuerzas de Van der Waals: Este tipo de enlace se presenta en átomos neutros como los de los gases inertes. Cuando los átomos se acercan hay una separación de los centros de cargas positivas y negativas, y resulta una débil fuerza de atracción. Esta atracción se debe a la distribución asimétrica de las cargas más que a enlaces primarios. Se atraen las moléculas y no los iones y es de importancia sólo a bajas temperaturas cuando la débil fuerza de atracción puede vencer la agitación térmica de los átomos (fig. 1.6).

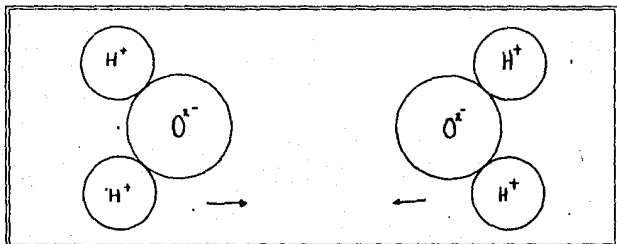


Figura 1.6 Fuerzas de Van der Waals.

1.1.3 Estructura cristalina.

Como los átomos tienden a adoptar posiciones relativamente fijas, esto da lugar a que en estado sólido se formen cristales. Los átomos oscilan alrededor de puntos fijos y están en equilibrio dinámico más que fijos estáticamente. La red tridimensional de líneas imaginarias que conecta los átomos se llama red espacial, en tanto que la red más pequeña que tiene la simetría total del cristal se llama celda unitaria.

Hay catorce tipos posibles de redes espaciales, pero la mayoría de los metales importantes se cristalizan ya sea en los sistemas cúbicos o en los hexagonales.

Los tres tipos de redes espaciales que se encuentran más comúnmente son:

a) Cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c.). Si los átomos se representan como esferas, el átomo del centro toca a cada átomo de las esquinas, pero éstos no se tocan entre sí. Como cada átomo de las esquinas lo comparten ocho cubos

adyacentes y el átomo del centro no puede compartirlo ningún otro cubo, la celda unitaria contiene dos átomos (fig. 1.7).

b) Cúbica centrada en las caras (f.c.c.). Además de haber un átomo en cada esquina del cubo, hay uno en el centro de cada cara, pero ninguno en el centro del cubo. Cada átomo de las caras toca los átomos de las esquinas más próximas. La celda unitaria contiene cuatro átomos (fig. 1.8).

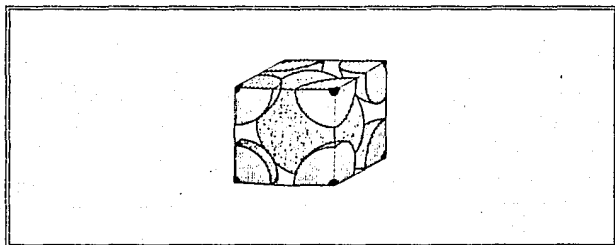


Figura 1.7 Celda unitaria de la estructura b.c.c.

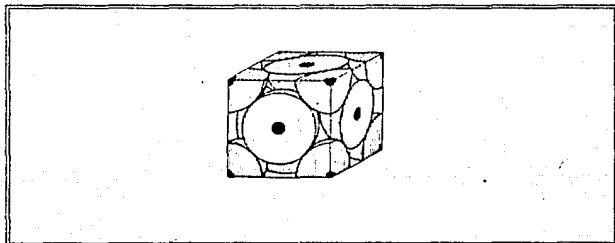


Figura 1.8 Celda unitaria de la estructura f.c.c.

c) Hexagonal compacta (c.p.h.). La figura 1.9 nos muestra dos planos basales en forma de hexágonos regulares, con un átomo tanto en cada esquina de hexágono como en el centro. Además, hay tres átomos en forma de triángulo a la mitad de la distancia entre los dos planos basales.

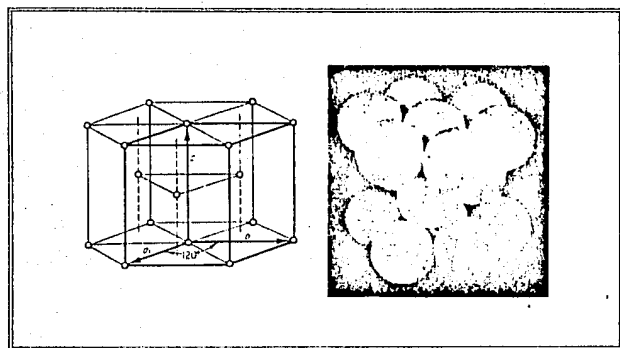


Figura 1.9 Estructura c.p.h.

Algunos metales presentan una propiedad llamada polimorfismo, que es aquella que tiene un material para existir en más de un tipo de red espacial en el estado sólido. Si el cambio en estructura es reversible, entonces el cambio polimórfico se conoce como alotropía. El hierro es el mejor ejemplo conocido.

Como más adelante veremos, el hierro cristaliza a 1538 °C (2800 °F) en b.c.c. (Fe δ), a 1400 °C (2554 °F) cambia a f.c.c. (Fe Γ) y a 910 °C (1670 °F) vuelve a transformarse en b.c.c. (Fe α).

1.1.4 Nucleación y cristalización.

La cristalización es la transacción del estado líquido al sólido y ocurre en dos etapas: a) formación de núcleos y b) crecimiento del cristal.

Los átomos que se encuentran en estado líquido están en desorden, debido a la energía cinética que les proporciona el calor, pero es posible que algunos en cualquier instante dado estén en posiciones que corresponden exactamente a la red espacial que adoptan cuando solidifican. Estos agregados o grupos causales no son permanentes, sino que continuamente se deshacen y se forman de nuevo en otros puntos. El tiempo que existen está determinado por la temperatura y tamaño del grupo: a mayor temperatura, mayor energía cinética de los átomos y menor la vida del grupo. Los grupos pequeños son muy inestables, ya que sólo están formados por un pequeño

número de átomos y la pérdida de uno solo puede destruir el grupo. Cuando la temperatura del líquido disminuye, el movimiento del átomo decrece, alargando la vida del grupo y mayor número de grupos estarán presentes al mismo tiempo.

Los átomos en un material tienen energía tanto cinética como potencial. La cinética es función de la temperatura mientras que la potencial está relacionada con la distancia entre átomos. Consideremos un metal puro en su punto de congelación en el que ambos estados, líquido y sólido, se encuentran a la misma temperatura. La energía cinética de los átomos en el líquido y en el sólido debe ser la misma, pero hay una diferencia significativa en energía potencial. Los átomos en el sólido están mucho más próximos, de modo que la solidificación ocurre con una liberación de energía. Esta diferencia en energía potencial entre los estados líquido y sólido se conoce como calor latente de fusión.

Cuando la temperatura del metal líquido ha disminuido en forma suficiente por debajo de su punto de congelación, aparecen espontáneamente agregados o núcleos estables en diversos puntos del líquido. Estos núcleos, que ahora se han solidificado actúan como centros para la cristalización posterior, que al enfriar, ejercen una fuerza de atracción suficientemente fuerte para atraer hacia sí a los átomos que han perdido la mayor parte de su energía cinética debido a la substracción de calor. De este modo se inicia la formación de los cristales en tres dimensiones, con los átomos uniéndose entre ellos generalmente a lo largo de los ejes del cristal. Esto da lugar a una estructura característica con apariencia de árbol, llamada dendrita (fig. 1.10a). Cada núcleo se forma de manera causal y en cada cristal las dendritas tendrán direcciones al azar (fig. 1.10b). Cuando disminuye la cantidad de líquido, las separaciones entre las ramas de la dendrita se llenarán y el crecimiento de la dendrita lo obstruirá mutuamente el de sus vecinos (fig. 1.10c). Esto es causa de que tengan una forma exterior muy irregular. A estos cristales se les llaman granos y al área a lo largo de la cual están unidos se conoce como frontera del grano. El tamaño de dicho grano depende del número de núcleos activos y de la velocidad de crecimiento en la cristalización (fig. 1.10d).

La rapidez de enfriamiento es el factor más importante para determinar la rapidez de nucleación y, por lo tanto, el tamaño del grano. El enfriamiento rápido dará como resultado que se formen un gran número de núcleos y que se obtenga un tamaño de grano fino, de gran tenacidad y resistencia al impacto, duros y fuertes, en tanto que en el enfriamiento lento sólo se forman algunos núcleos y el grano es grande, frágil y quebradizo.

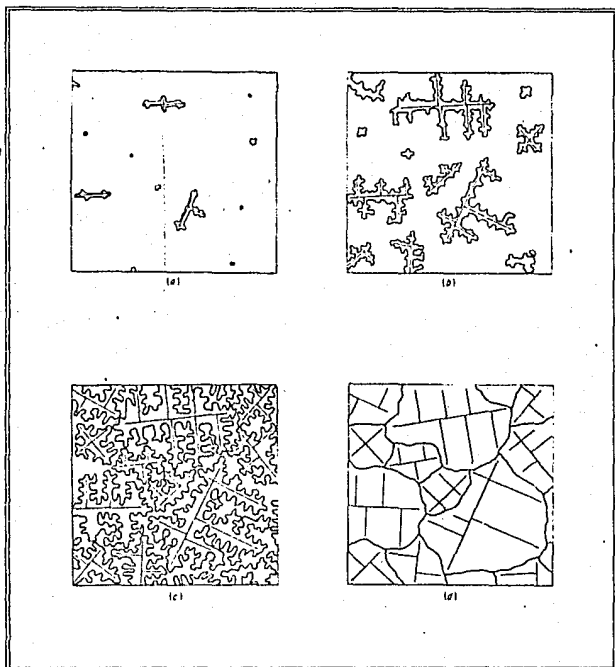


Figura 1.10 El crecimiento de los granos.

Sólo en atmósferas controladas y bajo un estricto control de la temperatura se pueden lograr cristalizaciones perfectas; es por esto que en todas las solidificaciones no controladas vamos a encontrar que en la formación de los granos existen imperfecciones cristalinas. Entre las más importantes están: a) las vacantes o vacíos; b) las intersticiales y c) las dislocaciones.

+ Las vacantes son sitios atómicos vacíos. Son una característica estable de los metales a todas las temperaturas superiores al cero absoluto. Los átomos que

rodean una vacante tienden a estar más juntos, distorsionando los planos de la red (fig. 1.11a).

+ Los intersticiales tienden a empujar a mayor distancia a los átomos vecinos y producen distorsión de los planos reticulares (fig. 1.11b). Las vacantes se producen al solidificarse, al elevarse la temperatura o por irradiación con partículas nucleares de movimiento rápido. Los átomos intersticiales pueden producirse por la severa distorsión local que se presenta durante la deformación plástica, así como por irradiación.

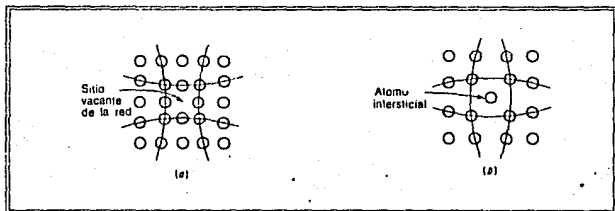


Figura 1.11 Las imperfecciones cristalinas.

+ Una dislocación puede definirse como una región distorsionada situada entre dos partes sustancialmente perfectas de un cristal. La dislocación de borde consta de un medio plano de átomos extra en el cristal. La creación, multiplicación e interacción entre las dislocaciones son muy útiles para explicar muchas propiedades de los metales (fig. 1.12).

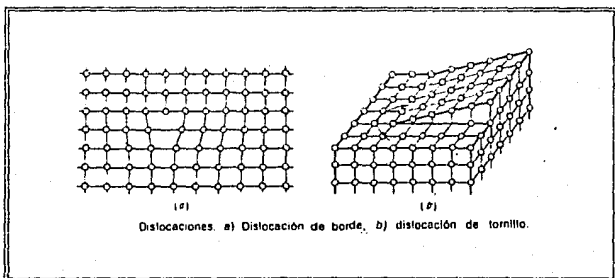


Figura 1.12 Las dislocaciones.

1.2 Solidificación de aleaciones con formación de soluciones sólidas.

Como las propiedades de un material dependen ampliamente del tipo, número, cantidad y forma de las fases presentes y pueden cambiarse alterando estas cantidades, es esencial conocer: a) las condiciones bajo las cuales existen estas fases y b) las condiciones bajo las cuales ocurrirá un cambio en la fase.

Hasta ahora, sólo hemos visto el comportamiento de un elemento puro, pero ¿qué pasa cuando le agregamos otro elemento para constituir una aleación?. Para caracterizar las fases de las aleaciones se usan los diagramas de equilibrio, también conocidos como diagramas constitucionales.

Para construir el diagrama de equilibrio se aplica el método de análisis térmico, o sea, se construyen las curvas de enfriamiento y se determinan las temperaturas de transformación según los puntos de inflexión y estacionamiento en las curvas, los cuales obedecen a los efectos térmicos de la transformación, y para especificar por completo el estado de un sistema en equilibrio, es necesario especificar tres variables independientes que son: temperatura, presión y composición. Si se supone que la presión permanece constante con valor atmosférico, el diagrama de equilibrio indicará los cambios estructurales debidos a la variación de temperatura y composición. El diagrama es, esencialmente una representación gráfica de un sistema de aleación. Las condiciones de equilibrio pueden ser aproximadas por medio de calentamiento y enfriamiento extremadamente lentos, de modo que se deje suficiente tiempo si un cambio de fase está por ocurrir.

Entre el cambio de fase líquida a la fase sólida existe un rango de temperatura para que se produzca dicho cambio. Sin embargo, existen composiciones que cambian de fase a una temperatura constante, a ésta se le conoce como composición eutéctica y se representa como un mínimo en la curva de enfriamiento. A la temperatura en que sucede esta transformación se le llama temperatura eutéctica y todo esto sucede en un punto del diagrama de equilibrio llamado punto eutéctico.

A todas las composiciones que se encuentran antes del punto eutéctico se les nombra hipoeutécticas y a las que están después de dicho punto se les llama aleaciones hipereutécticas.

Cuando se adicionan uno o más elementos nuevos y aún da como resultado una estructura de una sola fase, se dice que forman una solución sólida. Para explicar lo anterior,

consideremos una aleación con 70% de elemento A y 30% de elemento B con enfriamiento lento y bajo condiciones de equilibrio de la cual se observarán los cambios de fase que ocurran (fig. 1.13).

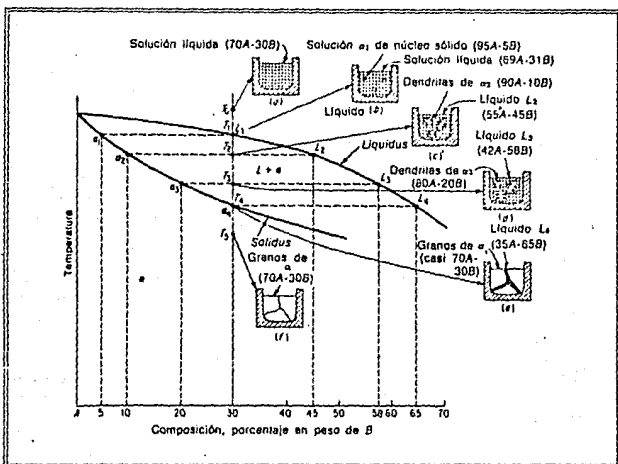


Figura 1.13 Composición de una solución sólida.

Esta aleación a temperatura T_0 es una solución homogénea de una sola fase líquida y permanece así hasta que se alcanza la temperatura T_1 . Como T_1 está en la línea llamada de liquidus, la congelación o solidificación se inicia ahora. El primer núcleo de solución sólida que se formará, α_1 , será muy rico en el metal de mayor punto de fusión A y estará constituido por 95A-5B, según la regla de la composición química de las fases. Como la solución sólida en formación toma material muy rico en A del líquido, este último deberá ser más rico en B. Precisamente después de iniciarse la solidificación, la composición del líquido es de alrededor de 69A-31B.

Cuando se alcanza la temperatura menor, T_2 , la composición líquida está en L_2 . La única solución sólida en equilibrio con L_2 , y por tanto la única solución sólida que se forma en T_2 es α_2 . Aplicando de nuevo la regla de la composición química de las fases, α_2 está constituida por 10B; en consecuencia, conforme la temperatura disminuye, no

sólo hace que la composición del líquido sea más rica en B, sino también la solución sólida. En T_2 , los cristales de α_2 se forman rodeando los centros de composición α_1 , y también separan las dendritas de α_1 . Para que se establezca el equilibrio en T_2 , la fase sólida entera deberá estar a una composición α_2 . Esto requiere difundir los átomos de B al centro rico en A no sólo del sólido apenas formado, sino también del líquido. Esto es posible sólo si el enfriamiento es extremadamente lento, de modo que la difusión pueda ir al mismo ritmo que el crecimiento cristalino.

En T_2 , las cantidades relativas del líquido y de la solución sólida pueden determinarse mediante la regla de las cantidades relativas de cada fase o regla de la palanca: conforme la temperatura disminuye, la solución sólida continúa su crecimiento a expensas del líquido. La composición de la solución sólida sigue la línea llamada de solidus, en tanto que la composición del líquido sigue la línea liquidus, haciéndose ambas fases más ricas en B. En T_3 , la solución sólida formará aproximadamente las tres cuartas partes de todo el material presente. Finalmente, la línea solidus se alcanza en T_4 y lo último del líquido L_4 , muy rico en B, solidifica sobre todo en las fronteras de grano; no obstante, la difusión tomará lugar y toda la solución sólida será de composición uniforme α (70A-30B), que es la composición general de la aleación. En la microestructura de una aleación de solución sólida enfriada lentamente sólo hay granos y límites de grano. No hay prueba de que exista alguna diferencia en la composición química en el interior de los granos, indicando que la difusión ha homogeneizado los granos. La difusión es el movimiento de los átomos, en el estado sólido, en forma individual al azar. La difusión en soluciones sólidas sustitucionales puede tener lugar mediante tres métodos:

a) el mecanismo de vacantes (fig. 1.14); b) el mecanismo intersticial (fig. 1.15) y c) el mecanismo de intercambio de átomos (fig. 1.16).

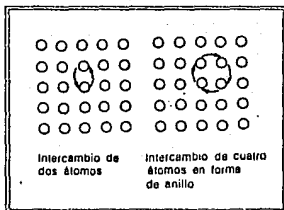
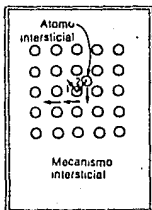


Figura 1.14

Figura 1.15

Figura 1.16

Métodos de difusión.

Como habíamos visto anteriormente, las vacantes y los sitios intersticiales eran una característica normal de una estructura cristalina. Estas imperfecciones facilitan grandemente la difusión, o el salto de átomos adyacentes. En la vacante cualquier átomo cae dentro de ella y se dice que la vacante ha caminado hacia el espacio atómico que ocupaba el átomo previo. En el intersticial un átomo, en posición normal se mueve a un espacio intersticial y el lugar desocupado lo ocupa el átomo intersticial. También se puede dar el caso de que sea un intercambio directo entre dos átomos adyacentes, o por intercambio de un anillo de cuatro átomos, sin embargo esto sólo sucede en condiciones especiales. La experiencia ha demostrado que el uso de vacantes es el método principal de difusión en metales. La rapidez de difusión es mucho más grande en una aleación enfriada con rapidez que para la misma aleación enfriada lentamente.

1.3 Endurecimiento de los aceros.

1.3.1 Hierro y acero.

El hierro o fierro no es comercialmente un metal de alta pureza, sino que contiene otros elementos químicos que tienen un gran efecto sobre sus propiedades físicas y mecánicas. La magnitud y distribución de estos elementos dependen del método de fabricación.

Los metales ferrosos son aleaciones del hierro con el carbono y otros elementos, tales como el silicio, manganeso, fósforo, azufre y otros. Según el contenido de carbono, las aleaciones de hierro y carbono se dividen en dos grandes grupos, el hierro fundido y el acero. Se le llama acero a una aleación que contiene hasta el 2% de carbono; y hierro fundido a la que tiene un contenido de carbono mayor al 2%. En la práctica, rara vez el contenido del carbono en el acero sobrepasa el 1.4% mientras que en el hierro fundido se encuentra en los límites de 2.5 a 4.5% con un máximo de 6%. El hierro fundido se obtiene en los altos hornos; y el acero, a base del arrabio.

a) El hierro: Como materias primas para obtener hierro fundido se emplean minerales de hierro, combustibles y fundentes.

Los minerales de hierro son compuestos naturales que contienen óxido de hierro y ganga (contiene sílice SiO_2 , alúmina Al_2O_3 , óxido de calcio CaO y óxido de magnesio MgO).

La utilidad del mineral de hierro para la fusión se determina por el contenido de hierro, por la composición de

la ganga y la presencia de impurezas perjudiciales como el azufre, fósforo, arsénico y otras.

Entre los minerales de hierro industriales tenemos:

+ La magnetita o imán natural contiene el hierro en forma de óxido ferroso férrico (Fe_3O_4). El contenido de hierro en estos minerales oscila, en la práctica, del 45 al 70%. El mineral tiene propiedades magnéticas, gran densidad y color negro;

+ La hematita u oligisto es el óxido de hierro deshidratado (Fe_2O_3). Este mineral contiene del 50 al 60% de hierro metalizable y es de color rojizo negruzco. Se reduce con mayor facilidad que el imán natural;

+ La limonita es el óxido de hierro hidratado ($2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$). El mineral contiene del 20 al 60% de hierro y tiene color pardo con diferentes matices. Se reduce bien, lo que hace económica la obtención del hierro colado incluso con minerales pobres;

+ La siderita o hierro espático es la combinación del ácido carbónico con el hierro ($FeCO_3$) (carbonato de hierro). El contenido de hierro en este mineral oscila, en la práctica, entre 30 y 42%. El mineral tiene un color gris con matices de amarillo. La siderita se reduce muy bien.

Las formas comerciales más importantes del hierro son:

+ Arrabio o lingote de primera fusión. Es el producto de los altos hornos que resulta de la reducción del mineral de hierro.

+ Fundición. Es una aleación de hierro que contiene tanto carbono que, después de moldeada, no es apreciablemente maleable a ninguna temperatura.

+ Fundición blanca. Contiene carbono en forma combinada. La presencia de la cementita o carburo de hierro (Fe_3C) hace que este metal sea duro y frágil, y la ausencia de grafito da a su fractura un color blanco.

+ Fundición maleable. Es una aleación en la que todo el carbono combinado de una fundición blanca especial se ha transformado en carbono libre o de temple por un tratamiento térmico adecuado.

+ Fundición gris. Es una fundición de hierro que al ser fundida o vaciada no tiene carbono combinado (en forma de cementita, Fe_3C). El carbono se precipita en forma de grafito. Su fractura es gris y es de grano pequeño.

+ Hierro nodular (dúctil). Se produce por la adición de aleaciones de magnesio o cerio al hierro fundido. Estas adiciones hacen que el grafito forme pequeños nódulos, dando como resultado un hierro dúctil con mayor resistencia mecánica.

+ Hierro en lingotes o hierro Siemens. Es el que se obtiene en esta clase de hornos, con muy bajo contenido de carbono, manganeso y otras impurezas.

+ Hierro dulce o forjado. Es un material ferroso formado por la adición de una masa en solidificación de partículas pastosas de hierro metálico altamente refinado con las cuales se incorpora, sin fusión subsecuente, una cantidad pequeñísima y uniformemente distribuida de escoria.

b) El acero: Como materia prima fundamental para la producción del acero se emplea el arrabio y la chatarra de metales ferrosos. El acero, en comparación con la fundición, contiene una cantidad considerablemente menor de carbono e impurezas, debido a la oxidación de éstas durante su elaboración. Los métodos actuales de obtención del acero son: 1) el de convertidores, 2) el de producción del acero en los hornos martin y 3) la producción del acero en los hornos eléctricos.

Las formas comerciales más importantes del acero son:

+ Acero. Es una aleación maleable de hierro y carbono que contiene generalmente ciertas cantidades de manganeso.

+ Acero al carbono (Por lo general se utilizan indistintamente los términos carbón y carbono para referirse al elemento aleado al hierro, así, acero al carbón y acero al carbono significa lo mismo). Es el acero que debe principalmente sus propiedades distintivas al carbono que contiene.

* Acero aleado, o especial. Es un acero que debe principalmente sus propiedades distintivas a algún elemento o elementos distintos del carbono, o juntamente a tales elementos y al carbono. Algunos de los aceros aleados contienen necesariamente un porcentaje importante de carbono, aún hasta 1.25%. No se ha llegado a un acuerdo respecto a dónde se ha de trazar la línea divisoria entre los aceros aleados y los aceros al carbono.

+ Acero básico al oxígeno, acero de hogar abierto y acero de horno eléctrico. Son aceros que se obtienen en los hornos de oxígeno, de hogar abierto y eléctricos, respectivamente, sin importar el contenido de carbono.

La clasificación del acero se utiliza para indicar la composición química de un acero en particular. La

clasificación puede variar desde el hierro casi puro hasta un material de constitución compleja.

Las listas de aceros estándar diseñadas para satisfacer las necesidades de fabricantes y usuarios de productos de acero en un programa de simplificación destinado a lograr mayor eficiencia son publicadas por la American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE). La aceptación general y el uso de aceros estándar desde su comienzo en 1941 han demostrado que estos aceros, en muchos casos, reemplazan exitosamente a la mayoría de los aceros de composición especializada que se utilizaban anteriormente. La lista es alterada de vez en cuando para acomodar aceros que demuestren su utilidad y para prever los cambios de la industria.

Esta clasificación es mediante un sistema numérico, de cuatro o cinco dígitos. El primero de ellos indica el tipo a que pertenece el acero. De este modo, 1 indica un acero al carbono; 2 un acero al níquel, 3 un acero al níquel-cromo, etc. En el caso del acero de aleación simple, el segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento predominante en la aleación. Los dos o tres últimos dígitos generalmente indican el contenido de carbono medio dividido entre 100. Así, el símbolo 1045 indica un acero simple al carbono, no aleado y con un rango de 0.43 a 0.50% de carbono.

Además de los números, las especificaciones AISI pueden incluir un prefijo literal para indicar el proceso de fabricación empleado en la producción del acero. En 1975 la Unified Numbering System (UNS) fue creada por la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la SAE. La UNS utiliza una letra y cinco dígitos. La letra G indica un acero estándar al carbono y la H indica la templabilidad promedio del acero. Los cuatro primeros dígitos corresponden a los utilizados por AISI, ASTM o SAE y el último indica que se le agregó un elemento como plomo o boro. Y finalmente, la SAE utiliza las mismas designaciones numéricas de cuatro dígitos que la AISI, pero eliminando todos los prefijos literales.

Los números básicos para la serie de cuatro dígitos de los diversos grados de aceros al carbono y de aleación con porcentajes aproximados de elementos de identificación aparecen en la tabla 1.

En la tabla 2 aparecen algunas especificaciones de acero estándar representativo para aceros al carbono y aceros de maquinado libre, así como para aceros de aleación en la tabla 3.

