

## XI- TEMPLES SUPERFICIALES

### XI.1. TEMPLE POR INDUCCION

El calentamiento por inducción eléctrica se aplica a materiales conductores de la energía eléctrica, esencialmente metálicos, en muchos procesos industriales. Si se hace atravesar un material conductor por un campo magnético variable se genera en el seno del mismo una fuerza electromotriz, que crea una corriente cuyas características (tensión o intensidad) dependerán de las propiedades eléctricas de la pieza como también de la fuerza y frecuencia del campo magnético actuante.

Se trata de corrientes parásitas (Corrientes de Foucault) que, al fluir por el conductor en contra de la resistencia eléctrica de éste, disipan energía en forma de calor. Esta generación de calor es aprovechada en variadas operaciones de procesamiento de metales tales como: fusión, soldadura, brazing (soldadura con bronce, latón u otras aleaciones de base cobre), tratamientos térmicos, distensionado, calentamiento previo al trabajado mecánico, etc., y en otras operaciones no precisamente metálicas como secados o curados. Entre todas estas aplicaciones, predomina el uso en el tratamiento térmico y especialmente el temple de superficies de acero y fundición.

Comparándolo con la utilización de hornos, el calentamiento por inducción ofrece ahorros de energía y mayores velocidades de trabajo que la producción de calor por los sistemas convencionales de transmisión por convección, radiación, etc. Estas mismas consideraciones se extienden al temple superficial por la acción de llamas producidas por la combustión de gases tales como acetileno, metano, etc.

Además de lo dicho existen otras ventajas de mucha importancia:

- a) Facilidad de automatización y control
- b) Reducidos requerimientos de espacio
- c) Limpieza en las condiciones de trabajo
- d) Facilidad para integrarse en una línea de producción debido a la eliminación de calentamientos secundarios por radiación.

#### XI.1.1. Fundamentos y componentes básicos en el calentamiento inductivo

El campo magnético variable a que se aludió anteriormente es producido por una corriente eléctrica alterna de intensidad y frecuencia adecuadas para el trabajo a efectuar, que recorre una bobina de forma especialmente adaptada a la zona de la pieza a calentar. Ese campo magnético depende, además de la intensidad de la corriente eléctrica que recorre la bobina y de su frecuencia, del número de vueltas que la integra.

Si una pieza se coloca dentro de una bobina de  $N$  vueltas por la que circula una corriente alterna de intensidad  $J$ , capaz de producir un campo de intensidad de flujo  $\Phi$ , se generará una fuerza electromotriz  $e$  que se puede expresar como:

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

El sistema bobina inductora-pieza de trabajo funciona como un transformador en donde la bobina inductora es el primario, y el secundario una bobina de una sola espira en cortocircuito que es la pieza de trabajo.

Las corrientes inducidas en la pieza de trabajo generan su propio campo magnético de sentido contrario al generado por el inductor, siendo éste el motivo por el cual las corrientes inducidas se debilitan hacia el interior provocando el llamado "skin effect" o efecto pelicular.

La disminución de la intensidad de la corriente inducida desde la periferia hacia el interior está expresada por una ley exponencial:

$$i_x = i_s \cdot e^{-\frac{x}{d}} \quad (2)$$

en donde  $i_x$  indica la densidad de corriente a la distancia  $x$  de la superficie calentada;  $i_s$  indica la densidad de corriente en la superficie calentada y  $d$  es la "Profundidad de penetración" que determina la efectiva profundidad de las corrientes parásitas en su generación de calor. El valor de  $d$  está dado por la siguiente expresión:

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_T \cdot f}} \quad (3)$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío;  $\mu$  es la permeabilidad magnética relativa de la pieza que se calienta (disminuye cuando aumenta la temperatura);  $\rho$  es la resistividad de la pieza de trabajo (aumenta con la temperatura);  $f$  es la frecuencia del campo magnético actuante producido por la corriente que recorre la bobina inductora. En las figuras XI.1 y XI.2 se muestra, respectivamente, la variación de  $i_x/i_s$  y de la energía específica generadora de calor (elevando al cuadrado la densidad de corriente), en función de la relación  $x/d$ .

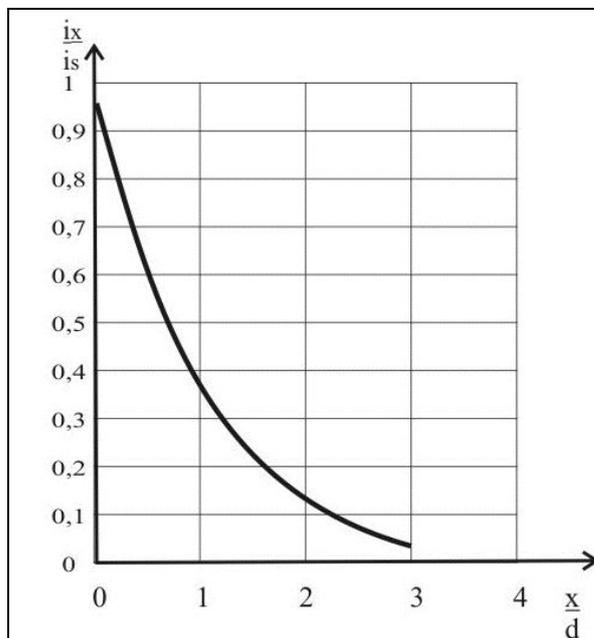


Fig. XI.1: Variación de la corriente específica en la capa templada por inducción

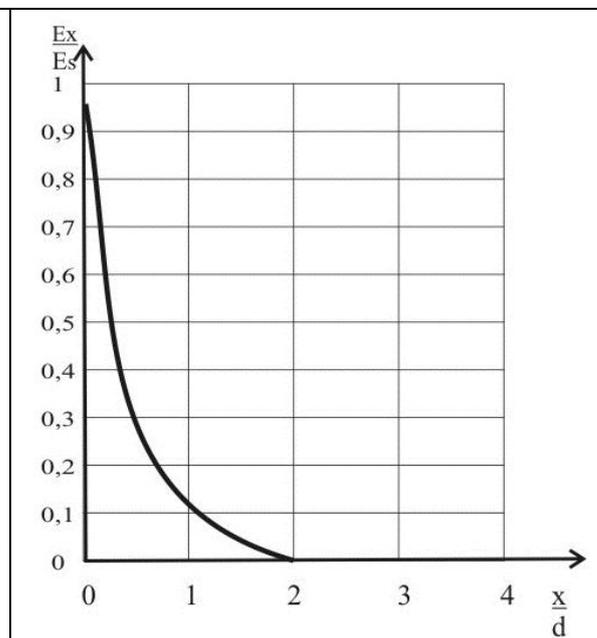


Fig. XI.2: Variación de la energía específica en la capa templada por inducción

De lo que se podrá deducir que, para idénticas condiciones de resistividad y permeabilidad relativa, la "Profundidad de penetración"  $d$ , depende fundamentalmente de la frecuencia alimentadora de la bobina inductora. Además cuando la profundidad  $x$  iguala a  $d$ , es decir la relación  $x/d$  es igual a 1, la relación de densidades de corriente es aproximadamente 0,37 (Fig. XI.1) y la relación de energías específicas es aproximadamente 0,13 (Fig. XI.2) siendo esta última la causante de las temperaturas generadas en la pieza de trabajo y por consiguiente, este valor de 0,13 es totalmente inadecuado para los fines del temple.