10xx	Aceros al carbono: básicos de hogar abierto y bess.
11xx	Aceros al carbono: básicos de hogar abierto y bessemer. Azufre alto, fósforo bajo.
12xx	Aceros al carbono: básicos de hogar abierto. Azufre alto, fósforo alto.
13xx	Manganeso 1.75.
25xx	Niquel 5.00 (serie eliminada en 1959).
31xx	Niquel 1.25 y cromo 0.60 (serie eliminada en 1964).
40xx	Molibdeno 0.20 ó 0.25.
41xx	Cromo 0.50, 0.80 ó 0.95 y molibdeno 0.12 y 0.20.
43xx	Niquel 1.83, cromo 0.50 ó 0.80 y molibdeno 0.25.
44xx	Molibdeno 0.53.
46xx	Niquel 0.85 ó 1.83 y molibdeno 0.20 ó 0.25.
47xx	Niquel 1.05, cromo 0.45 y molibdeno 0.20 ó 0.35.
48xx	Niquel 3.50 y molibdeno 0.25.
50xx	Cromo 0.40.
51xx	Cromo 0.80, 0.88, 0.93, 0.95 ó 1.00.
5xxxx	Carbono 1.04 y cromo 1.03 ó 1.45.
61xx	Cromo 0.60 ó 0.95 y vanadio 0.13 ó 0.15 mín.
86xx	Niquel 0.55, cromo 0.50 y molibdeno 0.20.
87xx	Niquel 0.55, cromo 0.50 y molibdeno 0.25.
88xx	Niquel 0.55, cromo 0.50 y molibdeno 0.35.
92xx	Silicio 2.00.
93xx	Niquel 3.25, cromo 1.20 y molibdeno 0.12.
98xx	Niquel 1.00, cromo 0.80 y molibdeno 0.25.
94Bxx	Niquel 0.45, cromo 0.40, molibdeno 0.12 y boro 0.0005.

Tabla 1 Números básicos de asignación del acero.

Algunas especificaciones de acero estándar representativo

NOM. AISI*	% C	% Mn	% P max	% S max	NOM. SAE
ACEROS AL CARBONO					
C1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.05	1010
C1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.04	0.05	1015
C1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04	0.05	1020
C1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.04	0.05	1025
C1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.04	0.05	1030
C1035	0.32-0.39	0.60-0.90	0.04	0.05	1035
C1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.04	0.05	1040
C1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05	1045
C1050	0.48-0.55	0.60-0.90	0.04	0.05	1050
C1055	0.50-0.60	0.60-0.90	0.04	0.05	1055
C1060	0.55-0.65	0.60-0.90	0.04	0.05	1060
C1065	0.60-0.70	0.60-0.90	0.04	0.05	1065
C1070	0.65-0.75	0.60-0.90	0.04	0.05	1070
C1074	0.70-0.80	0.50-0.50	0.04	0.05	1074
C1080	0.75-0.88	0.60-0.90	0.04	0.05	1080
C1085	0.80-0.93	0.70-1.00	0.04	0.05	1085
C1090	0.85-0.98	0.60-0.90	0.04	0.05	1090
C1095	0.90-1.03	0.30-0.50	0.04	0.05	1095
ACEROS DE MAQUINADO LIBRE					
B1112	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.16-0.23	1112
B1113	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33	1113
C1110	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.08-0.13	
C1113	0.10-0.16	1.00-1.30	0.04	0.24-0.33	
C1116	0.13-0.18	0.60-0.90	0.04	0.08-0.13	1115
C1120	0.18-0.23	0.70-1.00	0.04	0.08-0.13	1120
C1137	0.32-0.39	1.35-1.65	0.04	0.08-0.13	1137
C1141	0.37-0.45	1.35-1.65	0.04	0.08-0.13	1141
C1212	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.16-0.23	1112
C1213	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33	1113
C12L14†	0.15 max	0.80-1.20	0.04-0.09	0.25-0.35	12L14

* Letras prefijo AISI: B = acero al carbono bessemer ácido; C = acero al carbono básico de hogar abierto.
 † Plomo, de 0.15 a 0.35%.

Tabla 2 Especificaciones de acero estándar.

Algunas especificaciones de acero aleado representativo

NUM. AISI	% C	% Mn	% Ni	% Cr	% Mo	% V	NUM. SAE	TIPO
1330	0.28-0.33	1.60-1.90					1330	Aceros al Mn
1340	0.38-0.43	1.60-1.90					1340	
2317	0.15-0.20	0.40-0.60	3.25-3.75	2315	Aceros al 3% de Ni
2330	0.28-0.33	0.60-0.80	3.25-3.75	...	...	...	2330
E2512*	0.09-0.14	0.45-0.60	4.75-5.25	Aceros al 5% de Ni
2515	0.12-0.17	0.40-0.60	4.75-5.25	...	...	...	2515
3115	0.13-0.18	0.40-0.60	1.10-1.40	0.55-0.75	3115	Aceros al Ni-Cr
3130	0.28-0.33	0.60-0.80	1.10-1.40	0.55-0.75	...	...	3130
3140	0.38-0.43	0.70-0.90	1.10-1.40	0.55-0.75	...	...	3140
E3310	0.08-0.13	0.45-0.60	3.85-3.75	1.40-1.75	...	...	3310
4023	0.20-0.25	0.70-0.90			0.20-0.30	...	4023	Aceros al Mo
4037	0.35-0.40	0.70-0.90			0.20-0.30	...	4037	
4419	0.18-0.23	0.45-0.65			0.45-0.60	...	4419	
4118	0.18-0.23	0.70-0.90		0.40-0.60	0.08-0.15	...	4118	Aceros al Cr-Mo
4130	0.28-0.33	0.40-0.60		0.80-1.10	0.15-0.25	...	4130	
4140	0.38-0.43	0.75-1.00		0.80-1.10	0.15-0.25	...	4140	
4150	0.48-0.53	0.75-1.00		0.80-1.10	0.15-0.25	...	4150	
4320	0.17-0.22	0.45-0.60	1.85-2.00	0.40-0.60	0.20-0.30	...	4320	Aceros al Ni-Cr Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30	...	4340	
4720	0.17-0.22	0.50-0.70	0.90-1.20	0.35-0.55	0.15-0.25	...	4720	
4620	0.17-0.22	0.45-0.60	1.65-2.00		0.20-0.30	...	4620	Aceros al Ni-Mo
4626	0.24-0.29	0.45-0.65	0.70-1.00		0.15-0.25	...	4626	
4620	0.18-0.23	0.50-0.70	3.25-3.75		0.20-0.30	...	4620	
5120	0.17-0.22	0.70-0.90		0.70-0.90	5120	Aceros al Cr
5130	0.28-0.33	0.70-0.90		0.80-1.10	...	...	5130
5140	0.38-0.43	0.70-0.90		0.70-0.90	...	...	5140
5150	0.48-0.53	0.70-0.90		0.70-0.90	...	...	5150
E52100	0.95-1.10	0.25-0.45		1.30-1.60	...	...	52100
8118	0.16-0.21	0.50-0.70		0.50-0.70	...	0.12	8118	Aceros al Cr-V
8150	0.48-0.53	0.70-0.90		0.80-0.10	...	0.15	8150	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	...	8620	Aceros al bajo Ni-Cr-Mo
8630	0.28-0.33	0.70-0.90	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	...	8630	
8640	0.38-0.43	0.75-1.00	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	...	8640	
8720	0.18-0.23	0.70-0.90	0.40-0.70	0.40-0.60	0.20-0.30	...	8720	Acero al Si
8740	0.38-0.43	0.75-1.00	0.40-0.70	0.40-0.60	0.20-0.30	...	8740	
8822	0.20-0.25	0.75-1.00	0.40-0.70	0.40-0.60	0.20-0.40	...	8822	
9260	0.58-0.84	0.75-1.00	Si 1.80-2.20				9260	
E9310	0.08-0.13	0.45-0.65	3.00-3.50	1.00-1.40	0.08-0.15	...	9310	Aceros al alto Ni-Cr-Mo
9840	0.38-0.43	0.70-0.90	0.85-1.15	0.70-0.90	0.20-0.30	...	9840	
9850	0.48-0.53	0.70-0.90	0.85-1.15	0.70-0.70	0.20-0.30	...	9850	
94B30	0.48-0.53	0.70-0.90	0.85-1.15	0.70-0.90	0.20-0.30	...	94B30	Acero al boro

* E = proceso básico de horno eléctrico. Todos los demás se han manufacturado normalmente mediante el proceso básico de hogar abierto.

Tabla 3. Especificaciones de acero aleado.

Los elementos que se le agregan al acero al carbono influyen en la fabricación de éste y en sus propiedades. Los efectos de cualquier elemento añadido dependen de las cantidades de otros elementos presentes.

Algunos de los elementos que más comúnmente se encuentran aleados son:

+ Carbono. Es el principal elemento en el acero. Conforme el contenido de carbono se incrementa, también lo hace la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y su dureza.

+ Manganeso. El manganeso contribuye al endurecimiento y la resistencia, pero a una escala menor que el carbono. Su función es la de contraponerse a los malos efectos del azufre. El manganeso tiende a incrementar la cantidad de penetración del carbono durante la carburización e incrementa la templabilidad del acero. Está presente en todos los aceros comerciales al carbono de un 0.03 a un 1.00%.

+ Fósforo. Este elemento incrementa la resistencia y la dureza de los aceros al carbono, pero reduce la ductibilidad y la resistencia al impacto, principalmente a los aceros de alto carbono que son enfriados bruscamente, o sea, templados. El contenido de fósforo se mantiene por debajo del 0.04%.

+ Azufre. Este metaloide se combina con el hierro para formar sulfuro de hierro (FeS), el cual forma, a su vez, una aleación eutéctica de bajo punto de fusión, con hierro que tiende a concentrarse en las fronteras del grano. Cuando el acero se forja o lamina a altas temperaturas, se hace frágil debido a la fusión del eutéctico sulfuro de hierro que destruye la cohesión de los granos, permitiendo que se desarrollen grietas. Como en presencia del manganeso, el azufre se combina con éste y sale en la escoria, se recomienda que el contenido de manganeso sea de dos a ocho veces la cantidad del azufre. Mejora mucho la maquinabilidad del acero. El azufre se mantiene por debajo del 0.05%.

+ Silicio. Este metaloide se disuelve en ferrita, aumentando la resistencia del acero sin disminuir en mucho la ductibilidad. Promueve la desoxidación del acero líquido. Su contenido en aceros comerciales es entre 0.05 y 0.3%.

+ Aluminio. Este es otro principal desoxidador. El aluminio se combina con el nitrógeno para minimizar el crecimiento del grano austenítico y para eliminar o minimizar los efectos de las tensiones. Esta combinación también ayuda a controlar la deformación plástica.

+ Otros elementos. Las características metalúrgicas de un acero también son incluidas por la adición de varios elementos que comúnmente no son especificados. Algunos de estos elementos incluyen: cobre, boro, plomo, nitrógeno, selenio, telurio, bismuto y calcio. El cobre se le añade para elevar la resistencia a la corrosión atmosférica, sin embargo, el cobre no ayuda en el comportamiento del trabajo en caliente. El boro aumenta la templabilidad del acero, la maquinabilidad y la formabilidad. El plomo, nitrógeno, selenio, telurio y bismuto se pueden agregar para aumentar la maquinabilidad del acero al carbono.

1.3.2 Principios de los tratamientos térmicos.

Se le llama tratamiento térmico a una operación o combinación de operaciones, que comprende el calentamiento y enfriamiento de un metal o de una aleación en estado sólido, que se efectúa para obtener ciertas condiciones o propiedades convenientes.

La temperatura a que tienen lugar los cambios alotrópicos en el hierro está influida por elementos de aleación, de los cuales el más importante es el carbono. La fig. 1.17 muestra la porción de interés del sistema hierro-carbono. Esta es la parte entre hierro puro y un compuesto intersticial, carburo de hierro, Fe_3C , que contiene 6.67% de carbono por peso; por tanto, esta porción se llamará diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro, y es de gran utilidad en la utilización de los tratamientos térmicos.

En términos generales, las soluciones sólidas se representan con letras griegas; sin embargo, es práctica común dar nombres especiales a la mayoría de las estructuras que aparecen en el diagrama, a saber:

+ Cementita o carburo de hierro, Fe_3C . Es un compuesto intersticial típicamente duro y frágil de baja resistencia a la tensión (aprox.: 5 000 lb/pg²), pero de alta resistencia a la compresión. Es la estructura más dura que aparece en el diagrama. Su estructura cristalina es ortorrómbica.

+ Austenita. Es el nombre dado a la solución sólida γ . Es una solución sólida intersticial de carbono disuelto en hierro γ (f.c.c.). Generalmente no es estable a la temperatura ambiente. Bajo ciertas condiciones, es posible obtener austenita a temperatura ambiente.

+ Ledeburita. Es la mezcla eutéctica de austenita y cementita; contiene 4.3% de carbono y se forma a 1130 °C (2065 °F).

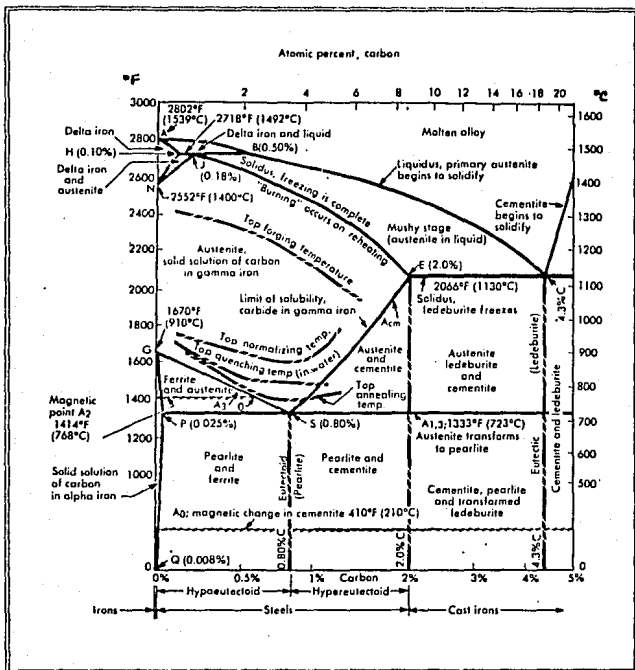


Figura 1.17 Diagrama Hierro-Carburo de hierro.

+ Ferrita. Es el nombre dado a la solución sólida α . Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbono disuelto en hierro α (b.c.c.). Es la estructura más suave que aparece en el diagrama.

+ Perlita. Es la mezcla eutectoide que contiene 0.80% de carbono y se forma a 723 °C (1333 °F) a un enfriamiento lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita. Tiene forma de huella dactilar. La base o matriz ferrítica blanca que forma la mayoría de la mezcla eutectoide contiene delgadas placas de cementita.

	Resistencia tensil lb/pg ²	Elongación en 2 pgs.	Dureza
Austenita	150 000	10 %	Rc 40
Ferrita	40 000	40 %	RB 90
Perlita	120 000	20 %	Rc 20

Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita.

En el endurecimiento de metales por tratamiento térmico se realizan tres operaciones fundamentales: austenización, ecualizado y templado.

1.3.2.1 Austenización.

Cuando un acero es elevado a una cierta temperatura y después se enfría, su estructura cambia en ciertas etapas predecibles que se deben de reconocer para cada aleación.

Inicialmente, el acero que no ha tenido un tratamiento térmico previo está compuesto de una mezcla de ferrita y carburo, a menudo presente en una microestructura laminar llamada perlita.

Cuando se calienta un acero con la estructura ferrita-perlita, alcanza una temperatura a la cual los carburos en la perlita laminar comienzan a disolverse dentro del hierro. Conforme se eleva la temperatura, los carburos se van disolviendo hasta que el acero alcanza un punto en el cual todos los carburos se encuentran disueltos y el acero consiste completamente en una solución sólida de carbono en hierro llamada austenita. La temperatura a la cual la perlita comienza a transformarse en austenita es identificada como la temperatura crítica inferior, Ac_1 , la temperatura a la cual el acero pasa a estar completamente compuesto de austenita se le llama la temperatura crítica superior, Ac_3 , y la temperatura que oscila entre ellas se le llama rango crítico o rango de transformación para la aleación particular.

La temperatura crítica inferior es mostrada por la línea A_1 en el diagrama hierro-carbono (fig. 1.17). En la práctica, esta temperatura varía ligeramente dependiendo si la perlita está comenzando a transformarse en austenita o la austenita ha completado la transformación a perlita, en otras palabras, si el acero está calentándose o enfriándose. Esta diferencia es designada por las letras Ac_1 para

calentamiento y A_1 para enfriamiento. Estas temperaturas varían según varíe la composición química del acero.

La temperatura crítica superior varía en la misma forma que lo indica la línea A_3 en el diagrama de equilibrio, y es conocida como A_{c3} para cuando es calentamiento y A_{r3} para cuando es enfriamiento. También es designada como A_{cm} cuando el contenido de carbono del acero es del 0.80%. La temperatura a la cual el acero se convierte completamente a austenítico o a la cual la perlita sólo se ha empezado a formar, es parcialmente dependiente de la aleación del acero, pero principalmente, de su contenido de carbono.

Como se muestra en el diagrama, un simple acero al carbono con 0.80% de carbono tendrá la temperatura inferior para la transformación completa porque, con esta composición, la temperatura crítica superior A_3 es la misma que la temperatura crítica inferior A_1 . Esta composición del 0.80% de carbono es llamada acero eutectoide; éste es 100% perlita abajo de la temperatura de transformación y está caracterizado por el cambio completo de perlita a austenita (y de nuevo a perlita) a una sola temperatura.

La reacción eutectoide es una reacción común en el estado sólido, muy semejante a la reacción eutéctica, pero no incluye al líquido. En este caso, una fase sólida se transforma, al enfriarse, en dos fases sólidas nuevas.

La mezcla eutectoide resultante es extremadamente fina, como la mezcla eutéctica. Bajo el microscopio, ambas mezclas aparecen generalmente iguales y no es posible determinar en forma microscópica si la mezcla resultó ser de una reacción eutéctica o de una reacción eutectoide.

Así como el acero con 0.80% de carbono se le llama eutectoide, a los aceros que contienen menos de este 0.80% de carbono son llamados aceros hipoeutectoides y a los que contienen más del 0.80% se les llama aceros hipereutectoides:

+ Aceros hipoeutectoides. Cuando se está aplicando un calentamiento, la perlita en dichos aceros comienza a transformarse en austenita en A_1 ; pero debido al exceso de ferrita (hierro α) en la composición, la transformación no se completa sino hasta que se alcanza la temperatura A_3 . Manteniendo la temperatura arriba de la crítica superior se incrementa el porcentaje de carbono y otros elementos aleados que entran en solución, pero esto también incrementa el tamaño del grano austenítico. No obstante que los aceros de granulado grande endurecen a una profundidad mayor, los granos grandes disminuyen la resistencia a la fatiga y a la ruptura de los aceros. Si el acero se mantiene abajo de A_3 , parte de la ferrita no entrará en solución. La ferrita no endurece cuando se enfría y el acero no puede alcanzar el

máximo endurecimiento, debido a que la ferrita no disuelta contiene sólo una mínima cantidad de carbono.

+ Aceros hipereutectoides. Con los aceros hipereutectoides, alcanzar la solución total no es un gran problema, ya que los materiales no disueltos son cementita (carburos de hierro y otros carburos), la cual es más dura que la ferrita. Sin embargo, para obtener el máximo de profundidad en el endurecimiento, el acero se debe de mantener arriba de la temperatura crítica superior (Acm). La inclinación de la línea Acm significa que, para aceros con 1.00% de carbono o más, habrá un rápido crecimiento de granos grandes. Por lo tanto, generalmente se escoge una temperatura que se encuentre entre la crítica superior y la crítica inferior a fin de eliminar algunos carburos para retardar el crecimiento del grano en la austenita y para servir como base en la cual los cambios de fase puedan iniciar durante el enfriamiento.

1.3.2.2 Ecuilizado.

El porcentaje de calentamiento usualmente no es significativo, a no ser que el acero inicialmente sea sometido a un esfuerzo grande, para lo cual se tendrá que calentar lentamente. Durante la producción, cuando la temperatura de un horno no se puede alterar porque otras partes se están procesando al mismo tiempo o porque la productividad declinaría, muchas veces es necesario el precalentamiento en otro horno.

Para el ecualizado (la operación que mantiene al acero a la temperatura crítica superior, Ac3, hasta que todas las secciones son uniformemente calentadas), un tiempo adecuado de permanencia generalmente es alrededor de $\frac{1}{2}$ o 1 hora por cada 25 mm. (1 pg.) del grosor de la sección.

1.3.2.3 Templado.

El templado o porcentaje de enfriamiento, es importante en operaciones de tratamientos térmicos porque de ello depende la estructura y las propiedades del metal. La presente discusión está limitada a las transformaciones en la microestructura durante el enfriamiento.

Durante el enfriamiento se pueden distinguir tres tipos de transformaciones que sufre la microestructura, que son: a) la formación de perlita, b) la formación de bainita y c) la formación de martensita.

El periodo de tiempo P_1 no es suficientemente largo para que la austenita comience a descomponerse en ferrita y cementita: en consecuencia, enfriando a temperatura ambiente, la primera oblea mostrará una estructura de 100% martensita. El periodo de tiempo P_2 es suficientemente largo para que parte de la austenita se transforme en perlita, y periodos de tiempo P_3 y P_4 muestran un incremento en la cantidad de perlita, mientras P_5 es suficientemente largo para transformar toda la austenita en perlita. Este proceso depende de la nucleación y el crecimiento, con los núcleos de perlita formándose en las fronteras de los granos de la austenita. Como la temperatura T_1 es más baja, la perlita obtiene textura más fina cada vez.

Repetiendo este experimento a varios niveles de temperatura da como resultado una acumulación de datos para el comienzo y el final de la descomposición de la austenita

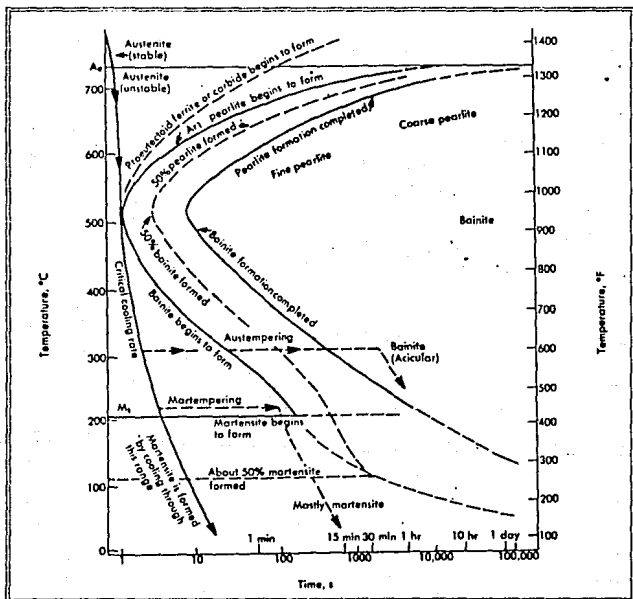


figura 1.19 Transformación Tiempo-Temperatura.

a dichas temperaturas. Los datos son graficados como una transformación tiempo-temperatura en un diagrama llamado TTT o de curva S. En el diagrama TTT (fig. 1.19) se grafican aceros al carbono e incluye la línea de proeutectoides para la ferrita y la cementita, la cual se aplica para aceros con más o con menos del 0.80% de carbono, respectivamente. Dichos diagramas TTT son válidos para varios aceros y son usados para predecir la formación de estructuras y propiedades mecánicas obtenidas por el tratamiento térmico. Es importante hacer notar que los diagramas TTT son trazados de los datos de la transformación isotérmica.

Cada acero tiene un rango de temperatura en el cual la transformación sucede más rápidamente. A menudo a este rango, en el diagrama TTT, se le llama la nariz de la curva TTT. Por encima o por debajo de este rango de rápida transformación se requiere de un mayor tiempo para las transformaciones. En el endurecimiento de aceros es esencial enfriar en una proporción tal que sea evitada la transformación a una temperatura más alta.

Enfriando bruscamente a una temperatura por encima que la de la nariz de la curva da como resultado (después de completar la transformación y el subsecuente enfriamiento a temperatura ambiente) una estructura que es relativamente suave comparada con la martensita. Sin embargo, conforme T_f decrezca en la nariz de la curva, la estructura perlítica formada se convierte en más fina y por lo tanto más resistente.

+ Formación de bainita. La línea del proeutectoide se junta con la línea del principio de la transformación de la perlita aproximadamente a $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1000\text{ }^{\circ}\text{F}$). Esto significa que cuando la transformación se complete a esta temperatura estará presente solo perlita, sin tomar en cuenta el contenido de carbono en el acero. La transformación de austenita por descomposición isotérmica por debajo de la rodilla del diagrama, $540\text{ }^{\circ}\text{C}$, tiene como resultado la formación de bainita, una microestructura que contiene ferrita y carburo y que aparece diferente a la perlita. Se dice que la bainita es acircular y parecida a la perlita; el grado de finura de la estructura de la bainita se incrementa conforme va descendiendo desde los $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura de formación. Se piensa que la perlita tiene su nucleación a partir de la cementita y la bainita a partir de la ferrita. Como en la perlita, conforme la finura de la estructura de la bainita se incrementa, también lo hace su resistencia.

+ Formación de martensita. Debido a que la temperatura del baño que se utilizó para el enfriamiento brusco es más baja, se alcanza un nivel de temperatura al cual no hay tiempo suficiente para que el carbono se difunda de la solución y, aunque tiene lugar algún movimiento de los átomos de hierro, la estructura no puede llegar a ser b.c.c.

Entonces la austenita experimenta una transformación espontánea a martensita, que es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una fase sencilla con estructura b.c.c. La transición se verifica sólo durante el enfriamiento y cesa si éste se interrumpe; por tanto, la transformación depende sólo de la disminución en temperatura y es independiente del tiempo. Una transformación de este tipo se llama a térmica, en contraste con la que ocurrirá a temperatura constante (isotérmica). A la temperatura a la cual la martensita comienza a formarse a partir de la austenita se le llama el punto Ms, y la temperatura a la cual la austenita se ha transformado totalmente en martensita es llamado punto Mf. La temperatura Ms depende de la composición del acero y se puede estimar en grados Fahrenheit con la siguiente fórmula:

$$M_s = 1000 - (650 \times \%C) - (70 \times \%Mn) - (35 \times \%Ni) - (70 \times \%Cr) - (50 \times \%Mo)$$

La temperatura Mf no se puede determinar de la composición del acero pero restando 385 °F del cálculo de Ms tendremos un estimado para este punto.

La transformación de la austenita en martensita no depende de la difusión del carbono, como en el caso de la formación de la perlita y la bainita. En su lugar, se alcanza un nivel de temperatura cuando la estructura f.c.c. de la austenita se transforma a un tipo más estable de estructura, la b.c.c. de la martensita, en la cual los átomos de carbono son atrapados en sus sitios intersticiales. En la transformación, los movimientos atómicos son pequeños y coordinados de una manera que podemos describir como un proceso de esfuerzo cortante.

El principal propósito del endurecimiento de un acero es producir una estructura martensítica. En consecuencia, es necesario emplear niveles suficientemente rápidos de enfriamiento para prevenir al acero de una demora en los niveles más altos de temperatura en donde la perlita y/o la bainita se formarían. Los elementos aleados desplazan al diagrama TTT hacia la derecha, indicando tiempos más largos para el comienzo de las transformaciones y permitiendo niveles de enfriamiento más lentos para la formación del 100% de martensita.

La propiedad más significativa de la martensita es su potencial de dureza muy grande. Aunque la martensita es siempre más dura que la austenita de la cual se forma, sólo son posibles durezas extremas en aceros que contienen suficiente carbono.

Como se muestra en la fig. 1.20, se puede alcanzar un máximo endurecimiento de aproximadamente Rc65, bajo condiciones apropiadas de enfriamiento, cuando el acero contiene cerca del 0.55% de carbono. Más allá de ese punto, la curva se endereza. La nivelación se debe a la mayor tendencia de los aceros a tener carbono para retener austenita. Se cree que la alta dureza de la martensita es resultado de las severas distorsiones reticulares producidas por su formación, ya que la cantidad de carbono presente suele ser mayor que la que se puede mantener en solución sólida.

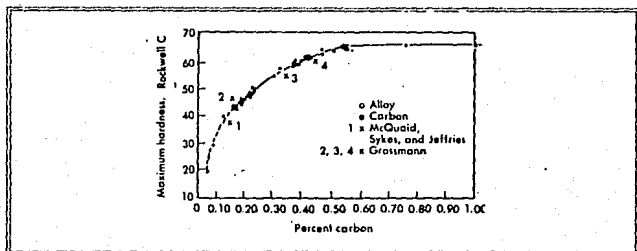


Figura 1.20 Máximo de dureza.

1.4 Templabilidad.

La templabilidad es la habilidad de los metales ferrosos para endurecerse. Es ésta la propiedad que determina la profundidad y distribución del endurecido o el tamaño de la pieza que puede endurecerse en condiciones de enfriamiento brusco. Esto no se refiere al endurecimiento máximo que puede obtenerse de un acero dado.

La templabilidad comúnmente se mide como la distancia abajo de una superficie enfriada bruscamente donde el metal tiene una dureza específica o un porcentaje específico de martensita en su microestructura. Los metales que tienen baja templabilidad requieren rangos de enfriamiento más rápidos y sólo se pueden endurecer relativamente a poca profundidad. Los que tienen alta templabilidad se pueden endurecer más profundamente o endurecer todo el material por completo con enfriamiento más lento.

Un hierro sin aleaciones es suave y dúctil y no puede ser endurecido por tratamiento térmico. El máximo endurecimiento por enfriamiento brusco que alcanza un acero depende de la cantidad de carbono y la cantidad de enfriamiento. A más

carbono presente en el acero, será posible mayor endurecimiento.

La templabilidad, sin embargo, es fuertemente dependiente de la naturaleza y el porcentaje de elementos en aleación, al igual que el carbono, el tamaño del grano de la austenita, el tiempo y la temperatura durante la austenización y su estructura.

Los aceros no aleados de bajo carbono (con menos del 0.02% de carbono) no pueden ser tratados térmicamente. Las excepciones existen cuando el carbono se adiciona a la superficie y se le llama endurecimiento superficial. Los aceros no aleados de mediano carbono (con 0.30 a 0.60% de carbono) y los aceros de alto carbono (que contienen más de 0.60% de carbono) generalmente necesitan grandes cantidades de enfriamiento rápido para producir propiedades mecánicas óptimas. La adición de pequeñas cantidades de boro (0.0005 - 0.003%) a aceros al carbono, especialmente aquellos que tienen rangos de carbono de 0.20 a 0.40%, incrementa su templabilidad.

Todos los elementos de aleación, excepto el cobalto y el vanadio, aumentan la templabilidad de los aceros. Los aceros aleados se transforman más lentamente de la austenita que los no aleados, así que permiten incrementos de endurecimiento con enfriamientos bruscos más lentos.

La templabilidad depende de muchos factores, incluyendo el material específico a ser tratado y su tamaño, diseño y aplicación. Para piezas altamente tensionadas se recomienda un revenido inmediatamente después del endurecimiento.

Para piezas con tensiones en la superficie o cerca de ella o para las que requieren resistencia al uso o al impacto, se recomienda el endurecimiento superficial.

Muchos aceros aleados tienen una relación prácticamente lineal entre la dureza y la resistencia a la tensión.

Muchos problemas pueden ocurrir en el endurecimiento, la mayoría de ellos son el resultado de especificaciones inapropiadas de tratamiento térmico o de una deficiente aplicación del mismo. Algunos de los problemas más comunes son debido a lo siguiente: a) la descarburización, b) las hojeaduras, c) las fracturas por enfriamiento, d) los esfuerzos residuales, e) la retención de la austenita y f) los cambios dimensionales.

+ Descarburización. Las piezas de acero son descarburizadas con frecuencia en algún punto durante el calentamiento para operaciones de formado, como rolado, extrusión o forja. La pérdida de carbono superficial puede impedir el endurecimiento total de las piezas terminadas.

Esta situación requerirá que se esmerile la superficie suave antes del tratamiento térmico.

Esta descarburización puede ser eliminada usando hornos con una atmósfera protectora o carburizante.

+ Hojeaduras. La formación de capas de oxidación, llamadas hojeaduras, es otro resultado indeseable del endurecimiento. Como condición siempre requiere de un maquinado, esmerilado o pulido para remover esas capas. Esto se puede minimizar usando hornos con atmósfera protectora.

+ Fracturas por enfriamiento brusco. La formación de grietas durante el enfriamiento de aceros tratados es un problema mayor. Conforme el contenido de carbono aumenta, también lo hace la tendencia a agrietarse. A más altas temperaturas de austenización, también se incrementa esta tendencia. Los aceros con tamaño de grano grande son más susceptibles a agrietarse que los de grano fino.

El enfriamiento brusco directo es mayor causante del agrietamiento que el enfriamiento isotérmico. También el uso de enfriamientos severos como el agua o la salmuera pueden causar más agrietamiento que el enfriamiento en un medio lento como el aceite.

Se recomienda tener cuidado al maquinar y al limpiar para el tratamiento térmico.

+ Esfuerzos residuales (esfuerzos que existen en una parte que está libre de fuerzas externas). Los esfuerzos residuales pueden causar distorsión, alabeo, agrietamiento o ruptura, principalmente después del enfriamiento y antes del revenido. Otra razón para su formación es la contracción no uniforme de las partes calentadas durante el enfriamiento, la expansión durante la transformación o una combinación de las dos.

El enfriamiento brusco produce grandes esfuerzos y en consecuencia se debe utilizar el ritmo de enfriamiento lento para producir una microestructura y dureza deseables. El subsecuente revenido reduce la dureza y la fuerza de tensión, pero minimiza los esfuerzos y mejora la ductibilidad y la maleabilidad.

La distorsión o el alabeo es más grande en piezas troqueladas o cuando hay un cambio de grosor en dicha pieza.

El relevado de esfuerzos en los tratamientos térmicos es necesario muchas veces para minimizar la distorsión, pero muchas distorsiones y cambios de dimensión son inevitables como resultado del tratamiento térmico.

+ Retención de austenita. La austenita que no es transformada durante el ciclo del tratamiento térmico es suave y débil, y disminuye el endurecimiento global del acero si la cantidad es excesiva. También puede causar inestabilidad debido a la posible transformación de la austenita a temperatura ambiente después de un largo periodo de tiempo. En suma, la retención de austenita se transformará a martensita con la aplicación de un esfuerzo.

La cantidad de austenita retenida es afectada por el contenido de la aleación del acero, la temperatura de austenización, el enfriamiento y, en algunos casos, la cantidad y distribución de los esfuerzos en las partes enfriadas. El efecto del contenido de la aleación es tan fuerte que algunos aceros son totalmente austeníticos a temperatura ambiente. Las altas temperaturas de austenización pueden dar como resultado un incremento en las cantidades de austenita retenida. El ritmo lento de enfriamiento puede incrementar también la tendencia a retener austenita.

Un método para eliminar la retención de austenita es enfriando las partes que ya se enfriaron con anterioridad a temperaturas abajo de la de congelación donde la transformación de austenita a martensita se completa. Otro método aplicable a ciertos aceros, en los cuales la austenita no se ha estabilizado para largos periodos anteriores al tratamiento, consiste en calentar las partes enfriadas a una temperatura cerca de 150 °C (300 °F) o más para permitir la transformación a ferrita más carburo.

1.5 Enfriamiento.

La combinación óptima de resistencia y ductibilidad en un acero dado se lleva a cabo generalmente por un tratamiento térmico que produce una microestructura homogénea. Uno de los medios más efectivos para realizar esta homogenización es enfriando primero bruscamente y entonces hacer un revenido a fin de eliminar esfuerzos y lograr el endurecimiento y la ductibilidad deseados.

Un tratamiento térmico efectivo envuelve no sólo ritmos críticos de calentamiento o temperatura sino también ritmos de enfriamiento y temperaturas críticas. Estos factores críticos dependen básicamente del contenido de carbono y de las aleaciones del material que se va a tratar, y de la sección y la forma de la pieza. Para resultados óptimos de templado, es necesario que el medio de enfriamiento haga una extracción suficientemente rápida de calor para evitar la transformación de la perlita, pero suficientemente lenta para asegurar una uniformidad de la extracción de calor a través de la pieza.

1.5.1 Porcentaje de extracción de calor.

La proporción de extracción de calor varía mucho, dependiendo del tamaño de la sección y de la geometría de la pieza, la cantidad de área superficial disponible para transferir calor, el tipo de acero; el tipo del medio de enfriamiento y el grado de circulación o agitación del medio. Los enfriadores son agitados en tanques con el uso de propulsores para mover el medio con relación a la pieza o por bombas que forcen al medio a través de orificios apropiados. En algunos casos las piezas son movidas a través del medio y para algunas aplicaciones, el enfriador es atomizado. La tabla 4 muestra la comparación de la severidad de algunos fluidos utilizados como enfriadores.

Condiciones de enfriamiento	Medio de enfriamiento severidad del enfriamiento, H*			
	aire	aceite	agua	salmuera
+ No circulación del medio o de la pieza.	0.02	0.25-0.30	0.9-1.0	2.0
+ Circulación o agitación suave.	--	0.30-0.35	1.0-1.1	2.0-2.2
+ Circulación moderada.	--	0.35-0.40	1.2-1.3	--
+ Circulación buena.	--	0.40-0.50	1.4-1.5	--
+ Circulación fuerte.	--	0.50-0.80	1.6-2.0	--
+ Circulación violenta	--	0.80-1.10	4.0	5.0
* H equivale a un valor de 1 para agua destilada.				

Tabla 4. Severidad de enfriamiento para varios medios.

1.5.2 El medio de enfriamiento.

El primer requerimiento para un enfriador es que provea de una rapidez deseada de enfriamiento sin distorsión, rompimiento ni agrietamiento de la pieza. Otros factores que influyen en la selección del medio adecuado es el costo (el inicial y el de mantenimiento), su facilidad de control y de mantenimiento, su seguridad y la limpieza de uso, su consideración ecológica y su estabilidad.

Una gran variedad de enfriadores se utiliza para procesos de tratamientos térmicos. Entre los más importantes están:

el aire, el agua, el aceite, soluciones de polímeros acuosos, la salmuera, sal fundida, gas, baños de plomo fundido y niebla.

Para el metal SAE 1045, que es el que se utiliza para este proceso, se requiere del enfriamiento por agua a una temperatura cerca de 20 °C (70 °F) o en salmuera (un 10% de solución salina) a 25 o 40 °C (80 o 100 °F).

El agua es segura y fácil de manejar, pero sus características de enfriamiento cambian más con agitación y variaciones de temperatura que lo que hacen muchos aceites o soluciones de polímeros. El alto porcentaje de enfriamiento del agua tal vez dé como resultado una distorsión excesiva o agrietamiento de algunas piezas.

Con una vigorosa circulación y manteniendo constante la temperatura del baño, el agua puede ser considerada como un enfriador satisfactorio para muchas aplicaciones. Sin embargo, si el flujo de agua es lento y no se mantiene fría, puede resultar completamente insatisfactoria.

1.6 Endurecimiento superficial.

La zona exterior de una pieza puede endurecerse superficialmente (sin experimentar ningún cambio de composición química) si en un acero templable se calienta solamente la superficie hasta la temperatura de temple. Se trata de calentamiento hasta temperaturas por encima de A_{c3} en aceros hipoeutectoides, y por encima de A_{c1} , en los hipereutectoides, usados con menos frecuencia. Después del calentamiento, el acero se enfría como de costumbre por medio de una ducha. Lo esencial es que el calentamiento sea corto y que el enfriamiento sea de poca duración. El problema es precisamente el de aportar la suficiente cantidad de energía en el menor tiempo posible con el fin de impedir que pase demasiado calor al núcleo.

También se puede lograr el temple superficial por difusión, calentando la aleación en una atmósfera cargada de átomos de carbono que se difundirá dentro de la aleación. Para lo anterior existen dos métodos, uno es la cementación y otro la nitruración.

Las ventajas que presenta el calentamiento superficial para el templado sobre los anteriores métodos son las siguientes:

a) La estructura del núcleo no experimenta ningún cambio por el temple superficial, siempre que se haga el calentamiento con la suficiente rapidez y la pieza no tenga secciones demasiado pequeñas, es decir, que hasta el momento

de enfriar la pieza mediante la ducha no se haya calentado el núcleo hasta una temperatura superior a la de revenido.

b) La zona de temple puede variarse dentro de amplios límites, no existiendo prácticamente restricciones más que en el sentido de dimensiones pequeñas. Esta limitación hacia los espesores mínimos viene dado por la cantidad de energía térmica, es decir, la acumulación de calor que es posible aportar en función del tiempo.

c) El temple superficial de las piezas, aunque sólo sea parcial, es mucho más fácil que la cementación, ya que muchas veces sólo es necesario hacer un calentamiento parcial de las piezas que se van a templar. En el temple por calentamiento superficial también es factible hacer temple locales superficiales en piezas muy grandes.

d) La deformación de las piezas es muchas veces más pequeña que en cementación, lo cual es debido a que el núcleo conserva toda su resistencia. En consecuencia, las tensiones que aparecen por calentamiento o temple superficial no pueden equilibrarse por deformación de toda la pieza. Mas bien, tiene lugar solamente un equilibrio en la superficie caliente con su escasa resistencia. Como es natural, este equilibrio en la capa superficial sólo puede tener lugar después del calentamiento y durante el enfriamiento antes de la formación de martensita. Pero no hay que olvidar que entre la zona martensítica después del temple y la estructura bonificada del núcleo sólo hay una estrecha zona que ya fue calentada hasta alta temperatura, pero sin haber pasado de la transformación Ac_1 o Ac_3 . Esta zona es muy blanda y puede permitir cierta compensación de tensiones. Sin embargo, se ha visto en la práctica que las tensiones de transformación y las tensiones térmicas originadas por los calentamientos superficiales de corta duración y asimétricos, así como las tensiones que se forman en el enfriamiento por rociado, no producen un agrietamiento mayor del que suele producirse en el temple por enfriamiento con ducha.

e) Desde el punto de vista energético, el calentamiento breve de la superficie es mucho más económico que el tratamiento de cementación. En las piezas de gran tamaño, tiene importancia el hecho de que solo se tenga que calentar la capa superficial con un volumen muy pequeño de material.

Entre las maneras de realizar el temple por calentamiento superficial destacan dos: una es por flama o soplete que por lo general es de oxiacetileno y la otra es por inducción eléctrica. Esta última será la que nos ocupe en el siguiente capítulo.

CAPITULO DOS

EL CALENTAMIENTO POR INDUCCION ELECTRICA

EL CALENTAMIENTO POR INDUCCION ELECTRICA.

2.1 La inducción electromagnética.

2.1.1 Principios generales.

El calentamiento por inducción sólo se puede aplicar a los materiales que sean conductores de la electricidad en presencia de un campo magnético alterno y está basado en el principio de la inducción electromagnética de energía eléctrica en un material conductor en cuyo interior, un campo variable origina la aparición de tensiones eléctricas. Como consecuencia, aparecen dentro del cuerpo unas corrientes llamadas de histéresis y de eddy, siendo estas últimas las más importantes. En electricidad general, estas corrientes se consideran como fuente indeseable de pérdidas pero la electrotermia las utiliza para su provecho.

Un circuito de calentamiento por inducción es fundamentalmente un generador de alta frecuencia conectado a un transformador en donde la bobina de inducción, también llamado inductor, es el primario del transformador y conduce la corriente alterna y la parte que se va a calentar se convierte en el secundario con el simple hecho de colocarla al alcance del campo magnético del inductor. La fuerza de este campo depende básicamente de la magnitud de la corriente que fluye por el inductor. La figura 2.1 muestra el esquema de la conexión.

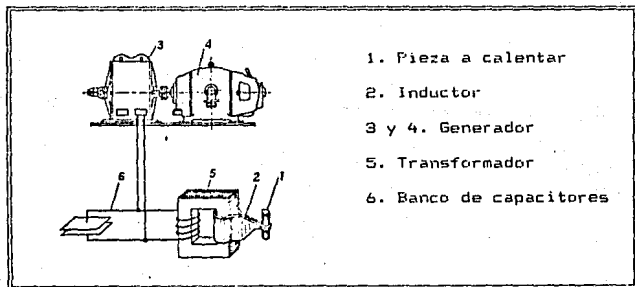


Figura 2.1 Esquema de calentamiento por inducción eléct.

No hay contacto ni conexión entre la bobina del inductor y la pieza a calentar. La corriente fluye, describiendo una circunferencia a través del inductor y crea líneas magnéticas de flujo en forma circular, las cuales unen al material que se va a calentar e inducen en él un potencial eléctrico, y ya que la pieza representa un circuito cerrado, el voltaje inducido provoca el flujo de una corriente eléctrica por la pieza. La corriente que fluye por la pieza tiene sentido contrario a la que fluye a través del inductor (fig. 2.2).

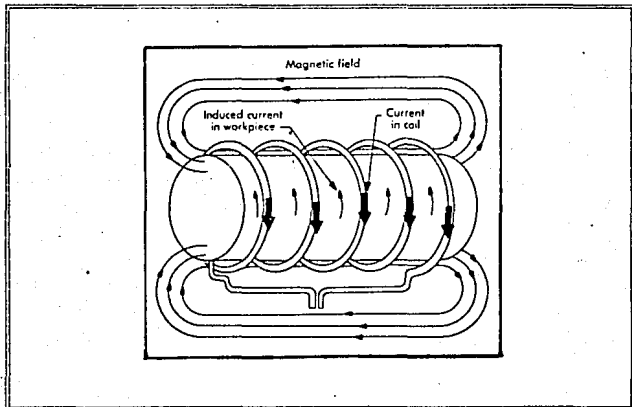


Figura 2.2 Inducción de las corrientes.

El patrón de calentamiento que se obtiene por medio de la inducción se determina por a) la forma de la bobina de inducción que produce el campo magnético, b) el número de vueltas de la bobina, c) la frecuencia de operación, d) la potencia de la corriente alterna de entrada y e) la naturaleza de la pieza.

Las formas del inductor y de la pieza no están limitadas a la circular, con la pieza rodeada por la bobina de una simple vuelta o devanado, sin embargo, las de tipo circular cerrado son eléctricamente más efectivas pero hay flexibilidad para otras formas según los diferentes requerimientos.

2.1.2 El calentamiento superficial por inducción.

Ya que la pieza o material que vamos a tratar es conductor, lo colocamos dentro de un campo magnético alterno y se produce en el interior de la pieza una distribución de campo tal, que las capas interiores del cilindro presentan una impedancia más elevada que las capas exteriores (fig. 2,3). Por esta razón, las corrientes inducidas en la pieza son mucho mayores en la superficie que en el interior; este fenómeno se conoce con el nombre de efecto pelicular y como el material presenta resistencia al paso de la corriente eléctrica, el calentamiento es debido al calor que se libera como resultado de las pérdidas por efecto Joule (I^2R) (tab. 2.1). Este efecto se utiliza para el calentamiento de capas superficiales cuyo espesor es mucho más pequeño que el diámetro de la pieza.

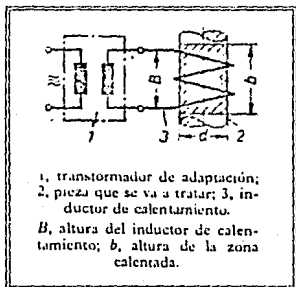


Figura 2.3 Diagrama.

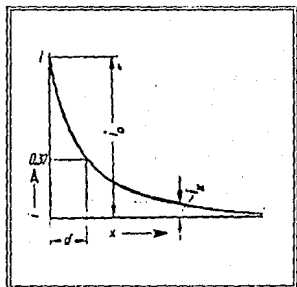


Tabla 2.1 Efecto pelicular.

En la tabla 2.1 se representa la distribución de la densidad de corriente i , que disminuye desde el exterior hacia el interior según una función exponencial:

$$i_x = i_0 e^{-x/\delta}$$

- i_0 = densidad de corriente en la superficie de la pieza.
- x = distancia desde esta superficie hasta un punto en el interior.
- δ = profundidad de penetración.

La δ es el espesor de la capa exterior en la cual la densidad de corriente se reduce a la e -ésima parte del valor inicial i , donde, en cierto modo, se concentra la corriente inducida por unidad de longitud de la pieza.

A partir de las ecuaciones de Maxwell, se deduce para la profundidad de penetración δ , la ecuación:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

ρ = resistividad eléctrica en $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

f = frecuencia en Hz.

μ = permeabilidad magnética relativa.

Como los valores ρ y μ dependen de las características del material, la profundidad de penetración en una pieza determinada, sólo se puede modificar variando la frecuencia de trabajo.

En la tabla 2.2 se muestra cómo la profundidad de penetración depende de la frecuencia para algunos materiales importantes con valores numéricos de ρ y μ muy distintos.

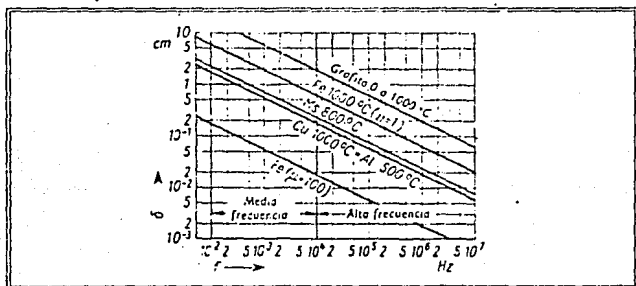


Tabla 2.2 Variación de la profundidad de penetración.

La permeabilidad magnética relativa de materiales magnéticos decrece con la temperatura desde un cierto valor a temperatura ambiente hasta un valor de 1 a temperatura cercana a los 730°C (1350°F) llamada temperatura Curie, a la cual los aceros se vuelven no magnéticos. Todos los materiales no magnéticos tienen un valor de 1 a todas las temperaturas. Un acero a temperatura ambiente tiene una $\mu=100$.

En todos los casos se puede obtener la profundidad de penetración deseada, eligiendo la frecuencia apropiada.

La tabla 2.3 representa una curva que corresponde a la distribución de la densidad de energía producida por efecto Joule, w , en función de la distancia a la superficie. Se puede observar que el 86.5 % de toda la energía suministrada a la pieza que se está tratando, se transforma en energía calorífica en una capa exterior de espesor δ , y que solamente un 13.5 % se transforma en calor en la parte restante.

De todo esto deducimos que la potencia absorbida P (y por lo tanto el calor disipado por efecto Joule) depende de la relación existente entre el diámetro de la pieza d y la profundidad de penetración δ .

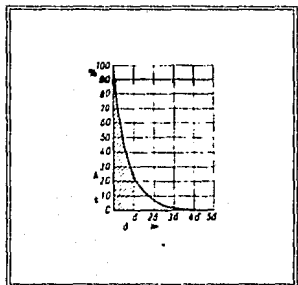


Tabla 2.3 Relación w/δ .

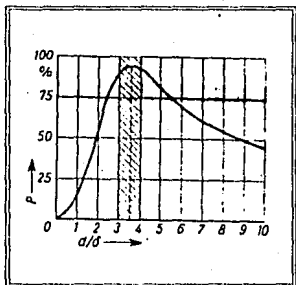


Tabla 2.4 Variación de P .

La tabla 2.4 muestra que la profundidad de penetración debe estar comprendida entre $1/3$ y $1/4$ del diámetro de la pieza. Para piezas de acero rodeadas por una bobina inductora, se pueden aplicar las fórmulas empíricas (ecuaciones numéricas) siguientes:

para $v > 730$ °C ($\mu=1$) y $d > 26$

$$d > 1000 \sqrt{\frac{P}{f}} \text{ mm} \quad \delta \quad f > \frac{P}{d^2} * 10^6 \text{ Hz}$$

para $v \approx 850$ °C ($\mu=1$, acero no aleado) y $p = 1.2 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

$$d > \frac{35}{\sqrt{f}} \text{ mm} \quad \delta \quad f > \frac{1200}{d^2} \text{ kHz}$$

Hasta ahora hemos supuesto que el calor producido por inducción no se propaga hacia el interior de la pieza metálica, que generalmente es de un material buen conductor. De hecho, siempre habrá una disipación de calor inevitable hacia el interior de la pieza que resulta tanto más perjudicial para el calentamiento localizado deseado, cuanto mayor sea la duración de la operación de calentamiento. El límite de profundidad de penetración calculado teóricamente, hay que considerarlo siempre más o menos disminuido. Las profundidades efectivas alcanzadas en la práctica durante el proceso de endurecimiento, se llaman profundidades de endurecimiento.

La tabla 2.5 nos muestra la profundidad media de penetración δ , y la profundidad de endurecimiento δ' , de una pieza de acero calentada por inducción con una densidad de potencia normal, en función de la frecuencia.

La tabla 2.6 es la gráfica del gradiente de temperatura en el interior de un cilindro macizo calentado mediante un sistema de corta duración con diversas frecuencias; si se empleara un sistema de calentamiento lento debido, por ejemplo, a una densidad de potencia insuficiente, la conducción de calor hacia el interior impediría obtener resultados satisfactorios, porque daría lugar a una profundidad de endurecimiento excesiva. En la figura, 1 es la frecuencia de la red; 2, media frecuencia; y 3, alta frecuencia.

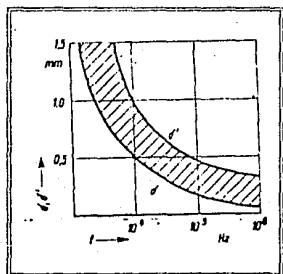


Tabla 2.5 Relación f/δ

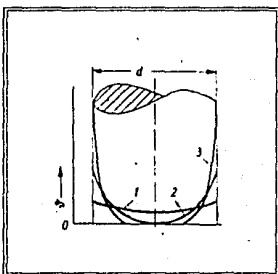


Tabla 2.6 Distrib. de temp.