Además de la influencia de la frecuencia en la definición de  $d$ , cumple un rol importante la permeabilidad magnética relativa  $\mu_T$  la cual depende de la temperatura a que se encuentra el material; en el acero desde valores elevados a temperatura ambiente, llega prácticamente a 1 a 768° C, incrementándose fuertemente la Penetración "d". Esto puede producirse por valores demasiado elevados de la densidad de energía puesta en juego, que podría volver al acero magnéticamente saturado.

Para que el temple por inducción sea efectivo, es decir que el calentamiento de la zona a tratar llegue en profundidad hasta el espesor deseado, es necesario que el diámetro del redondo o el espesor de la placa a tratar tenga una relación de  $D/d$  o  $A/d > 3$  siendo  $D$  el diámetro de la pieza y  $A$  el espesor de la placa (según los casos); si esas relaciones son menores se pierde eficiencia ya que empiezan a tener influencia las corrientes generadas, que son de signo opuesto, contrabalanceando las originadas en una cara (si se trata de una placa) o de un extremo del diámetro (si se trata de un redondo).

Las variables que afectan a la velocidad de calentamiento son las siguientes:

- a) Intensidad o fuerza del campo magnético generado por la corriente que recorre la bobina de trabajo con sus características fundamentales: intensidad y tensión. De los amper-vueltas de la bobina de trabajo surge la fuerza magnética en forma de líneas de fuerza (flujo magnético)
- b) Frecuencia de la corriente que recorre la bobina de trabajo; ya se vio su influencia en el valor de  $d$ ; a mayores frecuencias existe mayor acercamiento de las líneas de fuerza.
- c) Separación entre la pieza de trabajo y la bobina inductora.
- d) Características magnéticas y eléctricas del material a tratar: resistividad y permeabilidad magnética.

### Componentes fundamentales de un equipo para templar por inducción

Fundamentalmente comprenden: a) fuente de energía de determinada frecuencia y potencia de salida; b) capacitores, interruptores; c) Sistema de enfriamiento para el templado propiamente dicho; d) bobina inductora de forma determinada de acuerdo al trabajo a realizar, etc.

Normalmente el equipo debe estar preparado para recibir energía eléctrica de frecuencia de la red (50 ó 60 Hz) y transformarla a una frecuencia mucho mayor (en la mayoría de los casos) al igual que la tensión eléctrica de ingreso al lugar de trabajo. En muchos casos se utiliza frecuencia de red especialmente cuando se deben obtener capas templadas por inducción gruesas.

Las principales fuentes de potencia son las siguientes:

- 1- Frecuencia de línea: 50 Hz.; Rango de potencia: 100 KW a 100 MW; Eficiencia: 90/95 %; Penetración de corriente profunda; Costo bajo.
- 2- Moto-Generador: 500 Hz a 10 kHz.; 10 kW a 1MW; Eficiencia: 75/85 %.
- 3- Estado sólido: 180 Hz a 50 KHz; Rango de potencia: 1 KW a 2 MW; Eficiencia: 75/95 %.
- 4- Equipos de tubos de vacío: 50 kHz a 10 MHz; Rango de potencia: 1 KW a 500 KW; Eficiencia: 50/75 %.

La elección de la fuente de energía depende primariamente de la frecuencia deseada, si bien hay solapamiento entre los distintos sistemas; por otra parte la frecuencia deseada depende del tipo de trabajo a realizar: si se trata de templar la superficie, la capa podrá ser de poco espesor o profunda; si se trata de calentar toda la masa para efectuar un tratamiento integral, habrá de estimarse el volumen total a tratar. En general el costo del equipo se incrementa con la frecuencia.

### Equipos de baja frecuencia (50/60 Hz)

Tienen la ventaja de no necesitar la convergencia a alta frecuencia; su uso está primariamente afectado a obtener capas de calentamiento profundas o calentamiento de la masa total de la pieza a tratar. Para potencias de alrededor de 300 kW se aceptan tensiones de hasta 440 V en la línea de alimentación. Desde luego, para mayores potencias, 20 MW, se usan hasta 6 kV o más. Estos equipos pueden funcionar con sistemas trifásicos (para altos niveles de potencia) en los cuales se puede operar con tres bobinas alimentadas cada una con una fase para el balance necesario.

### Equipo Moto generador

Este sistema está constituido por un motor accionado por la fuente de energía de línea, con su frecuencia propia, que acciona un generador, mediante un acoplamiento, pudiendo ser coaxiales. Mediante su velocidad de giro y su número de polos, se generan múltiplos de la frecuencia de línea. Existen algunas modificaciones en el generador; despojándolo de arrollamientos en el rotor, se consigue aumentar las frecuencias y la potencia de salida. Se obtienen frecuencias de hasta 12 KHz con potencias de hasta 1800 KVA.

Dado que el sistema es bastante pesado se necesita energía para moverlo lo cual hace descender su eficiencia especialmente cuando trabaja con cargas pequeñas.

### Equipos de estado sólido

Estos sistemas utilizan rectificadores de silicio de alta potencia, y debido a su bajo costo inicial y de mantenimiento, han reemplazado a los equipos moto-generadores en innumerables aplicaciones. La fundamentación básica de estos equipos es la transformación de la corriente de línea (50 Hz) en corriente

continua mediante diodos o tiristores: de las tres fases se pasa a corriente continua en una primera fase operativa; luego, mediante un convertidor lógico oscilante se vuelve a obtener corriente alterna cuya frecuencia puede modificarse dentro de ciertos límites. Esto último es notablemente beneficioso con respecto al sistema moto-generador donde la frecuencia es constante, y complica de acuerdo al uso al que se destina.

### Equipos de tubos de vacío

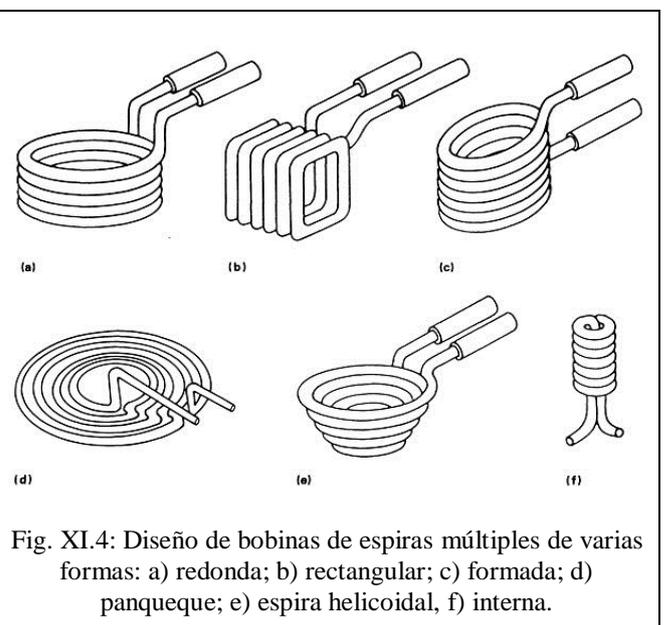
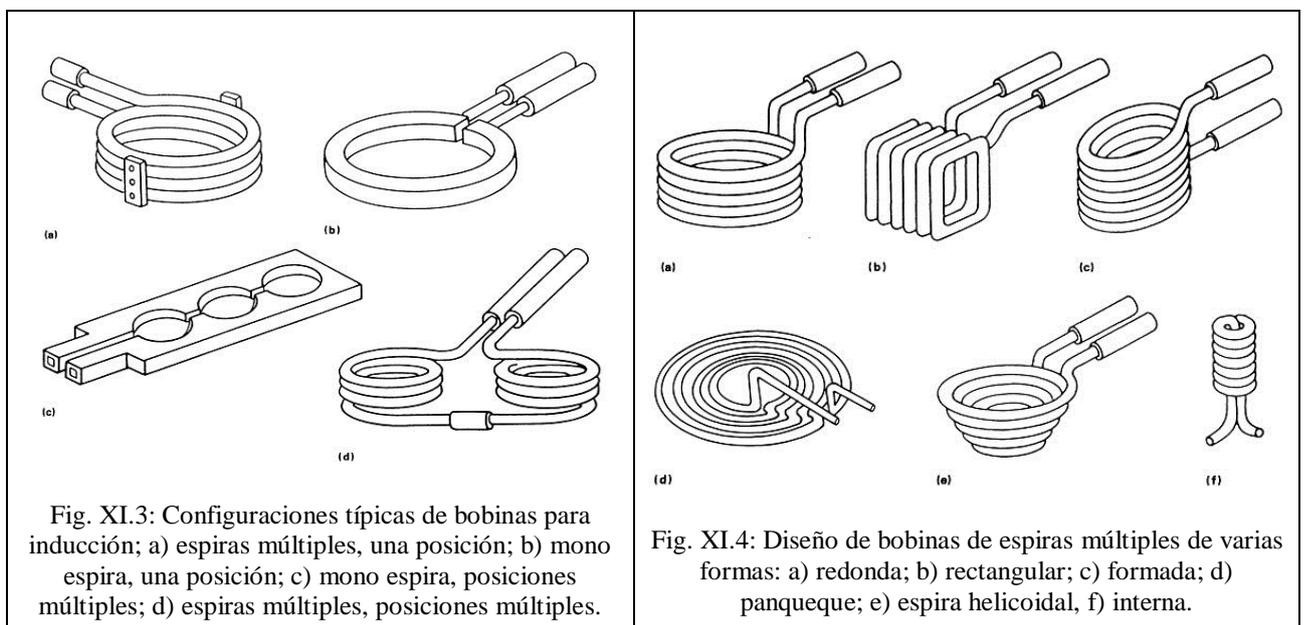
Se usan cuando se requieren frecuencias muy elevadas, por encima de 50 KHz. Si bien para frecuencias altas pueden usarse equipos de estado sólido, los más ampliamente usados son los de tubos al vacío que pueden alcanzar frecuencias de más de 2 MHz para calentamientos por inducción. En estos equipos también se emplea el método de transformar la corriente alterna en continua en una primera etapa y luego volver a la alterna en una segunda etapa. Estas transformaciones se consiguen utilizando tubos osciladores enfriados por aire o por agua (para grandes potencias); un oscilador puede producir una potencia de salida de alrededor de 200 kW con una eficiencia entre 60 y 75 %.

### Consideraciones sobre la bobina inductora

La forma de la bobina inductora tiene una importancia muy grande pues ella concentra el flujo de líneas de fuerza sobre la zona a calentar. En las Fig. XII. 3, 4 y 5 se muestran diversos modelos de espiras. Algunas de las condiciones necesarias para tener en cuenta en su diseño son las siguientes:

- Cuanto mayor acercamiento entre la zona a calentar y las espiras de la bobina, mayor concentración de líneas de fuerza del campo magnético, dando mayor intensidad a las corrientes parásitas, y, por ende, mayor temperatura por efecto Joule.
- La mayor concentración de líneas de fuerza se encuentra en el centro de la bobina, en forma longitudinal.
- La mínima concentración de líneas de fuerza se encuentra en el centro geométrico de la bobina (en el centro de la circunferencia si es circular o en la intersección de las diagonales si es rectangular o cuadrada); la Fig. XI.6 muestra la penetración de calentamiento producido en una barra redonda descentrada respecto a la bobina.
- Cuando por razones de la forma de la pieza no es practicable una luz pareja, es interesante -siempre que sea posible- hacer girar la pieza dentro de la bobina.
- Para calentamientos de baja frecuencia (grandes espesores o tratamientos del acero en toda la sección del mismo), se usan bobinas de gran número de espiras que forman, con su self-inducción y la del autotransformador utilizado, la impedancia total del sistema eléctrico.

En general, para ejes y/o tubos en donde se persigue capas de poca profundidad de calentamiento para temple superficial y especialmente para materiales ferromagnéticos, se aconsejan inductores de una sola espira, teniendo en cuenta que debe guardarse una relación entre el diámetro interior de la bobina y el ancho de la espira; así, para un diámetro de 50 mm, el ancho debería ser de 19 mm; en cambio si el diámetro es de 100 mm., el ancho debería ser de 25 mm.