Afortunadamente, el calentamiento por inducción es particularmente indicado para conseguir grandes velocidades de calentamiento, con lo cual se evita esta conducción de calor no deseada hacia el interior de la pieza. Por lo contrario, se necesitan densidades de potencia más elevadas (las potencias específicas se expresan en kW/cm^2) con objeto

de calentar únicamente capas muy delgadas. Cuando debido a las dimensiones de la pieza haya que utilizar generadores de potencia demasiado grandes, es más conveniente abandonar el calentamiento estático y emplear un calentamiento por zonas. En este caso, la pieza se divide en zonas que se van tratando sucesivamente, con lo cual no se necesita un generador de gran potencia para conseguir un calentamiento suficientemente rápido.

Con el calentamiento por inducción pueden conseguirse velocidades de calentamiento hasta de 10,000 °C/s. Las tablas 2.7 y 2.8 son el resultado de observaciones a los fenómenos de conducción de calor hechas en estudios experimentales realizados con placas de acero. Basándose en los principios fundamentales del calentamiento por inducción, se pueden enunciar las reglas siguientes:

* El calentamiento por inducción de los materiales conductores de la electricidad, sólo se puede realizar dentro de un campo magnético variable;

* Aproximadamente un 86.5% del calor producido, se concentra en una capa superficial de espesor δ . La profundidad de penetración, δ , hay que determinarla al realizar el espesor de la instalación.

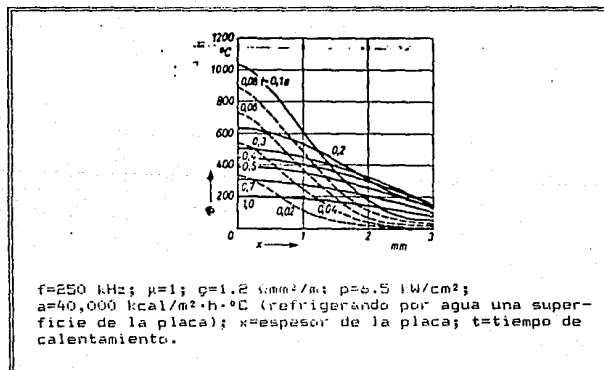


Tabla 2.7 Variación de la distribución de temperaturas.

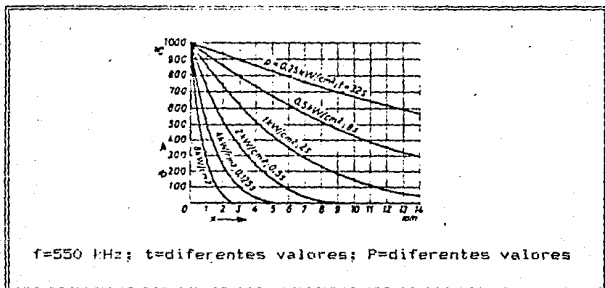


Tabla 2.8 Distribución de temperaturas.

2.2 Endurecimiento.

Para un proceso exitoso de endurecimiento se debe utilizar el medio apropiado de enfriamiento al área calentada para asegurar que la pieza se enfría más rápidamente que el ritmo crítico de enfriamiento. Los aceros de bajo carbono deben ser enfriados con un mínimo de retraso y en un medio como el agua para obtener el máximo de dureza. Para los aceros de alto carbono o aceros aleados, se pueden tolerar retrasos más largos y un medio de enfriamiento más lento, como el aceite o cualquier tipo de polímero. Para algunas aplicaciones, el uso de polímeros como enfriadores nos da un control del endurecido entre el agua y el aceite. Estos materiales se pueden ajustar en su capacidad para endurecer controlando sus concentraciones en una solución de agua o controlando su temperatura.

Es posible usar un medio no líquido si el volumen de metal calentado es muy pequeño comparado con el total del tamaño o del volumen de la pieza. A esta operación se le llama enfriamiento de masa.

El periodo de tiempo comprendido desde que se corta el flujo de energía y se aplica el proceso de enfriamiento es importante desde el punto de vista de control. Cuando la parte procesada tiene una sección transversal razonablemente larga y la limitación de la profundidad de endurecido no es importante, el periodo de retardo entre calentamiento y enfriamiento no es crítico.

Un periodo de retardo da un tiempo adicional para la difusión de la estructura metalúrgica del Área a ser endurecida, sin la necesidad de utilizar temperaturas más altas y es, por lo tanto, ventajoso.

Sin embargo, los ciclos cortos de calentamiento generalmente asociados con el calentamiento por inducción, permiten el uso de temperaturas más altas para obtener los mismos resultados, por ello limitando el flujo de calor por conducción sin introducir deterioros en la formación de la microestructura.

Cuando la parte que se va a calentar tiene un área que es excesivamente grande, se ejecuta el calentamiento pasando dicha parte progresivamente a través del campo magnético de un inductor. El área superficial calentada es enfriada progresivamente conforme ésta emerge del efecto de la energía de alta frecuencia. Esta técnica hace posible que con una capacidad limitada de potencia, se puedan mantener altas densidades de potencia para controlar la profundidad, ya que la energía se puede introducir a través de una banda estrecha alrededor de la superficie de la pieza.

Mientras que la profundidad de penetración es una función de la frecuencia, es controlada primariamente por la cantidad de energía y el ritmo de viaje a través del inductor, el cual es comparable al tiempo de calentamiento. El enfriamiento, que no envuelve un periodo de retraso en términos de tiempo, es controlable variando el ángulo al cual se taladran los agujeros para el agua de enfriamiento; este ángulo controla la distancia entre el punto en el que los efectos de la corriente de alta frecuencia abandona la pieza, y el enfriamiento. Entre más largo sea el intervalo de tiempo entre la salida del inductor y el agua de enfriamiento, más grande será el flujo de calor por conducción. El volumen de enfriador utilizado es crítico con respecto al calor removido.

2.3 Diseño del inductor de calentamiento.

Dado que el objeto del calentamiento superficial por inducción, es calentar tan rápidamente como sea posible una zona de una pieza, los inductores de calentamiento se construyen en forma de bobina de una sola espira, cuya resistencia óhmica es muy pequeña y cuya sección está concebida para densidades de corrientes elevadas (3000 a 6000 A/mm²). Por esta razón se emplean conductores huecos refrigerados por agua. Para todas las frecuencias, los inductores son generalmente de cobre debido a su alta conductividad, su gran maniobrabilidad y su costo moderado.

relación de los valores de las resistencias en los bornes del primario y del secundario es igual al cuadrado de la relación de transformación. El arrollamiento secundario del transformador de adaptación se compone generalmente de una sola espira formada, por ejemplo, por un tubo abierto y refrigerado de metal que se conecta al inductor de calentamiento. El número de espiras del primario (lado del generador), se determina de tal manera que la relación de transformación permita adaptar correctamente la resistencia del inductor. En términos generales, se puede decir que es suficiente una bobina primaria de 6 a 10 espiras de tubo de cobre, refrigerado por agua. Los arrollamientos del transformador se sumergen a veces en resina colada para protegerlos contra las proyecciones de agua, o mejor aún, para evitar pérdidas, se construyen como los transformadores de alta frecuencia para el aire libre.

Es posible tener un coeficiente de acoplamiento de 0.8 a 0.9 incluso para frecuencias elevadas. Aunque el transformador tiene un flujo disperso muy pequeño, no se puede desprestigiar la potencia reactiva, debida principalmente al espacio que existe entre el inductor de calentamiento y la pieza que se va a tratar. El conjunto del circuito de utilización incluidos el transformador y el inductor de calentamiento, tiene un coeficiente de autoinducción relativamente elevado. El generador de alta frecuencia hay que dimensionarlo teniendo en cuenta la potencia activa que se necesita para la operación de calentamiento y también la potencia reactiva.

Las reactancias de dispersión del transformador de adaptación y las debidas al espacio existente entre el inductor y la pieza que se va a tratar, no se pueden eliminar totalmente, a pesar de la presencia de un núcleo de hierro en el transformador, y a pesar de que el inductor se adapte completamente a la pieza; el factor de potencia en los bornes de entrada del transformador resulta del orden de 0.1, cuando la frecuencia es de 100 KHz. Por esta razón la potencia aparente puede llegar a ser de diez a treinta veces mayor que la potencia real. Para compensar la potencia reactiva es necesario tomar algunas medidas especiales en el generador.

Cuando se quiere obtener una zona de calentamiento estrechamente delimitada, hay que proteger a las zonas vecinas de la influencia del campo magnético, mediante unas pantallas conductoras apropiadas, o bien concentrando el flujo magnético con el inductor de manera que su acción se limite a la zona que se desea calentar. Todas las posibilidades que existen para controlar la distribución del campo magnético, dan al calentamiento por inducción gran flexibilidad.

Para que un inductor de calentamiento tenga un buen rendimiento, conviene observar las normas siguientes:

a) La relación D_i/d_a entre el diámetro interior D_i de la bobina y diámetro exterior d_a de la pieza que se va a calentar, debe aproximarse a la unidad tanto como sea posible. El inductor de calentamiento debe, por lo tanto, rodear a la pieza muy estrechamente;

b) La relación B/b entre la longitud B de la bobina del inductor y la longitud b de la zona que se calienta, debe ser menor o igual que uno (fig. 2.3);

c) El valor de la resistencia del material que constituye la bobina debe ser tan pequeño como sea posible;

d) El rendimiento aumenta cuando el valor de la resistividad de la pieza que se trata, es relativamente grande con relación al de la bobina de trabajo.

También se mejora el rendimiento cuando la permeabilidad de la pieza que se calienta es elevada; sin embargo, hay que tener en cuenta que al sobrepasar el punto de curie, el valor de la permeabilidad relativa es $\mu=1$.

Si por rendimiento eléctrico se entiende la relación que existe entre la potencia disipada por la pieza que recibe el tratamiento, y la potencia aplicada al inductor de calentamiento, cuando se observan las reglas citadas se pueden alcanzar rendimientos del 76% con piezas de acero y bobinas toroidales. Este valor se reduce al 40-60% para piezas de cobre o de otro material no férreo. Todos estos valores se reducen a la mitad cuando se utilizan inductores planos en lugar de los toroidales (fig. 2.5).

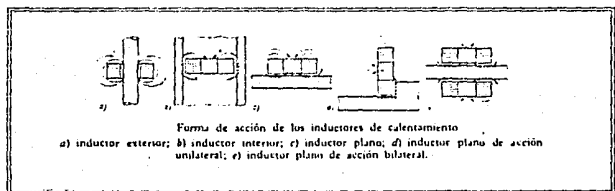


Figura 2.5 Forma de acción de los inductores.

Aunque el rendimiento térmico influye en el rendimiento eléctrico, su importancia se considera secundaria en el caso de un calentamiento superficial de corta duración. En efecto, las pérdidas de calor por efecto Joule en la bobina

inductora son muy pequeñas, y sólo hay que tener en cuenta las pérdidas de calor en la capa superior de la pieza que se calienta. Para disminuir estas pérdidas de calor habría que colocar una capa de aislamiento alrededor de la pieza, originando una separación excesiva entre la pieza y la bobina inductora, que daría lugar a un rendimiento eléctrico inadmisibles. Por esta razón se prescinde del aislamiento térmico en el caso de un calentamiento superficial.

Desde el punto de vista constructivo hay que distinguir entre inductores de calentamiento internos e inductores externos, y también entre inductores planos e inductores toroidales. La distribución de líneas de fuerza que se indica en la figura 2.5, pone de manifiesto las ventajas del inductor toroidal. En algunos casos especiales, para densidades de potencia elevadas y zonas de calentamiento estrechamente delimitadas, se prepara un inductor formado por un disco de cobre con una hendidura radial, donde se ajusta la pieza que se quiere tratar, que lleva en su periferia una bobina recorrida por una corriente eléctrica. El acoplamiento entre la pieza y el inductor se puede reforzar montando sobre la bobina unas piezas metálicas para concentrar el campo magnético. Los inductores toroidales se pueden equipar de un sistema de duchas que permita hacer un temple en las proximidades inmediatas a la zona calentada. Este método es recomendado para cuando se tenga zonas muy grandes para calentarse y se utiliza el método progresivo de calentamiento. La figura 2.6 muestra un inductor de éste tipo.

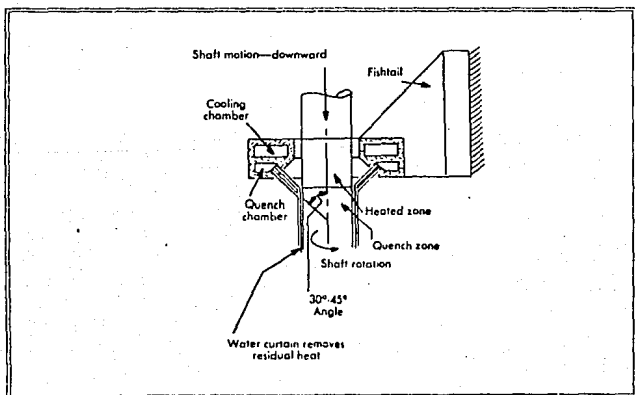


Figura 2.6 Inductor para calentamiento progresivo.

El ángulo de los agujeros se recomienda que sea entre 30 y 45° y que la pieza se encuentre rotando durante el proceso, esencialmente por dos razones:

- + Para cancelar los efectos del flujo disperso y alcanzar un calentamiento más uniforme.
- + Para dar un baño de enfriamiento más uniforme en la superficie de la pieza.

Esto representa una ventaja tanto mayor cuanto mayores son las piezas y más difícil resulta llevarlas a un baño de temple. Los inductores planos se utilizan para el calentamiento por zonas con movimiento de la pieza (fig. 2.7). De esta forma se pueden tratar superficies grandes con un generador y un inductor de calentamiento relativamente pequeños. El tamaño del inductor y del generador no dependen del espesor de la pieza, sino del área de la superficie donde se producen las corrientes inducidas.

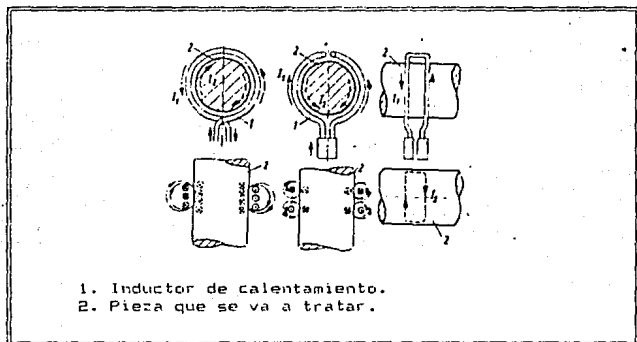


Figura 2.7 Inductores de desplazamiento

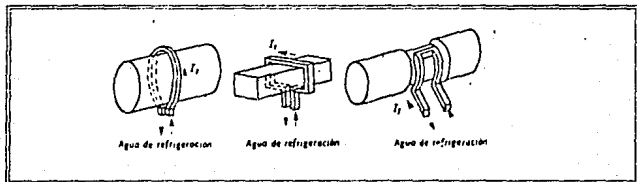


Figura 2.8 Inductores planos de paso ancho.

La figura 2.8 nos muestra algunos tipos de inductores planos y toroidales de una o varias espiras. Cuando se utilizan bobinas de varias espiras de paso ancho y acoplamiento constante, conviene girar la pieza para evitar la impresión de las espiras sobre ella.

Para el tratamiento de piezas engranadas se puede sacar bastante provecho de las ventajas del calentamiento por inducción. Generalmente no se calienta toda la corona dentada al mismo tiempo porque se necesita un generador de mucha potencia; por ejemplo, para un engranaje de 120 mm de diámetro y un módulo m13, se necesitarían 200 KW. Por esta razón es preferible calentar los dientes uno a uno utilizando un generador de potencia reducida. Hay que tener mucho cuidado para calentar uniformemente la cabeza, los flancos y el pie de cada diente; este procedimiento se denomina "endurecimiento del pie de los dientes". Mientras que el inductor de calentamiento permanece colorado en un hueco, se rocía con agua el hueco vecino (fig. 2.9). El tipo de inductor necesario se denomina de horquilla.

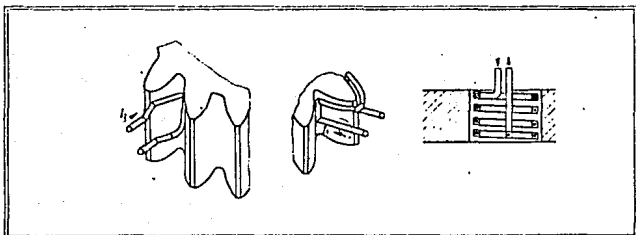


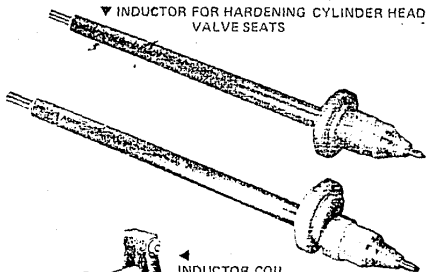
Figura 2.9 Inductor para piezas engranadas.

En las dos páginas siguientes están algunos ejemplos de inductores reales que se utilizan en la industria.

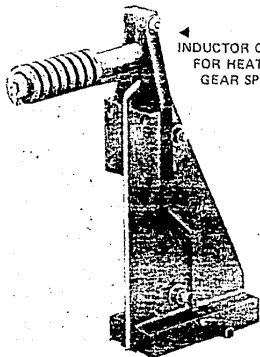
2.4 Equipo utilizado.

Un equipo o sistema de calentamiento por inducción consiste esencialmente en una fuente de energía, una bobina de calentamiento o inductor, controles, unidades para el manejo de las piezas y equipo auxiliar. Después de que se ha determinado la frecuencia que se requiere, la selección del equipo se hará en base a la evaluación del costo del equipo, costos de mantenimiento y operación y la flexibilidad del equipo para futuros cambios.

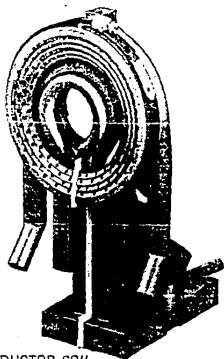
▼ INDUCTOR FOR HARDENING CYLINDER HEAD VALVE SEATS



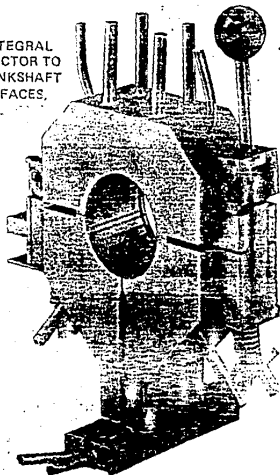
▲ INDUCTOR COIL FOR HEATING GEAR SPLINE I. D.



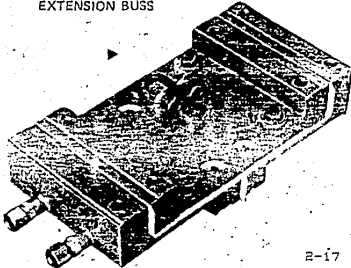
▶ TWO TURN SCANNING INDUCTOR COIL TO HARDEN AXLE SHAFTS



▶ MACHINED INTEGRAL QUENCH INDUCTOR TO HARDEN CRANKSHAFT BEARING SURFACES.



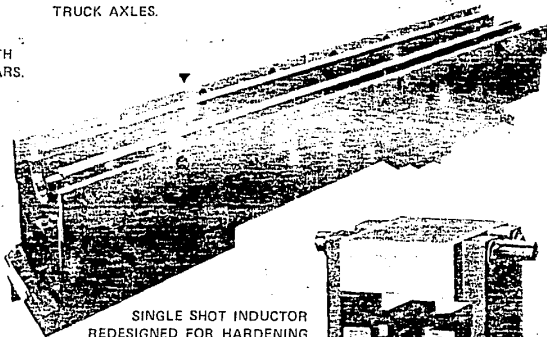
▶ HEAVY DUTY DUAL POSITION EXTENSION BUSS



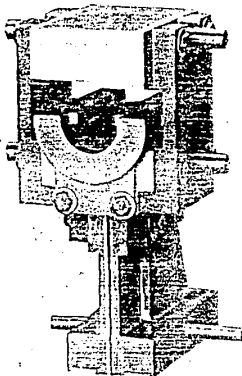
SMALL MACHINED
INTEGRAL QUENCH
INDUCTOR FOR
HARDENING O.D. TEETH
ON SMALL PINION GEARS.



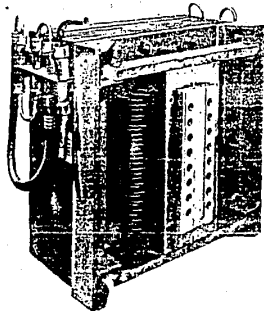
SINGLE SHOT INDUCTOR FOR HARDENING
TRUCK AXLES.



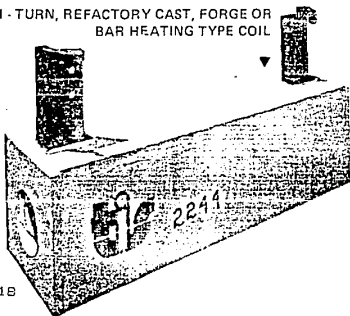
SINGLE SHOT INDUCTOR
REDESIGNED FOR HARDENING
TURBO SHAFTS WITH 3 DIFFER-
ENT DIAMETERS. PART HEATS &
QUENCHES IN PLACE WHILE
HARDENING FULL LENGTH OF
THE SHAFT. ▶



▼ REPAIRED ISOLATION TRANSFORMERS
(ALSO RADIO FREQUENCY
TRANSFORMERS) FOR
INDUCTION HEATING
EQUIPMENT.



MULTI - TURN, REFRACTORY CAST, FORGE OR
BAR HEATING TYPE COIL



2.4.1 Suministro de energía.

Para el calentamiento superficial por inducción se utilizan campos magnéticos de media y alta frecuencia.

Una unidad o fuente de energía convierte la frecuencia disponible de 60 Hz a la frecuencia que se requiera según la aplicación específica.

Cuando se trata de piezas de grandes dimensiones, cuyas zonas de calentamiento no están estrechamente delimitadas se pueden utilizar frecuencias de algunos kilohertz (hasta 10 KHz), suministradas por un generador clásico rotativo de media frecuencia, como generadores de alta frecuencia, se utilizan los generadores de chispas (ondas amortiguadas) y los generadores de tubos electrónicos.

Los generadores de chispas tienen el inconveniente de que se desgastan las puntas donde se producen las chispas. Además su potencia de salida está limitada a unos 15 KW y su regulación es difícil.

Por el contrario, los generadores de tubos electrónicos que también se utilizan en la técnica de las comunicaciones por radio, tienen un grado de perfeccionamiento considerable y se encuentran en el mercado aparatos con una potencia de salida de 1200 KW a una frecuencia de 100 MHz. La gama de frecuencias que se utilizan para el calentamiento superficial está comprendida entre 100 KHz y 2 MHz. Sin embargo, mientras los generadores de media frecuencia tienen un rendimiento del orden del 80%, el rendimiento máximo de los generadores de tubos es solo del 64%, aunque desde el punto de vista de la pieza que se va a tratar, el rendimiento total de estos dos tipos de generadores es prácticamente el mismo.

Otros tipos de fuentes de energía pueden ser el juego de motor generador que da frecuencias de 1,3 y 10 KHz, los multiplicadores de frecuencia, con 180 y 540 Hz y los inversores de frecuencia (estado sólido) de 0,2, 0,5, 1, 3, 6, 10, 25 y 50 KHz.

2.4.2 Estación de trabajo.

La estación de trabajo o de calor incluye el conjunto de accesorios eléctricos, tales como transformadores de salida, capacitores, contactores de alta frecuencia (con rangos de media frecuencia), dispositivos de protección y colectores del agua de enfriamiento.

La función de la estación de trabajo es proporcionar la debida impedancia eléctrica y adaptarla entre la salida de

la fuente de energía y el inductor para la óptima transferencia de energía a través de la pieza que se va a calentar. El inductor es montado normalmente en el frente de la estación de trabajo. Gran cantidad de estaciones de trabajo se pueden operar en serie con una sola fuente de energía, y algunas fuentes de energía pueden operar con estaciones de trabajo en paralelo.

Los componentes de la estación de trabajo se pueden combinar dentro de la fuente de energía, como se hace en pequeñas unidades de estado sólido de media frecuencia, y particularmente en osciladores de tubo al vacío (generadores de radio frecuencia) donde el único componente que se puede necesitar para acoplar es el transformador de salida.

- Bobina de calentamiento (inductor).

La bobina de calentamiento o inductor es el componente que el calentamiento en zonas específicas de la pieza. Es especialmente diseñado para acoplar debidamente el calor de la energía de la inducción dentro de la pieza a fin de obtener los resultados que se requieren.

- Manejo de la piezas.

El equipo para el manejo de las piezas que se van a calentar puede ser de muchas formas. Para trabajos de taller, el equipo puede consistir de simples accesorios manuales de sujeción. Para aplicación de producción, se pueden usar equipos sofisticados, precisos y automatizados para la sujeción y el manejo general de la pieza durante el proceso.

- Sistemas de control.

Se requiere de un control preciso para el calentamiento por inducción, debido a la alta velocidad de calentamiento y a lo selectivo del área de endurecido. Se utilizan muchos tipos de sistemas de control, dependiendo de la aplicación, incluyendo controles de temperatura de rayos infrarrojos, unidades NC/CNC, controladores programables automatizados y robótica.

- Equipo auxiliar.

Es práctica común la de incluir otros componentes en la instalación del calentamiento por inducción. Estos pueden incluir sistemas de enfriamiento de agua recirculada, especialmente para operaciones de endurecido.

Para el éxito del calentamiento por inducción es necesario un diseño y la operación apropiados de los sistemas de enfriamiento de agua. A causa de las altas corrientes eléctricas que circulan en muchas partes del

sistema, es indispensable una presión y flujo satisfactorios del agua a una temperatura razonable. Además, partes eléctricas enfriadas por agua tal vez operen a un voltaje substancial, por lo tanto, la conductividad eléctrica del agua debe ser baja, requiriendo un mínimo de aditivos. Otras características deseables del agua incluyen límites en la cantidad de carbonato de calcio (CaCO_3), los sólidos totales (disueltos y en suspensión) y el valor del P.H. Los sistemas de agua generalmente presentan facilidades para la recirculación (bombeo), disipación de calor (enfriadores, torres de enfriamiento, intercambiadores de calor, etc.) y una red de tubería, la cual se recomienda que sea de material no ferroso para prevenir la contaminación.

2.4.3 Construcción.

En la figura 2.10 se representan todos los elementos que forman parte de una instalación de calentamiento por inducción indicando su resistencia óhmica y su reactancia. El generador de alta frecuencia 1 de conexión trifásica, transmite una corriente monofásica al transformador 2 que a su vez la transmite al inductor de calentamiento 3. En las baterías de baja y alta frecuencia se utiliza una batería de condensadores (con una parte conectada permanentemente y otra que se pueda desconectar) para compensar la energía reactiva. En las instalaciones de alta frecuencia no se necesita batería de condensadores porque el tubo oscilador transmite la potencia real deseada, mientras que el circuito oscilante del generador suministra la potencia reactiva.

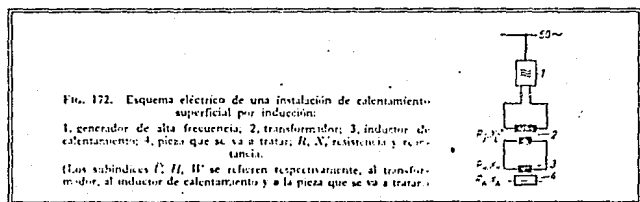


Figura 2.10 Esquema eléctrico de una instalación.

Para realizar el proyecto de una instalación se parte de la pieza que se va a tratar 4, cuyas dimensiones y constitución se conocen. Para una profundidad de penetración determinada, se puede calcular la resistencia óhmica de la pieza R_w , aplicando la ecuación numérica siguiente:

$$R_w = 2 \frac{l}{b} \sqrt{\rho \mu f} \cdot 10^{-4} \Omega$$

l = longitud media del recorrido de la corriente en la pieza en mm.
 b = anchura en mm. de este recorrido
 ρ = resistividad de la pieza ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)
 μ = permeabilidad de la pieza
 f = frecuencia (Hz)

Esta ecuación supone que toda la potencia de calentamiento se transforma en calor en la capa periférica limitada por la profundidad de penetración, cuyo espesor es muy pequeño en relación con el diámetro de la pieza; de esta manera se puede determinar la longitud media y la sección del recorrido de la corriente en la pieza.

De esta ecuación se deduce que si se aumentan en la misma proporción la longitud y la anchura del recorrido de la corriente la resistencia efectiva a alta frecuencia de la pieza R_w permanece invariable. Cuando se cambia el inductor de calentamiento para tratar otras piezas, no es necesario modificar las características del generador de alta frecuencia si las dimensiones exteriores de las piezas mantienen entre sí la misma proporción.

Por otra parte, la anterior ecuación indica que si se quiere mantener constante el valor R_w de una pieza de material ferromagnético, hay que elegir la frecuencia apropiada teniendo en cuenta las variaciones ρ y μ con la temperatura.

Para calcular la resistencia efectiva R_H del inductor de calentamiento, se utiliza la siguiente relación:

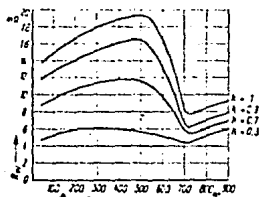
$$R_H = R_H' + \mu^2 k^2 R_w$$

La resistencia efectiva es igual a la resistencia propia del inductor R_H' , aumentada en una fracción de R_w que depende de la relación de transformación μ y del coeficiente k de acoplamiento entre el inductor y la pieza.

En la práctica se pueden obtener para el coeficiente de acoplamiento k valores comprendidos entre 0.8 y 0.9. La tabla 2.9 representa la variación de la resistencia efectiva de una pieza de acero en función de la temperatura, tomando como parámetro el coeficiente k de acoplamiento.

La adaptación óptima de la resistencia de carga al generador de alta frecuencia se realiza a través de la resistencia efectiva R_H del transformador. La resistencia óptima de carga está comprendida generalmente entre 0.15 y 1 Ω . Como el valor medio de R_w que se deduce de la figura anterior es de 10,000 Ω , habrá que multiplicarlo como máximo por 100, lo que se puede realizar con un transformador de

adaptación cuya relación de transformación sea $u = 10$. Generalmente, los transformadores de adaptación tienen 10 espiras en el circuito primario (conectado al circuito oscilante), y una espira en el secundario (conectado al inductor de calentamiento).



Variación de la resistencia R_a de una pieza de acero en función de la temperatura θ y del coeficiente de acoplamiento k [97].

Tabla 2.9

La impedancia de carga del generador está formada por el arrollamiento primario del transformador de adaptación, por el arrollamiento secundario del transformador del circuito de alta frecuencia del ánodo, y por los de los condensadores del circuito oscilante. Esta impedancia de carga se define por la ecuación

$$R_s = \frac{L}{R_s C} \quad (2.3)$$

L = inductancia total del circuito oscilante
 R_s = resistencia efectiva
 C = capacidad

La resistencia R_U del transformador hay que dimensionarla de tal manera que aplicando la ecuación 2.3 se obtenga una impedancia de carga óptima R_A . Sin embargo, cuando se cambia el inductor de calentamiento para tratar diferentes piezas, las reacciones sobre las resistencias efectivas R_M y R_U son diferentes. Por esta razón, hay que dimensionar el circuito oscilante con mucho cuidado para que sea posible encontrar en cada caso el valor de la impedancia de carga, buscando, modificando, por ejemplo, la capacidad C del circuito oscilante. Todas estas adaptaciones se pueden realizar con dispositivos automáticos de regulación.

2.5 Selección de la frecuencia, potencia y duración del calentamiento.

La distribución de las corrientes inducidas en la pieza es máxima en la superficie y decrece rápidamente dentro de la pieza. La penetración efectiva de la corriente aumenta con una disminución en la frecuencia. La distribución de las corrientes inducidas también es influida por las características magnéticas y eléctricas de la pieza; y como estas propiedades cambian con la temperatura, la distribución de la corriente cambiará conforme es calentada.

A causa de que el calor rápidamente avanza hacia el interior de la pieza por conducción tan pronto como la superficie se calienta, la profundidad real de calentamiento se determina por la duración del calentamiento y de la densidad de potencia (kilowatt por unidad de área expuesta al inductor), tanto como por la frecuencia. Máxima densidad de potencia, mínima duración de calentamiento, y alta frecuencia produce una profundidad de calentamiento mínima.

2.5.1 Selección de la frecuencia.

Para un análisis de los requerimientos de potencia y frecuencia para una aplicación específica, es recomendable considerar primeramente la frecuencia. Las primeras consideraciones son la profundidad de calentamiento y el tamaño de la pieza. Las frecuencias más bajas son más adecuadas para, cuando aumenta el tamaño de la pieza y la profundidad de calentamiento. Sin embargo, ya que la densidad de potencia también tiene una influencia importante en la profundidad de calentamiento de la pieza, se pueden hacer combinaciones exitosas, ya que más altas densidades de potencia se compensan con más bajas frecuencias. Esto es particularmente importante en las plantas donde ya existe algún equipo con una frecuencia o que tiene diferentes aplicaciones. En algunas ocasiones, el factor determinante para la selección de la frecuencia es la potencia que se requiere para proveer de una densidad de potencia suficiente para un endurecimiento exitoso, ya que un equipo de inducción de más baja frecuencia funciona con elevados niveles de potencia.

Sin embargo, el uso de una frecuencia errónea, dará como resultado una disminución en la eficiencia eléctrica; algunas veces se fracasará al tratar de mantener una profundidad mínima en donde se requiere de una profundidad superficial o se fracasará al tratar de obtener un calentamiento uniforme. La tabla 2.10 ilustra la disminución en la transferencia de energía o la eficiencia de

calentamiento que podría resultar de una mala selección de la frecuencia.

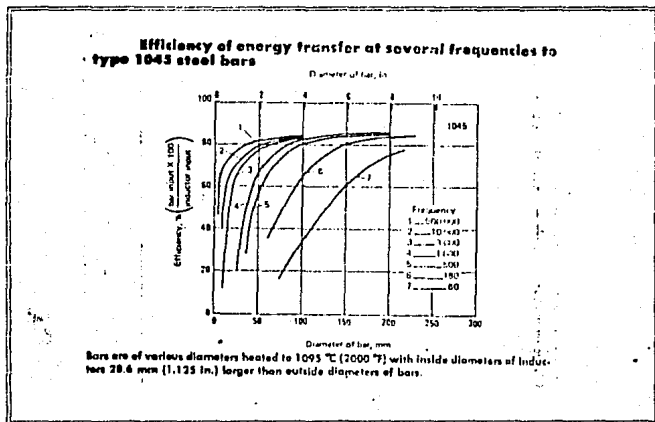


Tabla 2.10 Eficiencia en la transferencia de energía.

2.5.2 Selección de la potencia.

El tamaño del convertidor o de la potencia que se requiere se debe determinar en base a la densidad de potencia, al tamaño de la sección, al método de calentamiento y a los requerimientos de producción.

+ Densidad de potencia. Esta información, presentada en kilowatts por unidad de área, nos sirve como una experiencia previa o como experimento. La tabla 2.11 nos proporciona datos que están basados en el uso de la frecuencia apropiada y la operación normal y eficiente del equipo. Los valores de la tabla pueden ser utilizados para el método de calentamiento estático o el progresivo, sin embargo, para algunas aplicaciones, se puede utilizar energía de entrada más alta en calentamiento progresivo. En la tabla, bajo significa que se puede utilizar un kilowataje bajo como energía de entrada cuando la capacidad del generador es limitada. Optimo se utiliza para los mejores resultados metalúrgicos y alto para cuando la capacidad del generador lo permite y se requiere más alta producción.

ENERGIA DE ENTRADA

Frequency, kHz	Depth of hardening(c)		W/mm ²			kW/in. ² (b)		
	mm	In.	BAJO (d)	OPTIMO (e)	ALTO (f)	BAJO (d)	OPTIMO (e)	ALTO (f)
500	0.38-1.14	0.015-0.045	10.9	15.5	18.6	7	10	12
	1.14-2.29	0.045-0.090	4.7	7.8	12.4	3	5	8
10	1.52-2.29	0.060-0.090	12.4	15.5	24.8	8	10	16
	2.29-3.05	0.090-0.120	7.8	15.5	23.3	5	10	15
3	3.05-4.06	0.120-0.160	7.8	15.5	21.7	5	10	14
	2.29-3.05	0.090-0.120	15.5	23.3	26.35	10	15	17
1	3.05-4.06	0.120-0.160	7.8	21.7	24.8	5	14	16
	4.06-5.08	0.160-0.200	7.8	15.5	21.7	5	10	14
1	5.08-7.11	0.200-0.280	7.8	15.5	18.6	5	10	12
	7.11-9.14	0.280-0.360	7.8	15.5	18.6	5	10	12

Tabla 2.11 Densidades de energía.

+ Tamaño de la sección que se va a calentar. En endurecimiento superficial, el área calentada a un tiempo, multiplicado por la densidad de potencia, indica la potencia total de entrada (kilowatts). Esta área se obtiene multiplicando el perímetro de la pieza por el ancho del inductor.

+ Método de calentamiento. Cuando se utiliza el método estático de calentamiento, se debe calentar a un tiempo el área que queremos endurecer. Cuando la pieza se calienta progresivamente, método exploratorio, es necesario calentar sólo un pequeño segmento o banda a un tiempo. Por lo tanto, se puede utilizar un convertidor más pequeño si se utiliza este método.

+ Requerimientos de producción. Las densidades de potencia, como indica la tabla 2.11, se deben de ajustar entre los límites para reunir ciertos requerimientos de producción. Además de esto, se deben de incrementar los niveles de producción con una o más de las siguientes modificaciones. Para endurecimiento por el método estático: a) la instalación se puede mejorar reduciendo los tiempos de manejo de las piezas; b) las piezas se pueden enfriar fuera del inductor para permitir recargar inmediatamente; y c) se puede utilizar dos o más inductores si existe suficiente capacidad de potencia.

Si el ritmo de producción está basado en el tamaño del convertidor, y éste ya no reúne los requisitos de producción, se pueden utilizar dos o más unidades de capacidad parecida (o una sola unidad con dos, tres o cuatro veces la capacidad determinada) para endurecer dos, tres o cuatro piezas simultáneamente en un inductor múltiple.

2.5.3 Selección de la duración del calentamiento.

Cuando se ha seleccionado la frecuencia y la densidad de potencia, la duración del ciclo de calentamiento se convierte en un valor fijo para un conjunto específico de condiciones. Para calcular la duración del calentamiento para el método estático, es necesario dividir el valor de kilowatt-segundo por unidad de Área, entre la densidad de potencia (kilowatt por unidad de Área). El valor de kilowatt-segundos por unidad de Área se ve afectado por los requerimientos de profundidad, tipo de acero y la estructura cristalina y, por lo tanto, se debe calcular experimentalmente.

CAPITULO TRES

DISEÑO DEL EQUIPO

DISEÑO DEL EQUIPO.

3.1 Generalidades.

El equipo está compuesto de varios aparatos que en conjunto hacen la operación de endurecimiento superficial de la catarinas de acero al carbono 1045 y para lograrlo utilizan el principio de la inducción electromagnética.

La inducción electromagnética es un método para generar calor en una pieza de acero o hierro, con el fin de endurecerla. Cualquier material que sea conductor eléctrico puede ser calentado por inducción electromagnética. Debido a que una corriente alterna fluye a través del inductor o bobina de trabajo, se establece un campo magnético. La fuerza de dicho campo depende más comúnmente de la magnitud de la corriente que fluye por el inductor. El campo magnético establece entonces un potencial eléctrico en la pieza que se va a calentar y como la pieza representa un circuito cerrado, el voltaje inducido provoca el flujo de la corriente. La resistencia de la pieza al paso de la corriente inducida provoca el calentamiento.

La cantidad de calor obtenida con un inductor depende de la permeabilidad y resistividad de la pieza, y la frecuencia de la corriente alterna, ya que los dos primeros factores varían comparativamente poco, la mayor variación es la frecuencia. La profundidad de la corriente de penetración se decrementa conforme la frecuencia se incrementa. La corriente de alta frecuencia es generalmente usada cuando se desea una poca profundidad; la frecuencia media y baja son usadas en aplicaciones que requieren un calentamiento profundo.

Para lograr el endurecimiento, una vez calentada la pieza, se requiere del enfriamiento brusco, de preferencia con agua y los más rápidamente posible para evitar que se pierda la estructura cristalina que hemos alcanzado. El calentamiento por inducción es un método que nos permite tener un menor tiempo de retardo antes de aplicar el enfriamiento.

La mayoría de la aplicaciones de endurecimiento superficial por inducción requieren densidades de potencia comparativamente altas y ciclos de calor cortos para restringir el calor en la superficie. Las principales ventajas metalúrgicas que se obtienen en el endurecimiento superficial por inducción incluyen un incremento en la resistencia al uso.

3.1.1 Operaciones.

Existen dos formas diferentes para fabricar las catarinas según su diámetro. Una es la fabricación a partir de una barra sólida, y en la otra se parte de una barra hueca para fabricar el mamelón y de una placa a la cual se le corta el plato con un pantógrafo y se soldan las dos partes antes del tratamiento térmico.

El uso de una u otra depende del diámetro de la pieza. Las de mayor diámetro son las que se fabrican en dos partes.

Debido a que sería muy difícil y además poco práctico el considerar todas las medidas de las catarinas, es conveniente sólo tomar en cuenta aquella cuyas características nos de resultados críticos en los cálculos.

Las operaciones que llevan las catarinas de diámetros grandes son las siguientes:

Número de operación	Operación
305	Corte barra hueca
310	Careo diámetro interior de mamelón
315	Corte rodaja con pantógrafo
325	Maquinado primer torno
330	Maquinado segundo torno
345	Generadora de dientes
350	Rebabeo
355	Lavado
357	Tratamiento térmico
360	Soldadura
365	Maquinado de mamelón
370	Barrenado y machueleado
375	Maquilado diámetro cónico
376	Limpieza
385	Marcado
390	Pavonado
395	Empaque

Básicamente, las operaciones van a seguir siendo las mismas, sólo cambia el método de tratamiento térmico.

Las tablas 3.1 y 3.2 corresponden a los cursogramas analíticos del método actual y el método propuesto para dar una idea de la reducción de los tiempos de operación para cada pieza.

CURSOGRAMA ANALITICO

DIAGRAMA Num. 01 Hoja: 01		RESUMEN							
OBJETO: Optimizacion de tiempos.		ACTIVIDAD	ACTUAL	PROP.	ECONOM.				
ACTIVIDAD: Endurecimiento superficial de piezas engranadas.	OPERACION 0	9	5	4					
	TRANSPORTE =>	6	6	0					
METODO: ACTUAL	ESPERA D								
LUGAR: DODSE DE MEXICO.	INSPECCION <input type="checkbox"/>	1	0	1					
	ALMACEN ▽								
COMPUESTO POR: Hector M. Gonzalez Quintero.	DISTANCIA *	140	136	4					
AFROBADO POR: Eduardo Gatell Zorrilla.	TIEMPO **	36054	69	35875					
FECHA: 20/MAY/89									
ACTIVIDAD	CANT.	DIST.	TIEMPO*	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Activar avance piston/horquilla			2	XX					
Avance del piston		30	3		XX				
Tomar pieza del contenedor			7	XX					
Colocar pieza sobre horquilla			4	XX					
Encender llama oxiacetileno			4	XX					
Activar avance del piston			2	XX					
Avance piston a llama		30	3		XX				
Baja piston a llama		10	2		XX				
Calentamiento con flama			36000	XX					
Activar piston de regreso			2	XX					
Sube piston y recoge pieza		10	2		XX				
Activar piston a tina			2	XX					
Avance piston a tina		30	4		XX				
Soltar pieza en tina			3	XX					
Regresar piston al inicio		30	4		XX				
Inspeccion del acabado			10					XX	
TOTAL		140	36054						

* Distancia en centimetros

** Tiempo en segundos

3.2 Cálculo del equipo.

3.2.1 Datos preliminares.

Para hacer la selección de un equipo, se deben de conocer algunos datos cómo los requerimientos de producción, las ventajas que ofrecen algunos métodos sobre otros, las posibilidades técnicas y económicas, etc.

Una vez resuelto lo anterior, se pasa a hacer cálculos sobre la capacidad y características del equipo. Para el caso del método de inducción se requiere conocer:

1. Método de calentamiento.
2. Area total a ser calentada.
3. Profundidad del endurecido.

3.2.1.1 Método de endurecimiento.

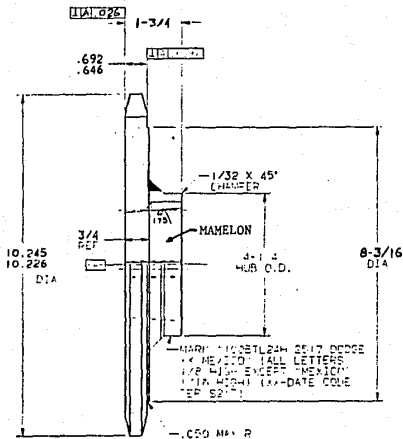
Los dos métodos que pueden hacer posible el calentamiento de las catarinas por inducción son: a) el método de calentamiento a un sólo tiempo; y b) el método de calentamiento progresivo (el método que se utilice dependerá de los requerimientos y la capacidad con que se cuente). El primero requerirá de una potencia mayor ya que calentará toda el área a la vez. El calentamiento progresivo sólo tomará una pequeña área y hasta que esté calentada ésta, se pasará a la siguiente, por lo tanto ocupará un equipo de menor potencia.

Para los cálculos siguientes será necesario tomar en cuenta los dos métodos, y analizar después cada uno. Para diferenciar dichos cálculos, los designaré como a y b a los que correspondan al método a un sólo tiempo y al progresivo, respectivamente.

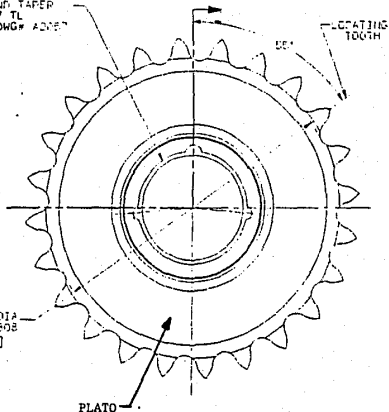
3.2.1.2 Area total a ser calentada.

La figura 3.1 contiene toda la información sobre las características y las dimensiones de la catarina de clave 100633H que es la más grande que va a recibir el tratamiento térmico. Dibujos similares se deben realizar para cada uno de los tamaños. Otra manera de describir las características de las catarinas es a través de tablas. La tabla 3.3 contiene la información de las catarinas restantes.

La zona que será expuesta al campo electromagnético del inductor, para esta catarina, tiene:



TAP AND TAPER FOR 2517 TL ING PER DWG# ABOVE



NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

CHAIN PITCH: 1.250 (NO. 100 CHAIN)

NO. OF TEETH: 24

PITCH DIA. 9.577 REF

DIA OVER .750 DIA FINIS: 10.027/10.308

HUB P/N 09700 (1015-1025 REF)

PLATE P/N 10020 (1035-1045 REF)

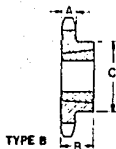
CUT AND CHAMFER TEETH PER S243

WELD SPROCKET PER S211

HARDEN TEETH PER S247

FINISH ALL SURFACES $\sqrt{32}$

GROUP	DESCRIPTION	REVISION	DATE	BY	CHKD
1	DESIGN				
2	MANUFACTURING				
3	INSPECTION				
4	FIELD SERVICE				
5	SALES				
6	ENGINEERING				
7	CONTRACTING				
8	REVISIONS				
9	OTHER				
10	APPROVALS				
11	REVISIONS				
12	REVISIONS				
13	REVISIONS				
14	REVISIONS				
15	REVISIONS				
16	REVISIONS				
17	REVISIONS				
18	REVISIONS				
19	REVISIONS				
20	REVISIONS				
21	REVISIONS				
22	REVISIONS				
23	REVISIONS				
24	REVISIONS				
25	REVISIONS				
26	REVISIONS				
27	REVISIONS				
28	REVISIONS				
29	REVISIONS				
30	REVISIONS				
31	REVISIONS				
32	REVISIONS				
33	REVISIONS				
34	REVISIONS				
35	REVISIONS				
36	REVISIONS				
37	REVISIONS				
38	REVISIONS				
39	REVISIONS				
40	REVISIONS				
41	REVISIONS				
42	REVISIONS				
43	REVISIONS				
44	REVISIONS				
45	REVISIONS				
46	REVISIONS				
47	REVISIONS				
48	REVISIONS				
49	REVISIONS				
50	REVISIONS				
51	REVISIONS				
52	REVISIONS				
53	REVISIONS				
54	REVISIONS				
55	REVISIONS				
56	REVISIONS				
57	REVISIONS				
58	REVISIONS				
59	REVISIONS				
60	REVISIONS				
61	REVISIONS				
62	REVISIONS				
63	REVISIONS				
64	REVISIONS				
65	REVISIONS				
66	REVISIONS				
67	REVISIONS				
68	REVISIONS				
69	REVISIONS				
70	REVISIONS				
71	REVISIONS				
72	REVISIONS				
73	REVISIONS				
74	REVISIONS				
75	REVISIONS				
76	REVISIONS				
77	REVISIONS				
78	REVISIONS				
79	REVISIONS				
80	REVISIONS				
81	REVISIONS				
82	REVISIONS				
83	REVISIONS				
84	REVISIONS				
85	REVISIONS				
86	REVISIONS				
87	REVISIONS				
88	REVISIONS				
89	REVISIONS				
90	REVISIONS				
91	REVISIONS				
92	REVISIONS				
93	REVISIONS				
94	REVISIONS				
95	REVISIONS				
96	REVISIONS				
97	REVISIONS				
98	REVISIONS				
99	REVISIONS				
100	REVISIONS				



TYPE B

No. of Teeth	Spkt. O.D.	Spkt. No.	Part No.	Spkt. Wt. w/o Bush.	C Spkt. Hub Dia.	A Tooth Thickness	Uses Bushing:			
							No.	Stk. Bore ▲		B Lgth. Thru Bore
								Min.	Max.	
14	2.490	TLB414	100500	.4	1 ¹¹ / ₁₆ ●	.284	1008	1/2	1	3/8
15	2.652	TLB415	100501	.4	1 ¹¹ / ₁₆					
16	2.814	TLB416	100502	.5	1 ¹¹ / ₁₆					
17	2.974	TLB417	100503	.5	2 ¹ / ₁₆ ●	.284	1210	1/2	1 1/4	1
18	3.136	TLB418	100504	.7	2 ¹ / ₁₆					
19	3.292	TLB419	100505	.8	2 ¹ / ₁₆					
20	3.457	TLB420	100506	.8	2 ²⁵ / ₃₂ ●					
21	3.618	TLB421	100507	.8	2 ²⁵ / ₃₂					
22	3.778	TLB422	100508	.8	2 ²⁵ / ₃₂					
23	3.938	TLB423	100509	1.2	3					
24	4.098	TLB424	100510	1.5	3 1/4					
25	4.258	TLB425	100511	1.6	3 1/4					

No. of Teeth	Spkt. O.D.	Spkt. No.	Part No.	Spkt. Wt. w/o Bush.	C Spkt. Hub Dia.	A Tooth Thickness	Uses Bushing:			
							No.	Stk. Bore ▲		B Lgth. Thru Bore
								Min.	Max.	
12	2.708	TLB512	100530	.5	1 ¹¹ / ₁₆ ●	.343	1008	1/2	1	3/8
13	2.911	TLB513	100531	.5	1 ¹¹ / ₁₆					
14	3.113	TLB514	100532	.6	1 ¹¹ / ₁₆					
15	3.315	TLB515	100533	.6	2 ¹ / ₁₆ ●	.343	1210	1/2	1 1/4	1
16	3.517	TLB516	100534	.8	2 ²⁵ / ₃₂ ●					
17	3.718	TLB517	100535	1.1	2 ²⁵ / ₃₂ ●					
19	3.919	TLB518	100536	1.2	2 ²⁵ / ₃₂	.343	1610	1/2	1 1/4	1
19	4.121	TLB519	100537	1.3	3					
20	4.321	TLB520	100538	1.4	3 1/4					
21	4.522	TLB521	100539	1.5	3 1/4					
22	4.722	TLB522	100540	1.6	3 1/4					
23	4.923	TLB523	100541	2.2	3 3/4					
24	5.123	TLB524	100542	2.4	3 3/4					
25	5.323	TLB525	100543	2.4	3 3/4					

No. of Teeth	Spkt. O.D.	Spkt. No.	Part No.	Spkt. Wt. w/o Bush.	C Spkt. Hub Dia.	A Tooth Thickness	Uses Bushing:			
							No.	Stk. Bore ▲		B Lgth. Thru Bore
								Min.	Max.	
11	3.005	TLB611	100562	.6	1 ¹¹ / ₁₆	.459	1008	1/2	1	3/8
12	3.249	TLB612	100563	.7	1 ¹¹ / ₁₆					
13	3.493	TLB613	100564	1.1	2 ¹ / ₁₆ ●					
14	3.736	TLB614	100565	1.2	2 ¹ / ₁₆	.459	1210	1/2	1 1/4	1
15	3.978	TLB615	100566	1.4	2 ²⁵ / ₃₂					
16	4.220	TLB616	100567	1.9	3					
17	4.462	TLB617	100568	2.0	3 1/4	.459	1610	1/2	1 1/4	1
18	4.703	TLB618	100569	2.2	3 1/4					
19	4.945	TLB619	100570	2.4	3 1/4					

Tabla 3.3

No. of Teeth	Spkt. O.D.	Spkt. No.	Part No.	Spkt. Wt. w/o Bush.	C Spkt. Hub Dia.	A Tooth Thickness	Uses Bushing:			
							No.	Stk. Bore ▲		B Lgth. Thru Bore
								Min.	Max.	
20	5.186	TLB620	100571	2.5	3 ¹ / ₁₆					
21	5.426	TLB621	100572	2.9	3 ¹ / ₁₆					
22	5.666	TLB622	100573	3.0	3 ¹ / ₁₆					
23	5.907	TLB623	100574	3.2	3 ¹ / ₁₆					
24	6.147	TLB624	100575	3.2	3 ¹ / ₁₆					
25	6.387	TLB625	100576	3.8	3 ¹ / ₁₆					