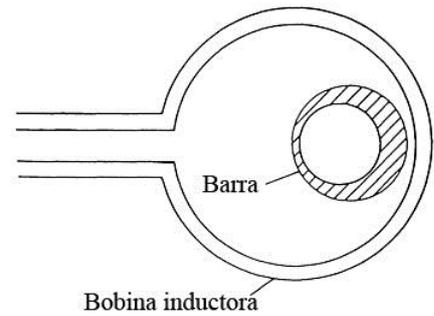
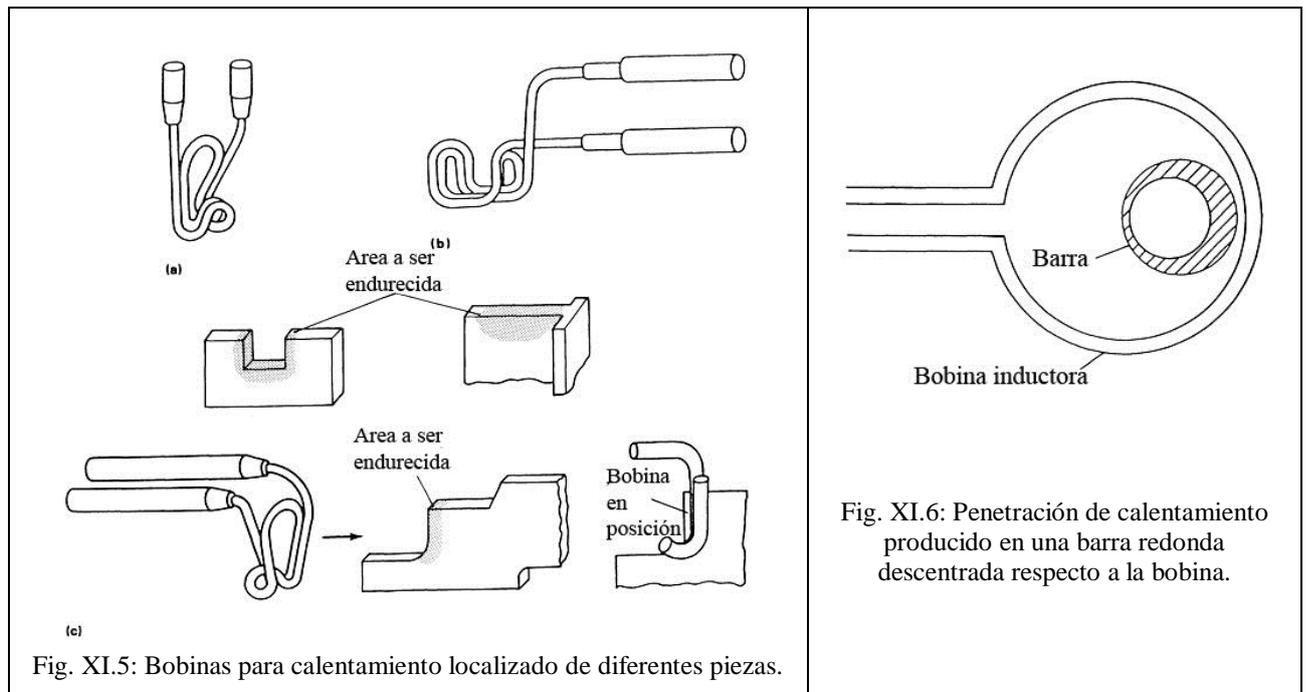


Fig. XI.6: Penetración de calentamiento producido en una barra redonda descentrada respecto a la bobina.

Cuando se trata de calentamiento de capas grandes o calentamiento de la sección total de la pieza, se suelen usar bobinas de varias espiras las que, para obtener uniformidad en el calentamiento, se modifican los diámetros en las zonas demasiado cargadas de líneas de fuerza.

La distancia entre la bobina y el área de trabajo debe ser la mínima posible para evitar que el flujo de líneas se desparrame fuera de la zona a trabajar. La frecuencia de la corriente inductora tiene gran influencia sobre el vacío entre la bobina y la zona de trabajo. En efecto, a mayores frecuencias las corrientes en la bobina son más bajas y el acercamiento será, en general, mayor; con bajas y medias frecuencias las corrientes de bobina son mayores y la distancia entre bobina y zona de trabajo podrán ser mayores.

Para materiales magnéticos que deben ser calentados en toda la sección, donde se usan bobinas de varias espiras, las separaciones suelen ser entre 6,5 mm y 9,5 mm. En materiales no ferrosos con las mismas condiciones de calentamiento, es aceptable una variación de la separación entre 1,5 y 3 mm.

Tratándose de calentamientos superficiales, se aconsejan acercamientos del orden de 1,5 a 2,5 mm, lo que también dependerá de que la pieza se mueva con respecto a la bobina.

Otro aspecto importante de la forma de la bobina es relativo a la forma de la pieza y las zonas que debe calentar, ya que puede haber más de una sola parte a calentar, en cuyo caso puede haber sobrecalentamientos en algunas zonas lo que obligaría a efectuar arrollamientos en sentido contrario al necesario en la zona a trabajar, como se muestra en la Fig. XI.7.

Existe una enorme variedad de bobinas de acuerdo al trabajo a realizar, enteras o partidas (Fig. XI.8); en todas ellas se imponen las consideraciones ya mencionadas respecto a la concentración del flujo magnético, etc.

Para extremos de ejes, las bobinas se fabrican planas como "mariposas", reforzando o anulando los campos magnéticos en la parte central, debido a que las bobinas planas son recorridas en cada ala por la misma corriente eléctrica. Fig. XI.9.