No. of Teeth	Spkt. O.D.	Spkt. No.	Part No.	Spkt. Wt. w/o Bush.	C Spkt. Hub Dia.	A Tooth Thickness	Uses Bushing:			
							No.	Stk. Bore ▲		B Lgth. Thru Bore
								Min.	Max.	
10	3.678	TLB810	100573	1.2	2 ¹ / ₁₆ ●	.575	1215	1/2	1 1/4	1 1/2
11	4.006	TLB811	100594	1.5	2 ¹ / ₁₆ ●					
12	4.332	TLB812	100595	1.5	3 ●					
13	4.657	TLB813	100596	2.5	3	.575	1615	1/2	1 1/4	1 1/2
14	4.981	TLB814	100597	2.9	3 ¹ / ₁₆					
15	5.304	TLB815	100598	3.0	3 ¹ / ₁₆					
16	5.627	TLB816	100599	3.0	3 ¹ / ₁₆					
17	5.949	TLB817	100600	3.5	3 ¹ / ₁₆	.575	2012	1/2	2	1 1/4
18	6.271	TLB818	100601	4.0	3 ¹ / ₁₆					
19	6.593	TLB819	100602	4.5	3 ¹ / ₁₆					
20	6.914	TLB820	100603	5.5	4 ¹ / ₁₆					
21	7.235	TLB821	100604	6.1	4 ¹ / ₁₆					
22	7.555	TLB822	100605	6.7	4 ¹ / ₁₆					
23	7.876	TLB823	100606	7.2	4 ¹ / ₁₆					
24	8.196	TLB824	100607	7.5	4 ¹ / ₁₆					
25	8.516	TLB825	100608	8.5	4 ¹ / ₁₆					

No. of Teeth	Type	Spkt. O.D.	Spkt. No.	Part No.	Spkt. Wt. w/o Bush.	C Spkt. Hub Dia.	A Tooth Thickness	Uses Bushing:			
								No.	Stk. Bore ▲		B Lgth. Thru Bore
									Min.	Max.	
11	B	5.008	TLB1011	100621	2.7	3	.692	1615	1/2	1 1/4	1 1/2
12	B	5.415	TLB1012	100622	3.1	3 ¹ / ₁₆					
13	B	5.821	TLB1013	100623	3.0	3 ¹ / ₁₆	.692	2012	1/2	2	1 1/4
14	B	6.226	TLB1014	100624	4.0	3 ¹ / ₁₆					
15	B	6.630	TLB1015	100625	5.5	4 ¹ / ₁₆					
16	B	7.034	TLB1016	100626	6.0	4 ¹ / ₁₆					
17	B	7.436	TLB1017	100627	7.0	4 ¹ / ₁₆					
18	B	7.839	TLB1018	100628	7.5	4 ¹ / ₁₆					
19	B	8.241	TLB1019	100629	9.7	4 ¹ / ₁₆					
20	B	8.643	TLB1020	100630	9.8	4 ¹ / ₁₆	.692	2517	1/2	2 1/2	1 1/4
21	B	9.044	TLB1021	100631	10.6	4 ¹ / ₁₆					
22	B	9.444	TLB1022	100632	11.4	4 ¹ / ₁₆					
23	B	9.845	TLB1023	100682	13.2	4 ¹ / ₁₆					
24	B	10.245	TLB1024	100633	14.3	4 ¹ / ₁₆					

No. of Teeth	Type	Spkt. O.D.	Spkt. No.	Part No.	Spkt. Wt. w/o Bush.	C Spkt. Hub Dia.	A Tooth Thickness	Uses Bushing:			
								No.	Stk. Bore ▲		B Lgth. Thru Bore
									Min.	Max.	
12	B	6.498	TLB1212	100396	8.0	3 ¹ / ₁₆	.924	2012	1/2	2	1 1/4
13	B	6.989	TLB1213	100644	6.4	4 ¹ / ₁₆					
14	B	7.472	TLB1214	100645	7.8	4 ¹ / ₁₆	.924	2517	1/2	2 1/2	1 1/4
15	B	7.956	TLB1215	100646	9.6	4 ¹ / ₁₆					
16	B	8.441	TLB1216	100647	10.2	5 ¹ / ₁₆					
17	B	8.923	TLB1217	100648	11.6	5 ¹ / ₁₆					
18	B	9.407	TLB1218	100649	13.2	5 ¹ / ₁₆					
19	B	9.890	TLB1219	100650	15.2	5 ¹ / ₁₆	.924	3020	1/2	3	2
20	B	10.371	TLB1220	100397	16	5 ¹ / ₁₆					
21	B	10.853	TLB1221	100651	18	5 ¹ / ₁₆					
24	B	12.294	TLB1224	100398	24	5 ¹ / ₁₆					

Tabla 3.3 (continuación).

a) Área total calculada = 18.000 mm² (27.90 pg²).

b) el Área para éste método se toma según los requerimientos. Consideremos un tercio del Área total calculada = 6.000 mm² (9.30 pg²).

3.2.1.3 Profundidad de endurecido.

La profundidad de endurecido se toma en base al estándar, bajo las siguientes condiciones:

1.0 Para catarinas de acero de mediano carbono (ej. 1038 o 1045) utilizar endurecimiento superficial localizado (por flama o por inducción).

1.1 Calentar el diente por inducción o por flama.

1.2 Obtener una dureza de 35 a 50 Rc. Revenir por 2 horas a una temperatura mínima de 240 °C (400 °F) dentro de las cuatro horas siguientes al endurecimiento.

1.3 El patrón de calentamiento debe de ser igual al que se muestra en la figura 3.2 (no requiere endurecimiento en la base del diente).

Siguiendo dicho patrón se puede considerar que con una profundidad de endurecido de aproximadamente 1 mm. será suficiente para darle a la pieza resistencia al uso (desgaste).

Con el dato del Área calculamos el volumen total de material que se va a endurecer. El volumen es igual al Área por la profundidad de endurecido, 1 mm. Entonces:

a) volumen de acero a calentar = 18.00 cm³.

b) volumen de acero a calentar = 6.00 cm³.

También se puede saber el dato del peso en kilogramos de material que se va a calentar, y como ya sabemos el volumen, solo lo multiplicamos por la densidad del acero. Este dato lo sacamos de tablas. La densidad del acero al carbono 1045 es de 7.90 gr/cm³. Entonces, el peso es igual a:

a) peso = w = 18.00 * 7.90 = 142.20 gr. = 0.142 kg.

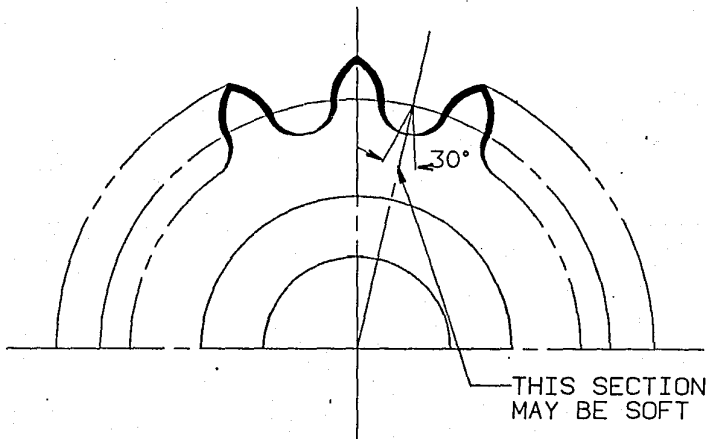
b) peso = w = 6.00 * 7.90 = 47.40 gr. = 0.047 kg.

1.0 Localized hardening (Flame or Induction) heat treat procedure for medium carbon steel sprockets (i.e. 1038 to 1045)

1.1 Induction or flame heat the teeth.

1.2 Quench and temper to a surface hardness of 35 to 50 R_C. Temper for two hours at a minimum temperature of 400°F (204°C) within 4 hours of hardening.

1.3 Hardening pattern should be as shown in Figure 1.



HARDEN TEETH TO R_C 35-50 ON 80% OF TOOTH FLANK. NO REQUIRED HARDNESS ON BOTTOM DIA.

FIGURE 1

				PART HARDENING SPECIFICATION FOR SPROCKET TEETH			
DRAWN BY <i>EMR</i>		CHECKED BY		APPROVED BY <i>R. D. ...</i>		SUPERVISOR	
DATE 1-15-85		DATE 1-15-85		DATE 1-15-85			
REV. NO.	BY	DATE	APP'D BY	REVISION			
DODGE MASTER REEVES RELANCE ELECTRIC				STANDARDS NUMBER S247			

3.2.2 Selección de la frecuencia.

Para hacer un cálculo aproximado de la frecuencia del equipo, sacamos el perímetro de la pieza ya que el inductor tendrá que ser circular para una mayor eficiencia. De la figura 3.1 sacamos que el perímetro es de 420 mm. Con ese dato observamos la tabla 2.10. La línea punteada nos indica que para obtener el máximo de eficiencia, la frecuencia debe tener un valor entre los 10 000 y 500 000 Hz, lo que quiere decir que cualquier frecuencia que seleccionemos entre dicho rango nos dará una eficiencia alrededor del 80%. Además, como indica la tabla 2.11, es posible lograr la profundidad de penetración de 1 mm. con 10 000 Hz en adelante.

Para hacer la selección final hay que tomar en cuenta que entre más nos acerquemos a la frecuencia superior, será más eficiente nuestro equipo. Al mismo tiempo, un equipo de menor frecuencia es más económico. Considero que una frecuencia que cumple con las dos condiciones es:

$$f = 100\ 000\ \text{Hz.}$$

Para el caso de la selección de la frecuencia no es necesario hacer la distinción entre los dos métodos, ya que el dato que interviene en la selección es la profundidad de penetración que necesitamos, por lo tanto, para ambos la frecuencia será la misma.

3.2.3 Cálculo de la potencia.

El calentamiento de cualquier material depende de una característica del método que empleemos, llamada densidad de potencia. La densidad de potencia es la cantidad de kW que se transfieren al material conductor por unidad de área. La tabla 3.4 nos muestra las densidades de potencia que utilizan los diferentes métodos de calentamiento y en la tabla 2.11 están los datos más exactos del método de inducción, dependiendo de la frecuencia.

Para hacer la selección de un equipo, es importante saber los requerimientos de producción que tiene la planta, ya que con esos datos estaremos en la capacidad de calcular el tiempo del cual vamos a disponer para sacar la producción adelante en el término necesario.

Para calcular la potencia del equipo se multiplica la densidad de potencia por el área que se va a calentar y consideramos un 80% de eficiencia.

Procedimiento	Densidad de potencia
Convección	5 a 10 kW/m ²
Radiación	10 a 100 kW/m ²
Calentamiento por resistencia	20 a 30 kW/m ²
Calentamiento dieléctrico	0,1 a 0,2 kW/cm ²
Calentamiento por inducción	5 a 15 kW/cm ²
Calentamiento por arco	100 kW/cm ²
Calentamiento por bombardeo electrónico	100 000 kW/cm ²

Tabla 3.4 Densidades de potencia que se utilizan.

Basándonos en la tabla 2.11, para una frecuencia de hasta 500 kHz y una profundidad de endurecido de 1 mm. tenemos que la energía óptima de entrada es de 15.5 W/mm² y con el dato del área calentada a un tiempo, que calculamos para cada catarina, tenemos lo siguiente:

- a) Área calculada = 18 000 mm²
 densidad de potencia = 15.5 kW/mm²
 eficiencia = 80%

Potencia necesaria = 350 kW

- b) Área calculada = 6 000 mm²
 densidad de potencia = 15.5 kW/mm²
 eficiencia = 80%

Potencia necesaria = 115 kW

Estas cantidades pueden variar dependiendo de la capacidad instalada y las necesidades de producción que se tengan.

3.2.4 Duración del calentamiento.

Es casi imposible predecir el tiempo exacto de calentamiento y enfriamiento para cada pieza si no se conocen las especificaciones exactas del material y cuál será la microestructura que se someterá al equipo de calentamiento. El fabricante nos da una aproximación a estos datos. Los muestro en las dos páginas siguientes.

TUCKER INDUCTION SYSTEMS LTD.
6070 Well Street
Sterling Heights, Michigan 48077-1807
(313) 630-2000 - FAX (313) 929-7449

July 25, 1989

Buena de Mexico
Calle A No. 170
El Salto Jalisco
Mexico 45680

Attn: Hector Gonzalez

Subject: Tucker Quotation 890523-1A

Dear Sr. Gonzalez:

Pursuant to your fax dated July 24, 1989, Tucker Induction is pleased to submit the following information in answer to your questions.

1. **Power Consumption:** Maximum KW-hour consumption is to be 267. This figure is based upon full power delivered continuously. Your application shall have at least a 50% duty cycle. Actual power consumption will vary depending upon the diameter and thickness of the gear.
2. Predicting exact heat and quench times for specific gears is nearly impossible without knowing exact material specifications and what microstructure is going to be submitted to the equipment at the time of heat treatment. For example, a coarse grain steel will require a long heat time at lower power to ensure all carbon is transformed into solid solution, as compared to a fine grain steel. The following is an approximation of the heat and quench times for the largest and smallest sprocket.

Smallest Part
TLB 414 - 100500

Heat Time
8 Seconds

Quench Time
16 Seconds

Largest Part
TLB 1224 - 100398

Heat Time
13 Seconds

Quench Time
30 Seconds

All other parts should fall in the range in between these parts.

3. Dimensions and weights of the equipment (approximately):

A. 100KW - R.F. Generator

1. 72" Wide
2. 94" Deep
3. 84" High
4. 7,100 lbs. weight

B. De-Ionized Water System and Quench System

1. 48" Wide
2. 36" Deep
3. 84" High
4. 1,800 lbs. weight

C. Ventricle Scanner

1. 60" Wide
2. 20" Deep
3. 90" High
4. 3,400 lbs. weight

D. Machine Control Panel

1. 36" Wide
2. 12" Deep
3. 72" High
4. 1,000 lbs. weight

We trust that the enclosed information meets with your approval. Should you require further information, please feel free to contact our sales representative, Mr. Gustavo Guerrero, or us at any time. Thank you.

Very Truly Yours,

TUCKER INDUCTION SYSTEMS, LTD.

Donald A. Wiseman

Sales/Service Manager

44

cc: J. Tucker
D. Beatin
G. Guerrero

3.3 Equipo.

El siguiente es el equipo que cada uno de los dos métodos requiere. Los identifico al método de un sólo tiempo con la letra A, y al método progresivo con la letra B.

Fuente de energía.

- A. Generador de radio frecuencia (100 kHz) de 350 kW con:
 - a. Tubo oscilador.
 - b. Terminal frontal de control de potencia de estado sólido.
 - c. Interruptor.
 - d. Rectificadores de estado sólido.
 - e. Transformador.
- B. Un generador de radio frecuencia (100 kHz) de 100 kW. Los demás componentes son iguales a los que utiliza el método de calentamiento a un sólo tiempo.

Sistema de refrigeración.

- A y B. Sistema de recirculación de agua deionizada:
 - a. Tanque de acero inoxidable.
 - b. Bomba de 3600 rpm.
 - c. Intercambiador de calor.
 - d. Válvula de control de temperatura.
 - e. Detector del nivel del agua.
 - f. Tubería no ferrosa.

Sistema de enfriamiento.

- A. Sistema de recirculación del agua de enfriamiento:
 - a. Tanque de acero inoxidable.
 - b. Bomba de 3600 rpm.
 - c. Intercambiador de calor.
 - d. Válvula de control de temperatura.
 - e. Detector del nivel del agua.
 - f. Tubería no ferrosa.
- B. Los componentes son los mismos que para el método de un sólo tiempo, sólo que el tanque de agua será de menor capacidad y la pieza no caerá en el agua sino que el agua será proyectada a la pieza desde unos tubos situados a un lado del inductor.

Sistema de sujeción de la pieza:

- A. Para la sujeción de la pieza durante el calentamiento se utiliza el mismo sistema de sujeción de alimentación automática, por lo tanto, no requiere de una instalación especial.

B. Tiene los siguientes elementos:

- a. Eje sencillo con movimiento vertical.
- b. Husillo con motor cd.
- c. Tanque con puerta corrediza.
- d. Switches limitantes de viaje.
- e. Motor y Bomba para el retorno del agua.
- f. Sistema de control numérico y controles programables.
- g. Múltiple con válvula solenoide y de control de flujo.

Inductores.

A. Utiliza inductores sencillos, formados de tubo de cobre.

B. Utiliza unos inductores parecidos a los anteriores, sólo llevan montados unos tubos de cobre adicionales por los que circula el agua de enfriamiento.

Es muy difícil la fabricación en la planta del equipo que acabo de mencionar, ya que no se cuenta con la tecnología, el factor humano, los recursos ni el tiempo necesarios. Entre otras cosas, sería preciso diseñar los elementos de la estación de trabajo, la instalación eléctrica, los componentes electrónicos y conocer los fenómenos eléctricos asociados al sistema de inducción. Por lo tanto, será necesario encargar la fabricación del equipo a alguna empresa especializada en ello, que cuente con los elementos y las instalaciones para realizar los cálculos.

3.4 Equipo de alimentación del sistema.

El equipo de calentamiento cuenta con un sistema de autocontrol a través de un ordenador, por lo que hace factible la automatización del tratamiento térmico. Queda ahora diseñar el sistema de alimentación del sistema. La automatización del proceso hará que éste sea mucho más rápido, más eficiente y desde luego, más económico.

La automatización se puede realizar a través de una máquina activada por un controlador programable (ya se cuenta con él en la planta) que es capaz de reconocer 16 entradas y 16 salidas, recibiendo y emitiendo pulsos eléctricos que activarán o desactivarán alguna parte del proceso. Las entradas son reconocidas a través de microswitches colocados al final de cada recorrido de cualquier parte mecánica. Las figuras 3.4A, 3.4B y 3.5 representan la vista lateral de la posición 1, la de la posición 2 y la vista en planta, respectivamente, de la máquina diseñada para realizar la alimentación automática del equipo de inducción. La tabla 3.5 es una relación del material necesario para armarla.

M. Mesa principal.

- Lámina de acero de 8 mm. de espesor para la superficie y la hendidura.
- 4 patas con cuadrado de 38 mm.

P. Plancha de acero.

- Placa de acero de 5.7 cm de espesor (se puede elaborar la plancha con lámina de 8 mm. y con soportes internos para que no ceda al peso de la pila de catarinas), con una cavidad de aproximadamente 27 cm. de diámetro y 5 cm. de profundidad.
- 4 rodamientos con resistencia a 100 kg. de fuerza unidos a la plancha por ejes de acero de 1.5 cm. de diámetro.

P'. Moldes de madera.

- Moldes hembra de madera de todos los diámetros necesarios para alojar las piezas.

R. Rieles.

- 2 Tramos de 1.10 m. c/u. de riel.

C1. Cilindro neumático.

- Cilindro de 8 mm. de diámetro, 30 cm. de carrera y con vástago de 2 cm. de espesor.

C. Placas.

- 2 placas de acero de 3 X 52 X 0.80 cm.

G. Guías.

- Tramos de cobre de diferentes diámetros según el paso de los dientes que se van a tratar.

E. Electroimán.

- 1 electroimán capaz de soportar hasta 20 kg. de peso.

C2 y C3. Cilindros.

- Cilindros neumáticos con 70 y 150 mm. de carrera respectivamente y vástago de 10 mm. de diámetro.

Tabla 3,5 Componentes del equipo de alimentación.

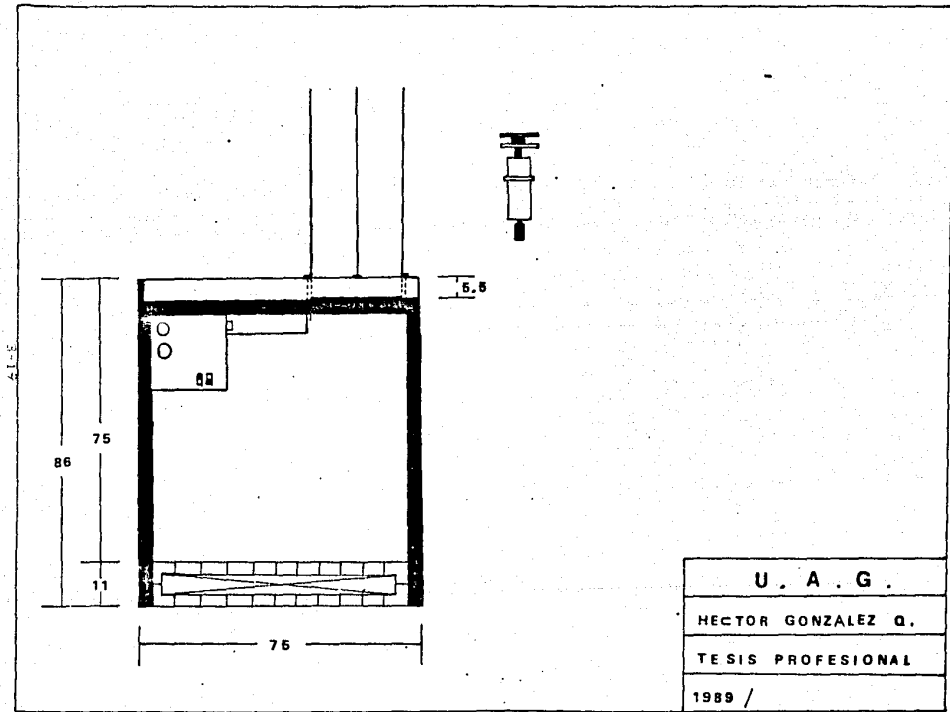


FIG. 3.4A

3.4.1 Funcionamiento.

Para comenzar, se asume que las piezas vienen de la operación anterior, lavado, a través de una banda sinfin y que son depositadas en una tolva vibratoria que acomode las catarinas apiladas en el espacio A del dibujo. Las catarinas van a estar apoyadas sobre una plancha de acero P, la cual tendrá un movimiento horizontal en dirección al inductor I, sostenida por cuatro rodamientos guiados por un par de rieles R.

La figura 3.4a representa la posición 1. La plancha de acero P tiene en el extremo, exactamente abajo de la pila de catarinas, una cavidad en la cual cabe un molde de madera P' removible con un diámetro exactamente igual al de la pieza que se está trabajando. En esta posición 1 cae solo una catarina al molde P'. Se activa una señal que hace que la placa se deslice a la posición 2 (fig. 3.4b) por medio de un cilindro neumático C1. Para evitar que las catarinas apiladas se muevan siguiendo la trayectoria de la plancha P, es necesario detenerlas con un par de placas de acero C y unas guías G que permiten que la pila permanezca derecha. Tanto las guías G como las placas C se deben ajustar al diámetro de la pieza que se esté trabajando.

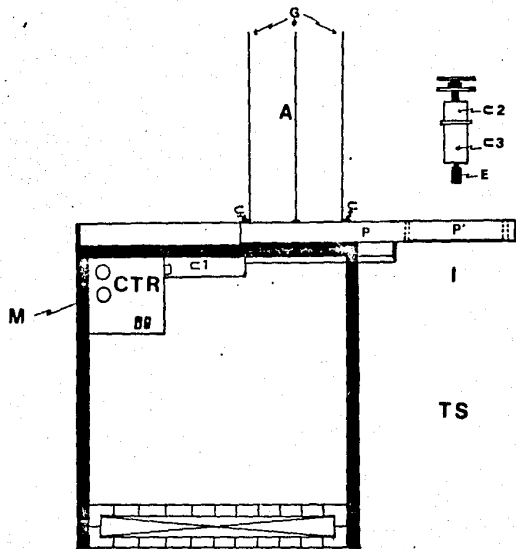
Sobre el inductor I se encuentran colocados dos cilindros C2 y C3 en cuyo extremo está instalado un electroimán E. Ambos se encuentran sostenidos de una estructura metálica fija.

En la posición 2 el cilindro C2 baja, y al tocar la pieza, el electroimán E se activa y atrae la pieza. En ese momento se regresa el cilindro C2 a su posición inicial y la plancha regresa a la posición 1. Cuando la plancha llega a su tope, se vuelve a activar el cilindro C2, además del cilindro C3, logrando así que la catarina alcance el inductor I. Al hacerlo se activa el sistema de inducción calentando la pieza en segundos..

El siguiente paso dependerá del método de calentamiento que se esté utilizando:

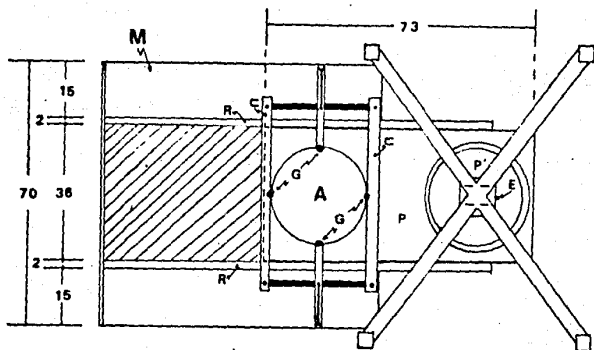
+ En el método de calentamiento a un sólo tiempo, la pieza se sostiene con el electroimán E dentro del inductor I hasta que la pieza alcanza la temperatura deseada (el ordenador del equipo de inducción está programado para que deje las piezas expuestas a la inducción el tiempo necesario según su diámetro y su grosor). Al terminar de calentar, se desactiva el electroimán E haciendo que la pieza caiga en una tina de agua que estará colocada en el espacio TS.

Naturalmente, la temperatura del agua tiende a aumentar debido a la continua inmersión de piezas calientes. Para



U . A . G .
HECTOR M. GONZALEZ O.
TESIS PROFESIONAL
1989 /

FIG. 3.4B



U . A . G .
HECTOR M. GONZALEZ Q.
TESIS PROFESIONAL
1989 /

FIG. 3.5

mantener siempre una temperatura entre 20 y 30 °C, que es la ideal para lograr los efectos de endurecimiento deseados, la capacidad que necesita tener la tina es de aproximadamente 350 lts. Y para poder mantener una temperatura uniforme en el interior de la tina y ayudar a la disipación del calor, es necesario incluir un sistema recirculatorio, un dissipador de calor y un agitador. La figura 3.6 ilustra un esquema de la situación.

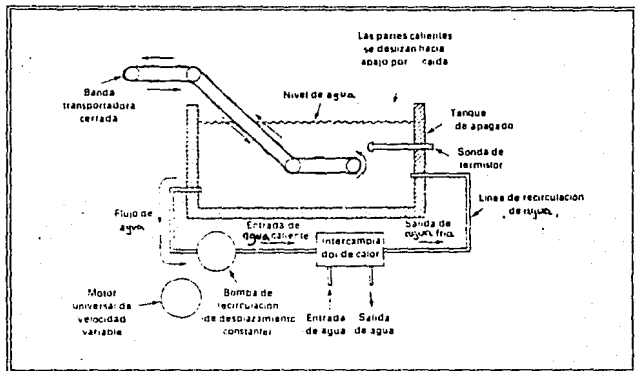


Figura 3.6 Tina de enfriamiento.

Un tubo de salida permite que el agua fluya fuera del tanque y hacia una bomba de recirculación de desplazamiento constante. Una bomba de desplazamiento constante mueve un volumen constante de líquido en cada revolución, de modo que la velocidad de rotación de la bomba determina cuánta cantidad de agua recircula a través del sistema de enfriamiento. La salida de la bomba comunica con un intercambiador de calor refrigerado por agua. Del intercambiador de calor, el agua regresa a la tina.

El motor que maneja la bomba de recirculación es un motor universal serie, capaz de operar bien sea con ac o con dc. El promedio del voltaje aplicado a las terminales del motor determina su velocidad de rotación. Dado que el motor maneja la bomba, la velocidad de rotación del motor determina la cantidad de agua recirculante y de este modo determina la cantidad de enfriamiento que tiene lugar. A medida que aumente la velocidad del motor, más agua recircula, y la temperatura en la tina tiende a disminuir. A medida que el motor disminuye su velocidad, menos agua recircula y el aceite en el tanque tiende a calentarse. La velocidad del

motor la va a determinar el circuito de la figura 3.7, que captará la temperatura de la tina por medio de un termistor y según esté ésta, será como variará la velocidad de rotación del motor.

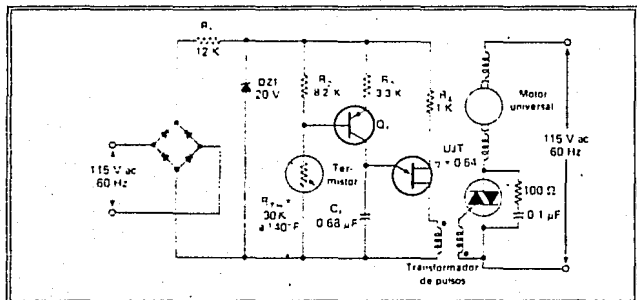


Figura 3.7 Circuito electrónico.

Una vez enfriadas, se pueden extraer las piezas de la tina por medio de otra banda sin fin sobre la cual caigan. Hay que tomar en cuenta que la banda tiene que tener un movimiento lento que permita que la pieza tenga un enfriamiento uniforme, pero al mismo tiempo se tiene que cuidar que no le caiga encima la siguiente pieza, lo cual podría provocar una deformación o agrietamiento de las piezas. Otra solución sería que las sacara el operador.

+ En el método de calentamiento progresivo, el cilindro C3 depositará la catarina sobre la base del eje que la moverá en sentido vertical a través del inductor y conforme vaya calentando, va a ir lanzando agua para el enfriamiento, logrando que cuando termine el tratamiento, la pieza ya esté en condiciones de ser removida del lugar por el operador.

Una vez que se realiza el calentamiento, el juego de cilindros C2 y C3 regresan a su posición inicial y comienza de nuevo el ciclo.

El controlador CTR será el encargado de mantener en funcionamiento a la máquina. Todo lo anterior va montado sobre una mesa M de cuatro patas que tiene una hendidura en la superficie por la cual se va a deslizar la plancha de acero P.

La preparación total del equipo y el manejo del controlador de la máquina está expuesto en la sección 5.1.

En la tabla 3.6 muestro la secuencia de operaciones de la máquina, en forma de diagrama, a fin de facilitar la visualización del proceso.

1. Cae una catarina en el molde de la plancha.
2. Recorrer la plancha hacia la posición 2.
3. Bajar un cilindro hasta la catarina.
4. Activar el electroimán para atraer la catarina.
5. Regresar el cilindro a su posición inicial.
6. Regresar la plancha a la posición 1.
7. Recorrer los dos cilindros que sostienen la pieza.
8. Bajar la pieza hasta que quede dentro del inductor.
9. Activar inductor de calentamiento.
10. Desactivar el electroimán.
11. Regresarlo al inicio.
12. Recuperar la pieza.
13. Inicia el ciclo de nuevo.

Tabla 3.6 Secuencia de operaciones de la alimentación.

3.5 Calentamiento progresivo contra calentamiento a un sólo tiempo.

Ambos sistemas de calentamiento, el progresivo y el de un sólo tiempo tienen ciertas ventajas. La siguiente comparación está basada en el endurecimiento de una flecha de 38 mm de diámetro con una longitud de 254 mm y que requiere una profundidad de endurecido de 3.81 mm conteniendo 50% de martensita. El material es acero SAE 1040 y se usa agua para el enfriamiento. La producción es de 300 piezas por hora.

Para el calentamiento progresivo se requiere de una potencia cerca de los 122 kW, con avance de 12.7 mm/s. La tabla 3.7 presenta un ciclo típico de un calentamiento

progresivo cargado manualmente. Basado en este ciclo, con dos ejes de sujeción, se pueden endurecer dos partes a la vez y operando alternativamente, se requeriría producir 300 flechas por hora. Estos dos ejes necesitarían 244 kW de potencia cada uno o esta misma cantidad de potencia con interrupciones entre los dos.

Considerando el calentamiento a un sólo tiempo para la misma pieza, se requerirán cerca de 300 kW, con un tiempo de calentamiento de 5 segundos. Para esta clase de calentamiento es necesaria una máquina de balancín con tres ejes rotatorios. La pieza se calienta en el primer eje y se transfiere al segundo y al tercero para el enfriamiento. Aún cuando el tiempo de calentamiento es relativamente corto, el tiempo de enfriamiento de la segunda estación es casi tres veces más largo para un adecuado enfriamiento sin ningún efecto en el templado durante la demora por la transferencia entre enfriamiento y enfriamiento. La tasa de producción con una máquina de balancín utilizando 300 kW de potencia a 10 Hz sería de 300 piezas por hora.

Este proceso requiere que las flechas sean uniformes en diámetro para permitir una alimentación con rodillos alimentadores excluyendo piezas con ceja, rebordes o aumentos de diámetro. Con un calentamiento continuo la misma pieza se puede procesar a ritmo de una cada 20 segundos, o 180 piezas por hora, utilizando una potencia de 122 kW a 10 kHz y eliminando la carga, descarga y tiempos de transferencia.

Progresivo		A un sólo tiempo	
carga manualmente			
Función	Tiempo, s	Función	Tiempo, s
Carga	5	Balancín	2*
Preparación 1	6	Centrado	1*
Calent. progres.	20	Retardo de calent.	3
Enfriamiento	8	Estación 1 de calor	5
Preparación 2	4	Estación 2 enfriam.	8*
Descarga	5	Estación 3 enfriam.	8
		Descarga	1*
Tiempo total del ciclo	48	*Tiempo total del ciclo	12
Partes producidas	75/h	Partes producidas	300/h

* Sólo se toma en cuenta el tiempo que tarda en procesarse una pieza de otra.

Tabla 3.7 Ciclo típico de calentamiento progresivo.

3.6. Control.

3.6.1 Control de calidad.

Con el método actual de la flama oxiacetilénica se deben muestrear los lotes y someter las muestras al durómetro a fin de asegurar la calidad del endurecido.

Pero con el equipo de inducción es factible controlar variables como la potencia que le transfiere el transformador a la pieza. Dichos datos se pueden ir detectando pieza por pieza con la ayuda de métodos electrónicos. El equipo que se ofrece en el mercado es el siguiente:

+ Monitor de radio frecuencia de energía/kilowatt.

Dicho equipo monitorea los kilowatts/seg. que recibe la pieza. Con esto se puede asegurar la calidad total del lote y la dureza exacta de la pieza.

3.6.2 Control del proceso.

Para representar la relación entre la profundidad de la dureza y el tiempo de calentamiento de varias densidades de potencia y varios aceros, se pueden utilizar las gráficas para obtener una aproximación razonable de los requerimientos del ciclo.

Se pueden realizar otras estimaciones de los resultados de partes similares o mediante una observación cuidadosa de la misma parte cuando está siendo calentada. Sin embargo, el ciclo final generalmente se determina por experimentación.

Después de que se ha endurecido una parte con un arreglo experimental, se hace una inspección de la dureza y de rajaduras. Después se corta transversalmente y se checa la especificación de profundidad del endurecido. La dureza, la profundidad del endurecido y la microestructura deben coincidir con los estándares, y se checa para ver si no tiene rajaduras. Entonces se ajusta el ciclo de acuerdo a los resultados obtenidos.

Este procedimiento tal vez se facilitaría considerablemente con la ayuda de un controlador-grabador de alta velocidad además con un par térmico o un equipo especial de radiación. Estas unidades son diseñadas para dar un mínimo de inercia en la respuesta, y por lo tanto, grabar y controlar con una aceptable aproximación la temperatura de la superficie de la pieza a una velocidad normal.

Una vez que se ha determinado el ciclo de endurecimiento, el control de la producción se lleva a cabo por repetición del ciclo experimental automáticamente, con respecto al tiempo de calentamiento o la temperatura, la densidad de energía, el retardo entre el calentamiento y el enfriamiento y el ciclo de enfriamiento. En suma, las piezas son chequeadas periódicamente por exámenes metalúrgicos de la estructura, profundidad superficial y dureza.

CAPITULO CUATRO

EVALUACION DEL PROYECTO

EVALUACION DEL PROYECTO.

4.1 Preliminares.

Ya que tecnológicamente no existe impedimento alguno para llevar a cabo el proyecto, ahora toca la parte de análisis económico que pretende determinar cuál es el monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto, cuál será el costo total de operación, qué sistema es más atractivo económicamente, así como otra serie de indicadores que servirán de base para la parte final y definitiva del proyecto, que es la evaluación económica.

Debido a que técnica y económicamente no es factible fabricar el equipo de calentamiento por inducción en la misma planta, recurri a la empresa TUCKER INDUCTION SYSTEMS LTD. con base en Sterling Heights, Michigan, que se especializa en la fabricación de equipos de inducción, para que cotizara el equipo necesario. No fue posible encontrar algún otro fabricante a fin de poder comparar precios debido a lo altamente especializado del equipo en cuestión.

En este estudio económico voy a hacer la comparación sobre los costos de operación de cada sistema, el actual y el propuesto, ya que no se puede hacer la comparación sobre la inversión inicial porque el sistema actual carece de ella y por tratarse de un equipo fabricado enteramente en la planta, su vida útil se puede decir que es ilimitada, lo cual hace que el valor inicial del equipo propuesto haga parecer a éste menos ventajoso.

Entonces, a fin de conocer la viabilidad del proyecto, la evaluación se realiza sobre el período de recuperación de la inversión a valor presente para el equipo de inducción considerando que el capital es propio.

Como existen 60 tipos diferentes de catarinas que van a recibir el tratamiento térmico, con diámetros y espesores diferentes, es muy difícil hacer un estudio económico para cada una de ellas, por lo tanto, para saber el precio de venta y el volumen de producción, se saca un promedio de entre todos los tipos. Los promedios son:

- a) Se procesan un total de 4600 piezas por mes.
- b) Su precio de venta es de \$ 22,500 cada una.
- c) El costo de producirla es de \$ 18,900.
- d) Con el sistema actual, el costo que se le agrega por el tratamiento térmico es de \$ 3,329.
- e) Entonces, el costo de producirla antes del tratamiento térmico es de \$ 15,571.

Para hacer los cálculos se considera que:

1. Un turno es de 8 horas/hombre.
2. Una semana es de 5 días/hombre.
3. Un mes consta de 22 días/hombre.
4. Un año se compone de 12 meses.

4.2 Cotizaciones.

Como la cotización es en dólares americanos, para hacer la conversión tomé el valor de \$ 2,500 por dólar.

El valor inicial del equipo tomando en cuenta los impuestos es el siguiente:

371,750	Valor en dólares americanos.
X 2,500	Valor en pesos de un dólar.

929,375,000	Valor en moneda nacional.
+ 15.00 %	Impuesto aduanal.
+ 0.06 %	Derechos aduanales.
+ 15.00 %	I.V.A.

1,213,763,750	Inversión inicial.

Las cotizaciones se encuentran en las páginas siguientes.

Las condiciones de pago son las siguientes:

- 50% Al colocar la orden de pedido.
- 50% Al recibir el equipo en Laredo Texas.

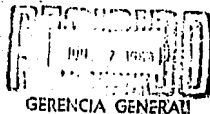
Sólo se pueden hacer cancelaciones por parte del ordenante con el consentimiento por escrito de Tucker Induction Systems, Ltd. y con la aplicación de los siguientes cargos:

- 60% Después de 30 días desde la fecha en que se aceptó el pedido original.
- 90% De 31 a 90 días desde la fecha en que se aceptó el - pedido original.
- 100% Después de 90 días desde la fecha en que se aceptó el pedido original.

El tiempo de envío está basado en los compromisos que tenga su departamento de ingeniería y manufactura, pero un tiempo estimado de envío puede ser de 20 a 24 semanas.



TUCKER INDUCTION SYSTEMS LTD.
6070 Wall Street
Sterling Heights, Michigan 48077-1807
(313) 939-2400 - FAX (313) 939-7449



May 23, 1989

Dodge de Mexico
Calle A No. 170
El Salto Jalisco
Mexico 45680

Subject: Induction Heating Equipment to Heat Treat Gears

Reference: TIS Quotation #890523-1A

Dear Sir:

Pursuant to the request of our representative, Ing. Gustavo Guerrero, Tucker Induction Systems is pleased to submit the following quotation for your review. The following is a list of your parts which can be heat treated with the proposed equipment.

SPROCKET #	PART #	SPROCKET #	PART #
TLB414	100500	TLB418	100504
TLB415	100501	TLB419	100505
TLB416	100502	TLB420	100506
TLB417	100503	TLB421	100507
TLB422	100508	TLB1212	100396
TLB423	100509	TLB1213	100644
TLB424	100510	TLB1214	100645
TLB425	100511	TLB1215	100646
TLB1011	100621	TLB1216	100647
TLB1012	100622	TLB1217	100648
TLB1013	100623	TLB1218	100649
TLB1014	100624	TLB1219	100650
TLB1015	100625	TLB1220	100397
TLB1016	100626	TLB1221	100651
TLB1017	100627	TLB1224	100398
TLB1018	100628		
TLB1019	100629	TLB512	100530

SPROCKET #	PART #	SPROCKET #	PART #
TLB1020	100630	TLB513	100531
TLB1021	100631	TLB514	100532
TLB1022	100632	TLB515	100533
TLB1023	100682	TLB516	100534
TLB1024	100633	TLB517	100535
TLB611	100562	TLB518	100536
TLB612	100563	TLB519	100537
TLB613	100564	TLB520	100538
TLB614	100565	TLB521	100539
TLB615	100566	TLB522	100540
TLB616	100567	TLB523	100541
TLB617	100568	TLB524	100542
TLB618	100569	TLB525	100543
TLB619	100570		

Heat Treat Specification 5247 is the applicable specification. The hardness specification can be met provided the gear (sprocket) has sufficient carbon content and a pearlitic microstructure is present within the material at time of heat treat.

The equipment shall be capable of hardening 6000 pieces per month with lot sizes of approximately 80 pieces. Some of the larger sprockets (for example TLB1224) will need to be progressively heated in order to reduce power requirements.

PROPOSED EQUIPMENT

Item 1 A 100-Kilowatt Radio Frequency Generator with the
 Qty 1 following features:

- A. Single Oscillator Tube design
- B. Solid State Front-end power control
- C. Full meter compliment
 - 1. Grid current
 - 2. Plate current
 - 3. Plate volts
 - 4. Tank current
 - 5. Filament hours
- D. Circuit breaker on incoming line
- E. Water flow, temp. and pressure protection
- F. Solid state rectification
- G. Integral load matching transformer

Price for R.F. Generator.....\$147,340.00

Item 2 De-Ionized Water Recirculating System with the
Qty 1 following features:

- A. Stainless steel tank
- B. All bronze pump with 3600 rpm motor
- C. Combination motor starter
- D. Heat exchanger
- E. Temperature control valve
- F. Sight level gauge
- G. Non-ferrous plumbing

Price for De-Ionized Water System.....\$ 13,350.00

Item 3 Quench Recirculating System with the following
Qty 1 features:

- A. Stainless Steel Tank
- B. Bronze fitted pump with 3600 rpm motor
- C. Combination motor starter
- D. Heat Exchanger
- E. Temperature control valve
- F. Sight level gauge
- G. Non-ferrous plumbing
- H. Pressure relief valve

Price for Quench System.....\$ 14,550.00

Item 4 Verticle Scanner with the following features:
Qty 1

- A. Single Spindle Design
- B. Ball screw drive with D.C. motor
- C. Tank with sliding door
- D. Overtravel limit switches
- E. Sump pump for quench return with float switch for level control
- F. Numerical control system to facilitate set up
- G. Programmable controller based machine controls
- H. A.C. motor type rotation
- I. Quench manifold with solenoid valve and flow control valve
- J. Eighteen (18) inch vertical stroke

Price for Scanner.....\$ 83,655.00

Item 5 Bus Bar Adapter for attaching Induction Coils
Qty 1 to the R.F. Generator output.

Price for Bus Bar.....\$ 2,995.00

Item 6 Induction Hardening Coils for Heat Treating
Qty sprockets
(as shown)

A. ASA-40 Sprockets (four coils)	\$ 2,680.00
B. ASA-100 Sprockets (seven coils)	\$ 2,790.00
C. ASA-120 Sprockets (six coils)	\$ 2,785.00
D. ASA-50 Sprockets (seven coils)	\$ 2,785.00
E. ASA-60 Sprockets (four coils)	\$ 3,000.00

Item 7 Quench Assembly for Quenching heated parts
Qty for hardening
(as shown)

A. ASA-40, 50, and 60 (one req'd)	\$ 3,150.00
B. ASA-100 and 120 (2 size req'd)	\$ 3,540.00

Item 8 Engineering Package which includes:
Qty Lot

- A. Instruction manuals
- B. Electrical schematics and diagrams
- C. Run-off and approval on our floor
- D. Plant layout drawing

Price for Engineering.....\$ 16,950.00

TOTAL PACKAGE.....\$366,925.00

Item 9 Tucker Induction Model KEM-2000 Radio Frequency
Qty 1 Kilowatt Energy Monitor to help ensure proper
heat treatment by monitoring the Kilowatt/Seconds
introduced into the part. See spec. sheet for
details:

Price for Monitor.....\$ 4,825.00

TOTAL PACKAGE.....\$371,750.00
with option

SERVICE

The quoted price does not include any installation in the purchaser's plant. Installation of the proposed equipment shall be the purchaser's responsibility. Installation instruction and services of a field service engineer can be supplied to inspect your installation and to assist in the start-up. Service time is available at our standard rate of \$600.00 per day plus travel and living expenses. Price is based upon work performed Monday thru Friday 8:00a.m. to 4:30p.m. Overtime and Saturday work would be charged at \$900.00 per day while Sunday and holiday work would be charged at \$1,220.00 per day.

TERMS OF PAYMENT

- 50% On placement of purchase order
- 50% At time of delivery to the broker in Laredo, Texas

*All prices are quoted in U.S. Dollars and do not include taxes, tariff or fees.

CANCELLATION

Orders accepted by Tucker Induction Systems, Ltd. can be cancelled by the purchaser only with written consent of Tucker Induction Systems, Ltd. and if such consent is granted, then the following cancellation charges shall apply:

- 60% After 30 days from date of acceptance of original purchase order
- 90% From 31 days to 90 days from date of acceptance of original purchase order
- 100% After 90 days from date of acceptance of original purchase order

SHIPMENT

All items shipped F.O.B. Tucker Induction Systems, Ltd., Sterling Heights, Michigan. No freight allowed.

PRICE

The prices herein are firm and this quotation is for acceptance within 60 days of this date, after which it will be subject to reconsideration and possible revision.

DELIVERY

Based upon present engineering and manufacturing schedules, estimated shipment of the equipment can be made in 20 to 24 weeks. Firm delivery shall be specified upon acceptance of a formal purchase order and down payment.

We trust the enclosed information meets with your approval. Should you have any questions or require more information, please feel free to contact our representative, Mr. Gustavo Guerrero at anytime. We appreciate the opportunity to quote your induction heating requirements.

Very Truly Yours,

TUCKER INDUCTION SYSTEMS, LTD.

Donald H. Wiseman

Donald H. Wiseman
Sales/Service Manager

ss

cc: J. Tucker
D. Martin
G. Guerrero

4.3 Comparación de costos anuales de operación (C.A.O.).

Primeramente entiéndase por costo: "La suma de erogaciones en que incurre una persona física o moral para la adquisición de un bien o de un servicio, con la intención de que genere ingresos en el futuro."

Lo que voy a considerar como costo anual de operación (C.A.O.) es lo que representa el costo de producción, el cual incluye:

- + Mano de obra directa.
- + Mano de obra indirecta. Constituida por los obreros de mantenimiento y de control de calidad.
- + Los insumos. Lo forman en el sistema actual el gas oxiacetilénico y en el propuesto la energía eléctrica.

4.3.1 C.A.O. del sistema actual.

Como una de las principales desventajas de este sistema es el tiempo tan largo que utiliza para calentar y enfriar las piezas, entonces voy a considerar para el estudio dos diferentes tiempos. Uno de 6 minutos que es aproximadamente el promedio de tiempo de procesamiento por pieza, y otro de 8 minutos que considero como un tiempo crítico para piezas más grandes.

* Mano de obra directa (M.O.D.).

Salario mensual del operario: \$ 388,800		
Piezas procesadas por mes:	4600 pzs.	
Promedio de tiempo por pieza:	6 min.	8 min.
Piezas por hora:	10 pzs.	7.5 pzs.
Piezas por turno:	80 pzs.	60 pzs.
Piezas al mes trabajando 2 turnos:	3520 pzs.	2640 pzs.
Diferencia con 4600: .	1080 pzs.	1960 pzs.
(Esta diferencia debe ser procesada en un tercer turno).		
Terceros turnos necesarios al mes:	14	22
Total días/hombre al mes:	58	66
Costo total de M.O.D. mensual:	1'025,018	1'166,400

* Mano de obra indirecta (M.O.I.).

Mantenimiento.		
Salario por hora del obrero:	\$ 3,138	\$ 3,138
Total de horas de mantenimiento:	12 hrs/mes	24 hrs/mes
Costo total de mantenimiento:	37,656	75,312

Control de Calidad.

Salario por hora del obrero:	\$ 3,138	\$ 3,138
Total de horas de cont. de cal.:	58 hrs/mes	66/hrs/mes
Costo total de cont. de cal.:	182,004	207,108
Costo total de M.O.I. mensual:	219,660	282,420

* Insumos.

Agua.

Gasto de agua:	370 m /mes	600 m /mes
----------------	------------	------------

El costo del agua no es significativo ya que se cuenta con pozos propios -- pero se debe tomar en cuenta que es un recurso limitado y provoca otros gastos secundarios.

Gas oxiacetilénico.

Costo mensual por consumo.	14'069,690	18'759,590
----------------------------	------------	------------

* Total C.A.O.

	M.O.D.	1'025,018	1'166,400
	+ M.O.I.	219,660	282,420
	+ INSUMOS.	14'069,690	18'759,590
<hr/>			
TOTAL COSTOS DE PROD. MENSUAL.		15'314,368	20'208,410
<hr/>			
COSTO ANUAL DE OPERACION.		183'772,416	242'500,920

* Utilidad neta.

Total de ventas estimadas.	1,242'000,000	1,242'000,000
- Total de gastos.	859'519,200	859'519,200
- Costo anual de operación.	183'772,416	242'500,920
<hr/>		
Utilidad bruta.	198'708,384	139'979,880
- Impuesto 15% I.V.A.	29'806,257	20'996,982
<hr/>		
UTILIDAD NETA.	\$ 168'902,126	\$ 118'982,898

4.3.2 C.A.O. del sistema propuesto.

La ventaja de este sistema es la rapidez con que realiza las operaciones de calentamiento y enfriamiento. Por lo tanto, si consideramos la producción de 4600 piezas al mes, se tendría al equipo parado la mayor parte del tiempo. Es por esto que considero tres alternativas diferentes. Una de 4600 piezas al mes; la otra con el doble de piezas, 9200; y finalmente otra de 12672 piezas por mes, que equivalen a la cantidad de piezas que se tratarían trabajando un sólo turno todos los días del mes.

Como tiempo de operación por pieza consideré el tiempo más desfavorable de 43 seg. y además le añadí un 15% de tiempo adicional por operación, dando como resultado un total de 50 segundos.

* Mano de obra directa (M.O.D.).

Salario mensual del operario: \$ 388,800

Piezas procesadas al mes:	4600 pzs.	9200 pzs.	12672 pzs.
Tiempo por pieza:	50 seg.	50 seg.	50 seg.
Piezas por hora:	72 pzs.	72 pzs.	72 pzs.
Piezas por turno:	576 pzs.	576 pzs.	576 pzs.
Total días/hombre al mes:	8	16	22

Costo total de M.O.D.:	141,382	282,764	388,800
------------------------	---------	---------	---------

* Mano de obra indirecta (M.O.I.).

Mantenimiento.

Salario por hr. del obrero:	\$ 3,138	\$ 3,138	\$ 3,138
Total de horas al mes:	3.2 hrs	6.4 hrs	8.8 hrs
Costo total de mant.:	10,040	20,080	27,610

Control de Calidad.

Incluido en el equipo.

Costo total de M.O.I.:	10,040	20,080	27,610
------------------------	--------	--------	--------

* Insumos.

Energía eléctrica.			
Costo por kW/hr.:	\$ 116.81	\$ 116.81	\$ 116.81
Consumo de kW/hr.:	267	267	267
Consumo de kW/mes:	17,088	34,176	46,992
Costo total de insumos:	1'996,049	3'992,099	5'489,136

* Total de C.A.O.

	M.O.D.	141,382	282,764	388,800
+	M.O.I.	10,040	20,080	27,610
+	INSUMOS.	1'995,049	3'992,099	5'489,136
<hr/>				
TOTAL COST. PROD. MENS.		2'147,471	4'294,943	5'905,546

COSTO ANUAL DE OPERACION: 25'769,652 51'539,316 70'866,552

* Utilidad neta.

Tot.Vent.Estim.	1,242'000,000	2,484'000,000	3,421'440,000
- Tot. de gastos.	859'519,200	1,719'038,400	2,367'788,544
- Cost. An. Oper.	25'769,652	51'539,316	70'866,552
<hr/>			
Utilidad bruta.	356'711,148	713'422,284	982'784,904
- Imp. 15% I.V.A.	53'506,672	107'013,343	147'417,735
<hr/>			
UTILIDAD NETA.	\$ 303'204,476	\$ 606'408,942	\$ 835'367,169

4.4 Periodo de recuperación de la inversión a valor presente (PRIVP).

El PRIVP es el tiempo necesario para que los beneficios netos del proyecto amorticen el capital invertido, o sea, se utiliza para conocer en cuánto tiempo una inversión genera los recursos suficientes para igualar el monto de dicha inversión, con el flujo de efectivo descontado, a una tasa seleccionada.

$$\text{PRIVP} = (N-1) + \frac{(\text{FAD})_{n-1}}{(\text{FD})_n}$$

N = Año en que cambia de signo el flujo acumulado descontado.

(FAD)_{n-1} = Flujo efectivo acumulado descontado del año previo a N.

(FD)_n = Flujo descontado.