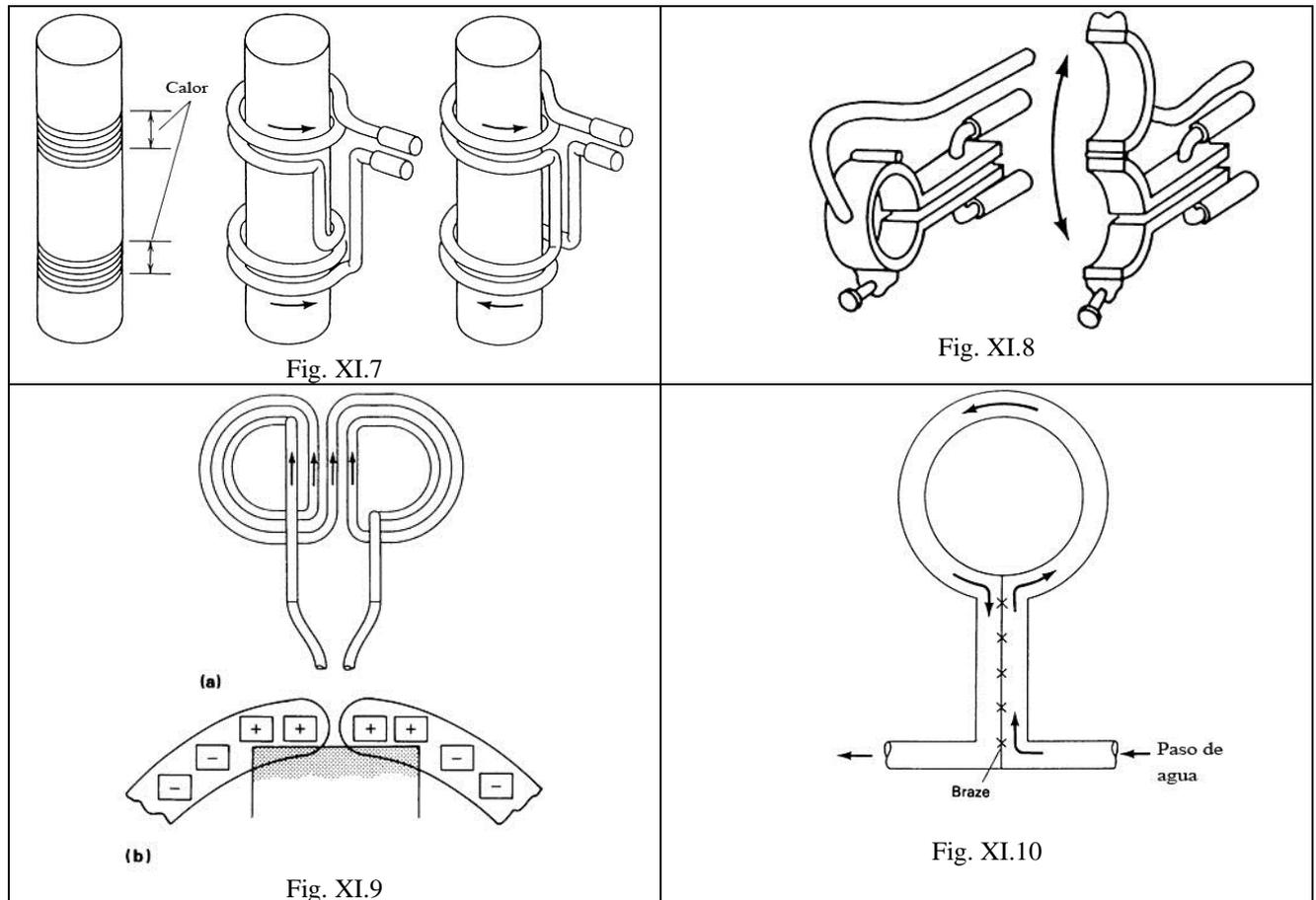
Para reforzar el flujo magnético se utilizan a veces hojas de chapa hierro-silicio junto a las bobinas, que modifican la reluctancia<sup>1</sup> del campo magnético con la ventaja de no absorber potencia eléctrica.

El material de las espiras es cobre exento de óxidos y la sección generalmente es circular, pero pueden tomar otras formas: rectangular, aplanada, etc, y, teniendo en cuenta que, en caso que sean varias, las corrientes en el mismo sentido provocan fuerzas de acercamiento y las recorridas en sentido contrario, de alejamiento, habrá que tener en cuenta un amarre adecuado, especialmente cuando se trata de bajas frecuencias y corrientes elevadas.

Las bobinas deben ser refrigeradas, para lo cual es ideal la utilización de tubos; es una forma de mantener baja la resistividad y la escasa formación de óxido; por otra parte es importante mantener el agua sin excesiva cantidad de sales que disminuyen la sección de pasaje. Fig. XI.10.

<sup>1</sup>  $R = e/\phi$

La consideración de las características propias de los equipos eléctricos utilizados, transformadores, reactancias, capacitores, elementos de control y supervisión, contadores, etc, exceden los límites de este trabajo.



### XI.1.2. Transformaciones del acero por el temple

Existen diferencias entre el temple por inducción del acero y el que se realiza en hornos debido a: los parámetros tiempo, temperatura, las propiedades eléctricas y magnéticas de los aceros, la frecuencia de inducción eléctrica y potencia eléctrica, y la influencia de la estructura metalográfica previa al temple.

#### a) Tiempo y temperatura en el calentamiento por inducción

El tiempo en el que se logra la austenización completa de un acero, depende de la estructura previa de la pieza y de la velocidad de calentamiento. Para un acero eutectoide, el tiempo se reduce considerablemente ya que la temperatura de austenización es más baja (entre 740 y 760° C); pero si su estructura previa contiene cementita globular, el mismo se incrementa para lograr la total disolución de los glóbulos. En cambio, partiendo de una estructura templada y revenida, el tiempo se reduce notablemente.

Tabla XI.1: Temperatura de austenización para distintos aceros, calentados en horno y por inducción

% de carbono	T. de calentamiento en horno, ° C	T. de calentamiento por inducción, ° C
0.30	845 - 870	900 - 925
0.35	830 - 855	900
0.40	830 - 855	870 - 900
0.45	800 - 845	870 - 900
0.50	800 - 845	870
0.60	800 - 845	845 - 870
Mayor de 0.60	790 - 820	815 - 845

En el gráfico de la Fig. XI.11, se muestra la temperatura de austenización de un acero SAE 1042, en función de la velocidad de calentamiento y la estructura previa. Se puede apreciar que, para una velocidad de calentamiento de 500° C/s, la temperatura de austenización de la pieza templada y revenida, es 850° C, si la pieza estuviera normalizada, 900° C, y en caso de provenir de un recocido, 975° C. Es decir, para estructuras blandas, corresponde un tiempo de calentamiento mayor. La Tabla XI.1 compara la temperatura de austenización para calentamiento por inducción y en horno, en distintos aceros, a los efectos de un temple correcto.

Como se puede observar las temperaturas de calentamiento en inducción son mayores que en calentamiento por horno; la experiencia indicará si es necesario un incremento mayor que lo que se expresa. Por otra parte, dado el tiempo breve del calentamiento por inducción, no hay cuidado en el crecimiento exagerado del grano.

En el caso de aceros especiales, es decir aceros que contienen elementos como níquel, cromo, molibdeno, vanadio, etc., se hace necesario aumentar aún más las temperaturas de calentamiento a los efectos de disolver los carburos presentes en el corto tiempo del temple por inducción; para ellos tampoco hay peligro de crecimiento del grano habida cuenta de las propiedades que les comunican los elementos de aleación. En cualquier caso es aconsejable conocer con precisión la composición del acero tratado pues los elementos residuales que puede contener el acero (de acuerdo a su forma de fabricación) puede indicar la conveniencia del incremento en la temperatura de calentamiento para el temple inductivo.

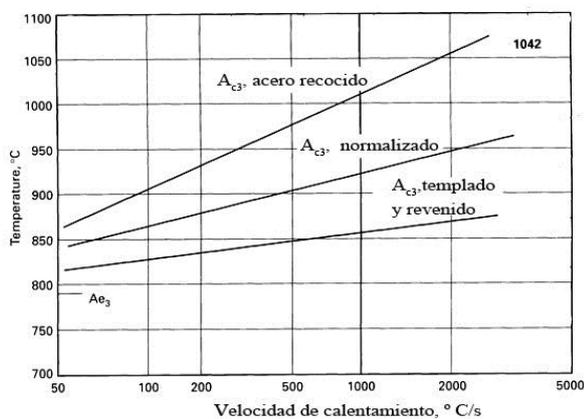


Fig. XI.11: Efecto de la estructura previa y la velocidad de calentamiento sobre la temperatura  $A_{c3}$  de un acero SAE 1042.

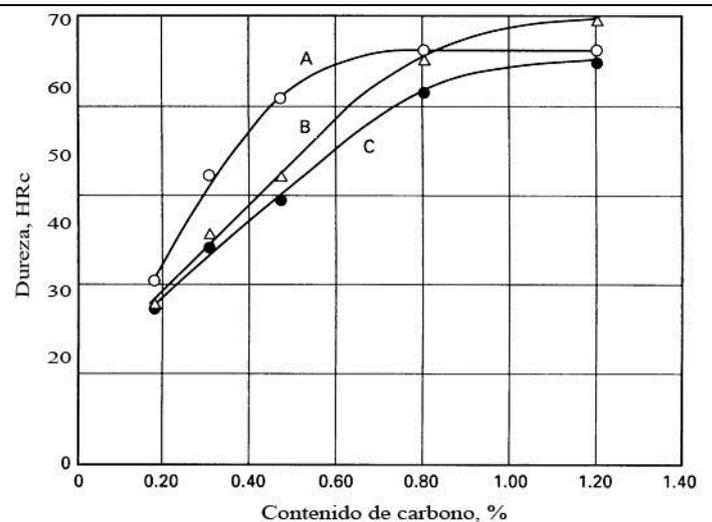


Fig. XI.12: Efecto del contenido de carbono sobre la dureza de aceros al carbono. Curva A: endurecido por inducción. Curva B: calentado en horno y templado en agua. Curva C: calentado en horno, templado en agua y revenido. Los aceros templado-revenidos fueron tratados en N líquido antes del revenido a 100° C durante 2 h.

La dureza de la capa templada por inducción es mayor que la correspondiente a los tratamientos clásicos de temple en horno. Esto se debe a que la capa templada por inducción -que es martensítica- tiene un volumen específico mayor que las capas interiores -que serán perlíticas o bainíticas- originando tensiones que se traducen en mayores durezas. Así mismo, la martensita se forma desde un grano más fino que en el calentamiento en horno dando, en consecuencia, mayor dureza. Otro factor a tener en cuenta para aceros hipoeutectoides, es que hay diferencias en el porcentaje de carbono de la austenita, lo que influye en la dureza, aumentándola. En la Fig. XI.12 se pueden apreciar las diferencias de dureza entre el temple por inducción y el temple realizado en horno, para aceros de distintos porcentajes de carbono.

Para obtener una dureza determinada, en el revenido del acero templado por inducción se requieren tiempos mayores.

#### b) Propiedades eléctricas y magnéticas de los aceros

Ya se ha analizado que la medida  $d$  depende, para un determinado material, de la frecuencia de la corriente que circula por el inductor, ésta será alta para temples superficiales y baja para tratamientos que incluyan la sección completa.

En cuanto a la resistividad, ella varía con la temperatura de tal modo que para temperaturas cercanas a la ambiente es de aproximadamente entre  $10 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$  (hierro electrolítico) y  $20 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$  (acero de 1 % de C), hasta aproximadamente  $110 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$  a  $750\text{-}800^\circ\text{C}$ . Para temperaturas mayores de  $800^\circ\text{C}$ , cercanas al punto de Curie, el crecimiento de la resistividad es de  $5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$  por cada  $100^\circ\text{C}$  de aumento de temperatura.

De la misma manera que crece la resistividad decrece la permeabilidad magnética relativa hasta alcanzar la temperatura del punto de Curie. Debajo de ella, depende de la intensidad del campo magnético. De esto se desprende que, a medida que la permeabilidad desciende, disminuyen las propiedades ferromagnéticas del acero. Es así que, como se puede apreciar en el gráfico de la Fig. XI.13, a mayores temperaturas de calentamiento por inducción, se incrementa la necesidad de energía aplicada y para cuando se supera el punto de Curie, los incrementos de energía son mayores.

En este caso, en que se necesita alta temperatura para llegar a la austenización, el equipo debe tener circuitos especiales que permitan la variación de la impedancia y así compensar el cambio en las propiedades magnéticas del acero.

### c) Selección de la frecuencia

La frecuencia está ligada íntimamente a la profundidad de la capa que se desea templar; cuanto mayor sea ésta, menor podrá ser la frecuencia. En la Fig. XI.14 se muestra la relación existente entre el espesor de la capa templada, el tiempo de calentamiento en segundos y la densidad de potencia superficial en  $\text{MW}/\text{m}^2$ ; se puede apreciar que a profundidades de capa templada menores se necesitan mayores frecuencias para un determinado tiempo de calentamiento, y para un determinado espesor de capa tratada se necesitan menores densidades de potencia superficial.