Para este análisis consideramos que la utilidad neta anual es constante y la tasa de descuento es de 38.89% que a la fecha, agosto de 1989, es la que más rinde y pertenece al papel comercial.

Realicé tres análisis, uno para cada una de las opciones en cuanto a cantidad de piezas procesadas por el equipo de inducción eléctrica.

Para 4500 piezas.

Año (n)	Flujo neto.	Factor (P/F, 38.89%, n)	Flujo descontado	Flujo de efec. descont.acumul.
0	-1,213'763,750	1.00000	-1,213'763,750	-1,213'763,750
1	303'204,476	0.71999	218'304,191	-995'459,559
2	303'204,476	0.51839	157'179,168	-838'281,391
3	303'204,476	0.37324	113'168,040	-725'113,351
4	303'204,476	0.26873	81'480,140	-643'633,211
5	303'204,476	0.19345	58'654,910	-584'979,301
6	303'204,476	0.13931	42'239,420	-542'738,881

Se podía continuar pero claramente se ve que en muchos años no se va a poder recuperar la inversión.

Para 9200 piezas.

Año (n)	Flujo neto.	Factor (P/F, 38.89%, n)	Flujo descontado	Flujo de efec. descont.acumul.
0	-1,213'763,750	1.00000	-1,213'763,750	-1,213'763,750
1	606'408,942	0.71999	436'608,374	-777'155,376
2	606'408,942	0.51839	314'356,332	-462'799,044
3	606'408,942	0.37324	226'336,074	-236'462,970
4	606'408,942	0.26873	162'960,275	-73'502,695
5	606'408,942	0.19345	117'309,810	+43'807,115

$$PRIVP = (5-1) + \frac{73'502,695}{117'309,810} = 4 + 0.63$$

RETORNO DE LA INVERSION EN 4.6 AÑOS.

Para 12672 piezas.

Año (n)	Flujo neto.	Factor (P/F, 38.89%, n)	Flujo descontado	Flujo de efec. descont.acumul.
0	-1,213'763,750	1.00000	-1,213'763,750	-1,213'763,750
1	835'367,169	0.71999	601'456,010	-612'307,740
2	835'367,169	0.51839	433'045,990	-179'261,750
3	835'367,169	0.37324	311'792,442	+132'530,692

$$PRIVP = (3-1) + \frac{179'261,750}{311'792,442} = 2 + 0.57$$

RETORNO DE LA INVERSION EN 2.6 AÑOS.

CAPITULO CINCO

ADiestRAMIENTO, CAPACITACION Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

ADiestRAMIENTO, CAPACITACION Y SEGURIDAD INDUSTRIAL.

5.1 Adiestramiento y capacitación.

Esta parte del proyecto no la ofrece la planta, ya que el fabricante incluye en su paquete, una semana de capacitación en su planta, tanto para los ingenieros que se encargarán de la instalación del equipo en la planta, como de los operarios que serán los que manejen éste.

También ofrecen la opción de armar el equipo completo y realizar pruebas del tratamiento de las piezas en su planta, para hacer los ajustes necesarios y servir, además, como guía didáctica.

Para finalizar, ponen a disposición, a un especialista que puede hacer una revisión de la instalación del equipo ya en la planta y realizar visitas periódicamente para checar su funcionamiento.

La idea final es que las personas que vayan a la planta del fabricante capaciten al resto en la instalación y el mantenimiento del equipo.

En cuanto a la máquina alimentadora del sistema, es necesario hacer una guía de movimientos para minimizar el tiempo, y es la siguiente:

1. Acarrear en contenedores especiales las piezas del área de lavado y colocarlas en el extremo izquierdo de la máquina.
2. Colocación de las piezas en forma de pila.
3. Activación de la máquina.

La preparación total del equipo es la siguiente:

1. Seleccionar el inductor necesario de acuerdo al diámetro exterior y el espesor de la pieza.
2. Seleccionar el electroimán de acuerdo al diámetro interior del mamelón.
3. Montar el inductor en el adaptador del generador.
4. Montar el electroimán en el pistón superior y centrar dicho pistón respecto al eje central del inductor.
5. Seleccionar las barras de cobre que servirán como guías para la alimentación de las catarinas de acuerdo al paso

de los dientes.

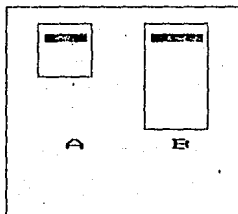
6. Montar las guías en la mesa de trabajo.
7. Ajustar las guías al diámetro de las piezas
8. Seleccionar el molde en que caerán las piezas de acuerdo al diámetro de las piezas que se van a trabajar.
9. Colocar el molde en la plancha y apretar con un opresor.

La secuencia de operación para el sistema completo es el siguiente:

1. Encender la fuente de alimentación del inductor.
2. Encender el ordenador o controlador automático (La figura 5.1 es el esquema del panel de control de encendido).
3. Programar en el ordenador el número de identificación de la pieza (el ordenador lo reconocerá y él mismo ajustará el equipo).
4. Conectar los interruptores A, B que se encuentran en los paneles de control. A continuación se describen:
A. Swith general a 125 Vca.
B. Swith general control electrónico.
5. Pulsar el botón verde para avance del pistón.
6. Pulsar el botón negro para accionar el pistón de sujeción de la pieza.
7. Pulsar botón verde para regresar la plancha a su posición inicial.
8. Pulsar el botón negro para bajar la pieza al inductor.
9. Pulsar botón amarillo para dejar caer la pieza al agua.

Hay que tomar en cuenta que a partir del número 5 hasta el número 9, se pueden realizar automáticamente si se cuenta con un controlador programable que reciba señales provenientes de sensores conectados a la máquina y que dirijan la secuencia de las operaciones, como ya había mencionado en la sección 3.4.1.

E N C E N D I D O



C O N T R O L

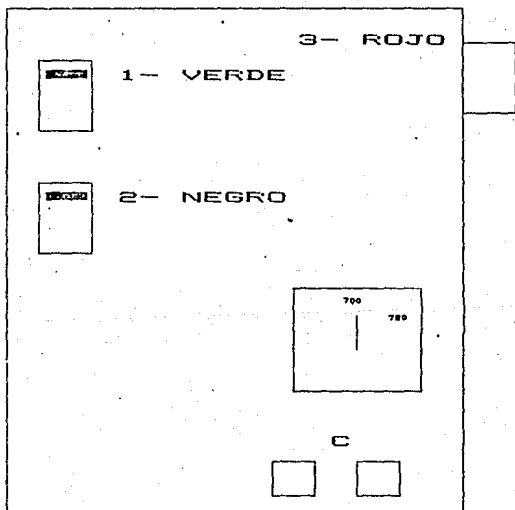


Figura 5.1 Paneles de control y encendido.

5.2 Seguridad industrial.

5.2.1 Protección del equipo.

Las instalaciones de un tratador térmico por inducción comprende varios componentes eléctricos y mecánicos, muchos de los cuales son enfriados por agua y están equipados con elementos de protección. Las instrucciones concernientes a las prácticas de seguridad y precauciones generalmente las brinda el fabricante. Estas precauciones no deben ser desatendidas.

Muchos peligros potenciales se pueden prevenir confiando las instalaciones a personal calificado que siga las instrucciones en detalle. Las instalaciones deben estar siempre en conformidad con las normas y leyes que prevalezcan en la localidad.

Los elementos necesarios para prevenir sobrecargas y cortos circuitos generalmente son construidos como parte del equipo original. En adición a esto, existen detectores de tierra y detectores de sobretensión diseñados para proteger el motor-generador, de un defecto en el inductor o de la disposición del transformador en la estación de trabajo, o de un debilitamiento en el aislamiento de los devanados del generador. También, el equipo de prevención de incendios es capaz de comenzar o detener la irrigación en caso de una caída de potencia general o mal funcionamiento de otros equipos de protección. Todos los equipos de protección deben de ser chequeados periódicamente para asegurar que se encuentran en buenas condiciones de trabajo.

Los equipos de protección que más comúnmente se utilizan con el equipo de calentamiento por inducción, son los siguientes:

- + Relevadores para sobrecargas.
- + Relevadores para proteger rodamientos.
- + Switches para el agua a presión.
- + Switches para el flujo del agua.
- + Relevadores para controlar la temperatura para protección del generador de vapor de agua.
- + Protectores de sobretensión para el generador.
- + Detectores de tierra.
- + Circuitos limitadores de voltaje y frecuencia.
- + Switches para controlar el agua caliente.
- + Mecanismos de descarga de alto voltaje.

Las precauciones que se deben tener con el equipo de sujeción del alimentador, son las siguientes:

- + Si el operador olvidara oprimir algún botón antes que otro u oprimiera alguno por error, generalmente será el verde o el rojo. Lo que se hace es pulsar el botón color rojo de emergencia y todo volverá a su posición inicial.
- + Para cualquier otra contingencia que no se sepa su origen se deberá accionar el botón rojo también, y todo volverá a su posición original. Para continuar con el control de los botones, primero se acciona el pulsador color negro que hace la función de reset, o sea, al accionar el botón negro se abre la señal de orden para poder seguir controlando los pulsadores en forma normal, color verde y negro.
- + Las piezas ya endurecidas deberán ser acomodadas en la cama del horno, sin que pasen más de cuatro horas del endurecido, para su revenido.

5.2.2 Protección del área de trabajo.

Debido principalmente a que el equipo que vamos a utilizar maneja corrientes muy altas y por ser en general un equipo fundamentalmente eléctrico, se deben de considerar los pasos siguientes.

Para prevenir el peligro de la electricidad estática, corto circuito y corrientes con flujo disperso, se deben de seguir las técnicas de aterrizado de todas las conexiones. Las prácticas recomendadas son:

1. El armazón y todas las partes metálicas expuestas de herramientas que no debieran de conducir corriente eléctrica, deben estar aterrizadas.

2. Las partes metálicas de todos los equipos eléctricos fijos que no conducen energía eléctrica como motores, generadores y equipo de control, se deben de aterrizar permanentemente cuando éstos se encuentran localizados en lugares peligrosos, cuando el equipo se encuentra al alcance de personas que puedan llegar a hacer contacto con cualquier superficie u objeto aterrizado; cuando el equipo se opera a más de 150 V. a tierra.

3. Las protecciones metálicas de lámparas portátiles se deben de aterrizar con un cable de tres conductores y dos polos, un tomacorriente de tres cables, excepto cuando la base y el mango de la lámpara están hechos de material no conductor.

Debe existir suficiente espacio alrededor del equipo eléctrico para permitir una operación precisa y segura. Este espacio de trabajo no debe de ser menor a 75 cms. Alrededor

del equipo, como el tablero de control y el panel de switcheo, debe de crecer el espacio libre en relación con el aumento en la capacidad de voltaje de la unidad. Se deben de seguir claramente las reglas aplicables en estos casos.

Otro factor importante en la selección del equipo de seguridad para instalaciones eléctricas es lo que comprende la localización. Las posiciones se pueden clasificar en tres tipos que se deben de incluir en las especificaciones de ingeniería para equipo eléctrico de la planta general:

Tipo 1: El posicionamiento donde están previstas las concentraciones peligrosas de gases, o vapores inflamables, líquidos volátiles, polvo combustible continuamente flotando o fibras y materiales fácilmente incendiables, durante las operaciones normales.

Precauciones: Utilizar equipo con todas las partes eléctricas protegidas en un compartimiento hermético capaz de resistir una explosión interna, que no permita la entrada ni salida de vapores peligrosos.

Tipo 2: Las localizaciones donde las condiciones anteriores sólo ocurrirían como resultado de condiciones anormales o falla del equipo.

Precauciones: Los equipos de arco voltaico o que producen chispas, deberán de estar protegidos por un compartimiento capaz de resistir una explosión interna, que no permita la entrada ni salida de vapores peligrosos. El equipo que no produce chispa, que en un momento dado podría prender vapores inflamables bajo condiciones normales de operación, se puede proteger con un compartimiento para propósitos generales.

Tipo 3: Las localizaciones donde existe poco o ningún peligro con vapores inflamables.

Precauciones: No hay restricciones relativas al uso de equipo de arco en localidades no peligrosas.

En el caso de la instalación del equipo de inducción en la planta, no existe ningún problema, ya que no hay vapores inflamables ni sustancias volátiles que puedan llegar a representar algún peligro.

5.2.3 Protección personal.

5.2.3.1 General.

En un programa activo de prevención de accidentes, se deben de considerar muchos otros factores concernientes a la seguridad. En general, si se consideran todas las fases de un diseño u operación, se asegura la perfección en la operación y, como consecuencia, la planta será operada y mantenida segura.

5.2.3.2 Especificaciones.

Muchos peligros de trabajo no pueden ser evitados con el puro cuidado del trabajador. Sin embargo, para evitar el daño, los trabajadores siempre deben de utilizar el equipo adecuado al trabajo que realizan, tal como lentes de seguridad, mascarillas, guantes, zapatos y cascos. Es necesario, a su vez, tener una supervisión estricta y obligar a la disciplina para lograr que el personal utilice el equipo de protección.

De acuerdo con los peligros que se presentan en el manejo del equipo de tratamiento térmico de las catarinas por inducción eléctrica, será necesario utilizar lo siguiente:

5.2.3.3 Protección para los ojos.

Los equipos de seguridad más importantes son los de protección para los ojos. Hay muchos tipos de lentes de seguridad disponibles y cada uno de ellos tiene un uso específico para un peligro particular.

Los lentes tipo de globo protegen los ojos en todos los ángulos y se deben utilizar donde es necesaria una protección completa contra partículas duras en vuelo, por ejemplo, las lanzadas por remachadoras, desbastadoras, forjas y esmeriladores. Están hechos de dos diferentes maneras, una de las cuales es para usarse sobre los lentes de uso común o lentes correctivos. Las estructuras están hechas de tal manera que protegen de peligros tales como el polvo, partículas duras, químicos y chispas eléctricas. Los lentes tipo gafa de seguridad los pueden usar los operadores o la gente de taller, quienes requieren estar protegidos de las partículas ligeras que son proyectadas por las máquinas de corte. Estos lentes brindan protección contra partículas que vienen de frente y también se pueden obtener con protecciones laterales que protegen de las partículas que

viene por los lados. Los lentes se pueden encontrar en una gran cantidad de medidas y formas, y se pueden graduar como se hace con los lentes correctivos.

Para aquellos que necesitan utilizar lentes correctivos y necesitan protección para sus ojos durante su trabajo, es posible conseguir unos lentes endurecidos según sus necesidades. Estos lentes brindan una protección de tiempo completo y en muchos trabajos eliminan la necesidad de usar los lentes de protección sobrepuestos a los correctivos.

La soldadura eléctrica y la de gas requiere de protección para más especializada para los ojos con el fin de guardar a éstos de los efectos de los rayos ultravioleta.

5.2.3.4 Protección para las manos.

Las catarinas presentan una forma irregular, y debido a lo filoso de las terminaciones en las puntas de los dientes, Su manejo hace necesario el uso de guantes para proteger la piel de las manos del operador. Estos guantes pueden ser de piel suave.

Los guantes tienen varias finalidades, la más importante es la de proteger contra rasguños debido a terminaciones filosas en las piezas de trabajo. Otro peligro que se puede evitar es el de enterrarse alguna rebaba que haya quedado en la pieza aún cuando ésta ya haya sido rebabeada; y por último, está el hecho de que las piezas reciben, durante las operaciones de corte, baños de una gran cantidad de líquidos y aceites refrigerantes que las convierten en objetos pesados y resbalosos, por lo tanto, usar guantes es primordial para eliminar la posibilidad de que se resbale la pieza y cause otro accidente.

La recomendación que se hace de que los guantes sean de piel suave es debido en gran parte a la versatilidad de éstos. Permiten libertad y facilidad de movimiento de las manos del operador. Sin embargo, si el operador tiene que sacar las piezas del tanque de agua de enfriamiento, es posible hacer el cambio de los guantes de piel suave por los de plástico, que pueden llegar a cumplir la misma función con igual eficiencia.

5.2.3.5 Protección para los pies.

Los pies son otra parte importante de nuestro cuerpo que continuamente está expuesta a peligros que son difíciles de prever. El mayor peligro al que están propensos es la caída de objetos pesados sobre de ellos.

El uso de guantes tiende a reducir dicho peligro, pero no sólo se pueden caer las piezas cuando se resbalan de las manos, sino que en cualquier momento pueden caer de una pila o de una mesa. Y debido a que las catarinas son de acero, es lógico pensar que pesan bastante y que por su forma dentada pueden causar mayor daño.

La protección más segura para los pies es el uso de zapatos de seguridad que tienen en la punta un casquete de acero que protege toda la parte superior del pie, desde el empeine hasta los dedos. Estos zapatos se pueden encontrar en todas las medidas y en diferentes formas según el trabajo que se desempeñe.

5.2.3.6 Protección para la cabeza.

Los cascos de seguridad se utilizan para prevenir daños particularmente en la industria de la construcción. Se deben de utilizar por todos los trabajadores expuestos a objetos que caen o que durante una parte del proceso es necesario que cuelguen a baja altura.

CONCLUSIONS

[REDACTED]

CONCLUSIONES

El sistema de inducción electromagnética representa un rápido, eficiente y económico medio de calentamiento para cualquier material conductor a una temperatura precisa, según se requiera.

El equipo utiliza potencia eléctrica para calentar la superficie entera de cualquier pieza o sólo áreas seleccionadas. La profundidad del calentamiento puede ser limitada a sólo la superficie o puede incluir toda la sección transversal, esto variando tanto la potencia como la frecuencia eléctrica y el tiempo de exposición de la pieza al campo electromagnético.

Los equipos que hacen posible el calentamiento por inducción, presentan dos maneras diferentes para realizar éste: a) el calentamiento a un sólo tiempo (single-shot) y; b) el calentamiento progresivo (scanning).

De estas dos maneras, la recomendable para el caso de las catarinas es la de calentamiento progresivo. Entre las principales ventajas que ofrece es que resulta más económica. Esto se debe, principalmente, a que la potencia que se requiere para calentar las piezas es proporcional al Área total que va a ser calentada a un mismo tiempo, y como las piezas que son tratadas poseen diámetros y anchos muy variados, desde los pequeños hasta los demasiado grandes, el calentamiento a un sólo tiempo requerirá de una gran potencia lo que equivale a un generador de al menos el doble de potencia del que se utilizaría con el sistema de calentamiento progresivo. Esto representa una inversión tal, que el solo generador tiene un valor inicial mayor a todo el equipo que en esta ocasión se cotizó, además de los altos costos de producción que genera por su consumo de energía eléctrica.

Sin embargo, el sistema de calentamiento a un sólo tiempo ofrece la ventaja de que reduce los tiempos de operación, lo cual significa que se podrían procesar mayor número de piezas por mes. Pero en este caso no reditúa la inversión porque el sistema progresivo cubre perfectamente las expectativas de producción actual y su capacidad es aún suficiente para un futuro aumento de la demanda.

Además, el sistema progresivo nos ofrece otra ventaja económica debido a que no es necesaria una instalación especial para realizar el enfriamiento, ya que éste se realiza casi simultáneamente cómo se va calentando la pieza. Esto traducido a gastos, representa un ahorro en la instalación de un recipiente especial para tal parte del

proceso, así como el mecanismo de recuperación de las piezas de dicho recipiente.

Ahora que ya vimos las ventajas que ofrece un equipo de inducción sobre otro, hay que analizar las ventajas que ofrece el sistema propuesto sobre el sistema actual.

A simple vista, el sistema actual es una forma económica de realizar el endurecimiento de las piezas. Pero analizando más a fondo nos podemos dar cuenta que no es así. Además de que presenta algunos otros problemas de orden no económico. Analizaremos todos estos problemas:

+ Produce altos costos de operación que hacen que el costo total por pieza se vea fuertemente incrementado. Los costos de operación se ven afectados por el consumo de gas oxiacetilénico que, además de que en la actualidad está aumentando considerablemente su precio, se utiliza ineficientemente en el sistema actual, debido a que aproximadamente un 40% del calor producido por la flama se dispersa y otro 20% de energía calorífica la pierde la pieza a causa de la ineficiencia térmica del medio.

Económicamente esto es una desventaja sobre el equipo propuesto de inducción, que como analizamos en el estudio económico, es mucho más eficiente en cuanto al gasto de energía. Los costos por insumos son mucho menores debido al bajo costo de la energía eléctrica, además de la facilidad de conseguir ésta, contrariamente a lo que sucede con el oxígeno y el acetileno.

Cabe señalar que para el análisis económico del método de calentamiento por inducción se tomó como base para realizar los cálculos una situación crítica, que es la que se tendría cuando toda la producción fuera de las piezas más grandes que ocupan el tiempo más largo en su procesamiento y el mayor consumo de energía eléctrica. En una situación promedio, con menor tiempo de procesamiento, se disminuirían en un 50% los gastos por consumo de energía eléctrica, según datos del fabricante.

+ En el sistema actual, no se puede tener un estricto control de la calidad sobre la cantidad de endurecido de las piezas. Ni tampoco se puede pensar que tienen una uniformidad de endurecido como debiera de ser, ya que el sistema se presta a que varíen las características de endurecido según el operario y al tiempo y colocación de la flama que le dé a cada pieza.

El equipo de inducción nos da la ventaja de poder tener un control total de la calidad sobre el endurecido, permitiendo eliminar el muestreo por lotes para verificar la calidad. Al mismo tiempo de que nos da la seguridad de que al menos el 99% de la producción tiene las características

que defensas. Además, el calentamiento por inducción es igual de eficiente para pequeños trabajos de taller que para operaciones de alta producción, aunque por su elevado valor inicial, es más recomendable en alta producción. El mismo equipo básico se puede usar para calentar gran variedad de tamaños y formas así como diferentes materiales, todos ellos conductores.

+ El tiempo de calentamiento por pieza en el sistema actual es demasiado largo, lo cual provoca que se produzca un cuello de botella en la línea y aumenten los tiempos por demora y que aumenten los inventarios de piezas en proceso.

La ventaja del método de inducción es el tiempo enormemente menor que utiliza para procesar cada pieza, y de esta manera, eliminamos los tiempos de demora y los inventarios.

+ El sistema actual es más peligroso para el operario y provoca un ambiente incómodo debido al calor que se produce para realizar el calentamiento. La flama puede provocar quemaduras y el manejo de las piezas no es demasiado seguro.

Ya que la radiación y el calor secundario son eliminados, el proceso de calentamiento por inducción puede estar instalado directamente en una línea de producción o en el área general de trabajo sin peligro para el operario ni para las personas que laboren alrededor del equipo, siempre y cuando la instalación se haga siguiendo las instrucciones de seguridad que recomienda el fabricante y estando todos los componentes debidamente aterrizados.

El equipo, a su vez, se puede adaptar fácilmente a las instalaciones de la planta y, debido a su gran flexibilidad, se puede automatizar totalmente o en partes para trabajos muy específicos de producción.

Una desventaja que podemos pensar que tienen el sistema de inducción sobre el equipo actual es lo elevado de la inversión inicial y podemos pensar, también, que por ser un equipo sofisticado requerirá de mayores gastos de mantenimiento y personal especializado, contrariamente con lo que pasa en el equipo actual, que por ser un equipo hecho en la planta, se puede decir que tiene una vida ilimitada y todas sus partes pueden ser intercambiadas fácilmente.

La conclusión a la que he llegado después de analizar todo lo anterior, es que por todas las ventajas que ofrece el sistema de calentamiento progresivo por inducción eléctrica sobre el sistema actual de flama oxiacetilénica, es recomendable adquirir dicho equipo. Pero para lograr que el retorno de la inversión sea atractivo, es necesario aumentar la producción -se recomienda al doble. Si no se

hace el aumento de la producción, quizá no sea tan atractiva la tasa de retorno de la inversión y en este caso sea recomendable continuar con el sistema actual, pero con algunas mejoras considerables.

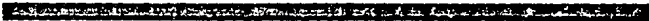
Debido a la disminución de la inflación, en la actualidad los intereses que pagan los instrumentos de inversión también van a la baja. Esta situación es favorable para que el inversionista invierta en bienes de capital que, en este caso, son más reutilizables.

Para finalizar, a modo de resumen, puedo decir que no obstante, si al efectuar el estudio económico comparativo, pareciera que el calentamiento por inducción es menos ventajoso, se deberá recordar que este sistema posee indudables ventajas como:

- Funcionamiento instantáneo.
- Tiempos de calentamiento más cortos.
- Adaptación a cualquier ritmo de trabajo.
- Reducción de gastos de mano de obra y transporte, ya que se puede automatizar totalmente.
- Reducción de gastos por demora.
- Control seguro de las zonas calentadas.
- Supresión de la formación de calamina y del maquinado posterior.
- Consumo de energía rigurosamente proporcional a la cantidad de piezas tratadas.
- Mejora en los productos con menor inspección.
- El control preciso del calentamiento elimina, o al menos reduce los desechos.
- Minimiza la distorsión.
- Elimina la necesidad de aceros aleados más costosos.
- Reducción del espacio de piso.
- Mejores condiciones de trabajo.

Todas estas ventajas tienen una importancia considerable en el plan de fabricación.

BIBLIOGRAFIA



BIBLIOGRAFIA.

1. **ELECTROTERMIA INDUSTRIAL.**
Lauster, F.
Ed. Urmo S.A. de editores.
España, 1979.
2. **EVALUACION DE PROYECTOS.**
Baca U. G.
Ed. McGraw-Hill.
México, 1987.
3. **HANDBOOK OF INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT.**
Ireson & Grant.
Ed. Prentice-Hall, Inc.
U.S.A. 1955.
4. **INGENIERIA ECONOMICA.**
2da. Edición.
Blank, L. y Tarquin, A.
Ed. McGraw-Hill.
Colombia, 1985.
5. **INGENIERIA INDUSTRIAL.**
Niebel, B.
Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A.
México, 1980.
6. **INTRODUCCION A LA METALURGIA FISICA.**
2da. Edición.
Avner, S.H.
Ed. McGraw-Hill.
México, 1980.
7. **MANUAL DEL INGENIERO MECANICO MARKS.**
Tomo I. 2da. Edición.
Baumeister, T. et.al.
Ed. McGraw-Hill.
Mexico, 1985.
8. **MATERIALES DE INGENIERIA Y SUS APLICACIONES.**
Flinn, R.A. y Trojan, P.K.
Ed. McGraw-Hill.
México, 1985.
9. **METALS HANDBOOK.**
Vol. 2. 2nd. Edition.
American Society for Metals.
Ohio U.S.A. 1985.

10. PROGRAMA DE CAPACITACION Y ADIESTRAMIENTO PARA PROYECTOS DE DESARROLLO.
Guia para la formulación y evaluación de proyectos de inversión.
FONEP.
México, 1974.
11. TECNOLOGIA DE LOS MATERIALES.
Sta. Edición.
Malishev, A. et.al.
Ed. Mir.
U.R.S.S. 1979.
12. TEMPLE SUPERFICIAL AL SOPLETE.
Vitez, M.
Ed. Hispano Europea.
España, 1966.
13. TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK.
Vol. 3, 4th. Edition.
Wick, Ch. & Veilleux, R.F.
Society of Manufacturing Engineers (SME).
U.S.A. 1985.
14. TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS.
Studeman, H.
Ed. Urmo S.A. de ediciones.
Madrid, 1980.