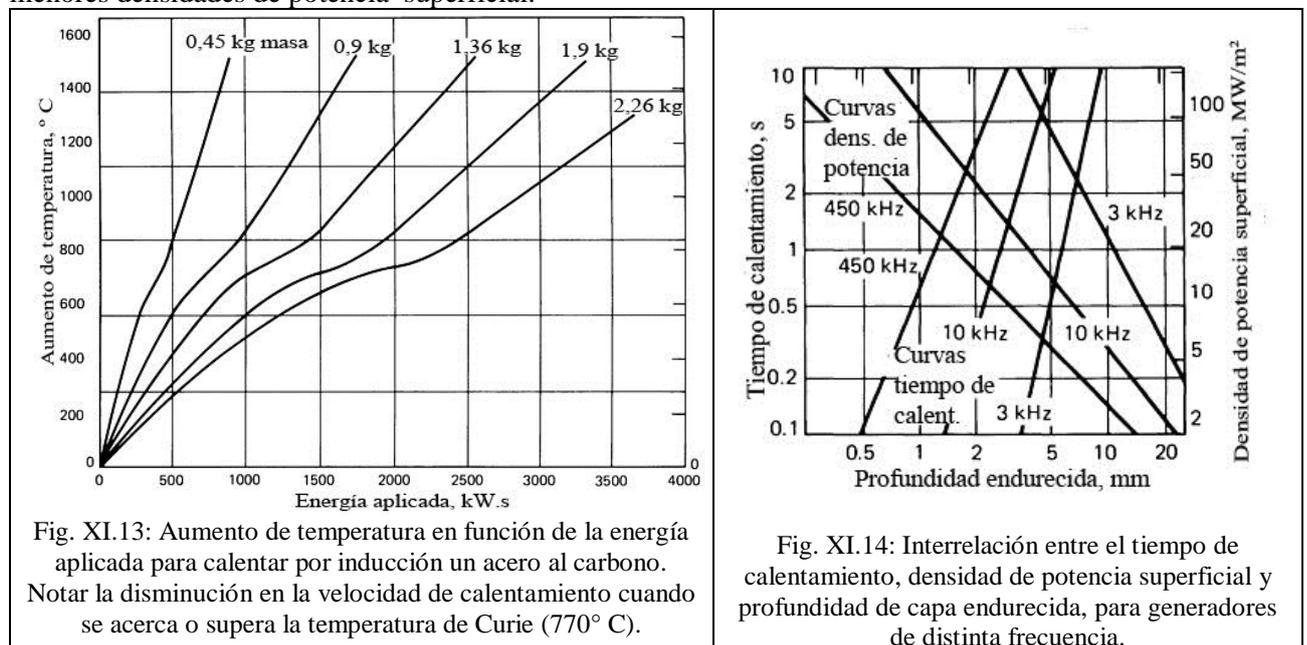


Fig. XI.13: Aumento de temperatura en función de la energía aplicada para calentar por inducción un acero al carbono. Notar la disminución en la velocidad de calentamiento cuando se acerca o supera la temperatura de Curie ( $770^\circ\text{C}$ ).

Fig. XI.14: Interrelación entre el tiempo de calentamiento, densidad de potencia superficial y profundidad de capa endurecida, para generadores de distinta frecuencia.

En general, teniendo en cuenta la expresión de la ecuación (3) acerca del valor del espesor " $d$ ", puede estimarse la frecuencia óptima del generador para el temple superficial del acero; la capa efectiva será alrededor de la mitad de la hallada al calcular la profundidad de penetración con una determinada frecuencia de corriente.

En la Tabla XI.2 se puede apreciar las densidades de potencia superficial para distintos espesores de capas calentadas por inducción, teniendo en cuenta tres estados de fuentes de energía: bajo (d); óptimo (e) y alto (f).

### XI.1.3. Revenido y otras aplicaciones del calentamiento por inducción

Así como la dureza obtenida en el temple por inducción supera a la que se alcanza por calentamientos en horno como consecuencia, entre otras razones, de las tensiones desarrolladas en la capa templada con respecto a las estructuras metalográficas situadas debajo de ella, así mismo esas tensiones pueden llegar a producir algunas pequeñas deformaciones en la pieza tratada por ejemplo, en ejes. Se hace entonces

Tabla XI.2: Profundidades de capa para distintas frecuencias y equipos disponibles

Frecuencia, kHz	Profundidad de capa (a), mm	Densidad de potencia del equipo (b) (c)		
		Baja (d)	Óptima (e)	Alta (f)
500	0.381-1.143	1.08	1.55	1.86
	1.143-2.286	0.46	0.78	1.24
10	1.524-2.286	1.24	1.55	2.48
	2.286-3.048	0.78	1.55	2.33
	3.048-4.064	0.78	1.55	2.17
3	2.286-3.048	1.55	2.33	2.64
	3.048-4.064	0.78	2.17	2.48
	4.064-5.080	0.78	1.55	2.17
1	5.080-7.112	0.78	1.55	1.86
	7.112-8.890	0.78	1.55	1.86

(a) Para profundidades mayores, se utilizan potencias más bajas; (b) valores basados en las frecuencias adecuadas y eficiencia normal, válidos para métodos de calentamiento estáticos y progresivos, sin embargo, en algunos casos los métodos progresivos requieren potencias mayores; (c) máximo en el ciclo de calentamiento; (d) puede utilizarse cuando la capacidad del equipo es limitada; los valores pueden utilizarse para calcular las piezas más grandes; (e) para los mejores resultados metalúrgicos; (f) para grandes producciones, cuando la capacidad del generador está disponible.

necesario revenir las piezas para aliviar las tensiones mencionadas; para ello se debe calentar lo más inmediatamente posible a una temperatura no mayor de 260°C, temperatura que aliviará las mayores tensiones sin disminuir apreciablemente la dureza ni la resistencia mecánica pero mejorará la resiliencia. Para lograrlo es frecuente utilizar el mismo inductor reduciendo la potencia aplicada y, en algunos casos, disminuyendo la frecuencia; y cuando se trata de ejes, modificando la velocidad de rotación de los mismos o el pasaje a través de la bobina.

En ciertos casos se lleva la pieza tratada a un horno de revenido para asegurar los resultados.

De la misma forma como procede el calentamiento por inducción para temple superficial, así procede para los distintos tratamientos térmicos que se efectúan en hornos; es decir, se pueden realizar recocidos completos, subcríticos, revenidos, precalentamientos para efectuar soldaduras, revenidos de partes soldadas, etc. En general, los equipos disponen de fuentes de energía con frecuencias variables y potencias variables a fin de acomodar los metales a sus respectivas permeabilidades magnéticas y sus resistividades.

#### XI.1.4. Sistemas de enfriamiento

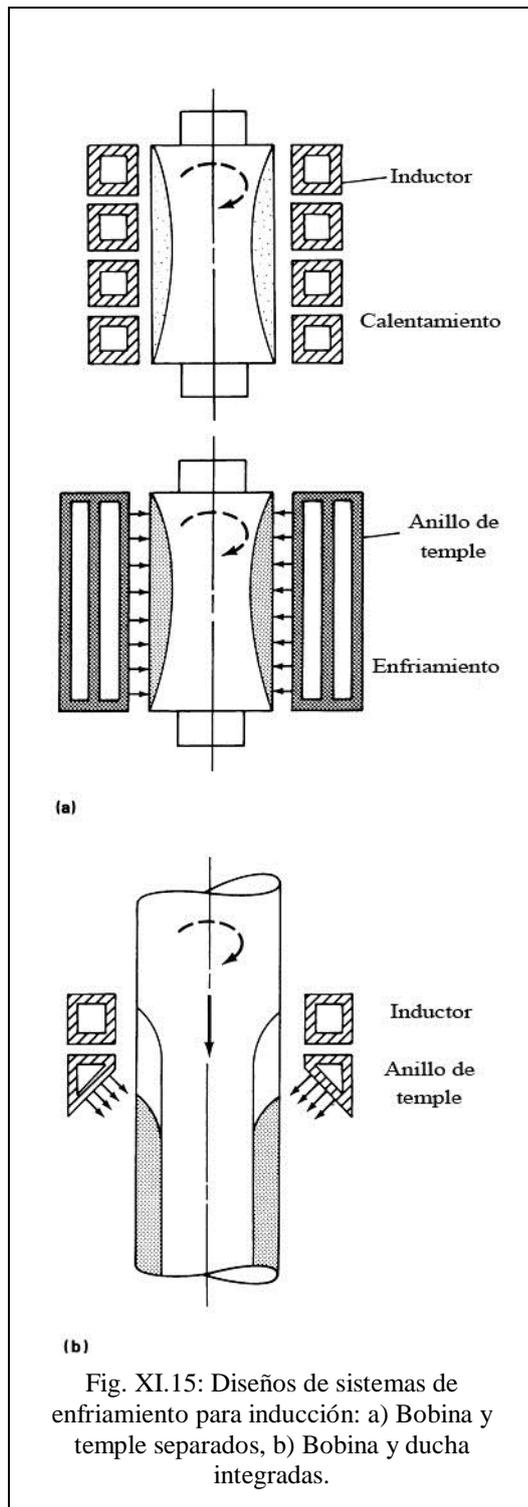
Estos sistemas tienen tanta importancia como los necesarios para el calentamiento. Fundamentalmente se basan en considerar si el temple es localizado o continuo; la templabilidad del acero a tratar indicará el tipo de líquido a emplear y la velocidad de enfriamiento.

Existen dos tipos de enfriamiento bien definidos: con anillos de enfriamiento por lluvia (spray) o sistemas por inmersión.

Los anillos por lluvia pueden colocarse debajo de la bobina de calentamiento, encima o a lo largo de la misma (adelante o atrás para bobinas horizontales), o bien estar preparada la bobina de calentamiento con un sistema para el líquido enfriante en sí misma. En los casos de temple puntuales, se sumerge la pieza inmediatamente luego del calentamiento.

Los líquidos enfriantes pueden ser: agua, aceite, aceite soluble, polímeros solubles en agua o aire comprimido, según la templabilidad del acero. Si se usa agua, debe ser "blanda" es decir con una escasa proporción de sólidos para que no tape las cañerías; su temperatura, debe ser controlada entre 15° y 30° C. Por esta razón, y para tener un enfriamiento eficiente, el sistema de bombeo debe tener una capacidad varias veces superior a la necesaria para dotar al sistema del flujo correcto para el temple.

Algunos detalles acerca del enfriamiento se refieren a la medida de los orificios, a la separación entre éstos, la separación entre las filas que los ordenan, el ángulo de ataque sobre la parte a enfriar, etc. La medida de los agujeros será la mínima posible, compatible con la limpieza que deberá efectuarse periódicamente; la distancia debe ser tal que, a veces conviene un solapamiento entre los filetes acuosos para asegurar el enfriamiento efectivo. En cuanto a la inclinación de los orificios: para enfriamientos puntuales, la dirección debe ser perpendicular a la superficie de trabajo; para enfriamientos en superficies desplazables



(ejes, barras, etc.) la inclinación debe tener un ángulo de unos  $30^\circ$  en la dirección del desplazamiento del trabajo.

De acuerdo con lo expresado más arriba, es de fundamental importancia el control de temperatura del medio enfriante y, si fuera posible, el control de temperatura de las zonas calentadas y el tiempo de los ciclos de calentamiento. La no uniformidad del enfriamiento, el excesivo enfriamiento (especialmente en aceros muy templables) y las superficies rugosas provocadas por las marcas de herramientas, son algunos de los factores que producen fisuras en la superficie templada por inducción.

### XI.1.5. Control de la temperatura y de la dureza

Son dos elementos importantísimos a tener en cuenta. Habrá de disponer de pirómetros ópticos que miden la temperatura por radiación, para lo cual el óxido que eventualmente pudiera formarse, es un obstáculo insalvable, pues el pirómetro mide por la emisividad emitida por la superficie.

En cuanto a la dureza, resulta fundamental su control ya que bajas durezas en pequeñas zonas o en su totalidad, reflejan fallas en el tratamiento. Algunas de las causales de baja dureza podrían ser:

- Contenidos de carbono inadecuados, porcentajes inferiores a 0,45/0,50 darán durezas bajas
- Temperatura de austenización inadecuada; de allí la necesidad del control de la temperatura
- Superficie calefaccionada descarburada que no puede templarse
- Estructura metalográfica de la que se parte
- Austenita retenida, especialmente en aceros de alto carbono y/o de medio con elementos de aleación que aumentan la templabilidad
- Enfriamiento insuficiente.

Finalmente habrá de tenerse en cuenta las posibles distorsiones que pueden producirse en el temple por inducción, debido a las diferencias metalográficas entre la capa de martensita provocada por el temple y las zonas interiores que, en general, serán de perlita o, según el caso, de bainita, con características de volumen específico muy diferentes a la martensita y creando, en consiguiente tensiones causantes del problema. Esto se agrava considerablemente si no hay uniformidad de la capa martensítica por deficiencias en la forma de calentamiento y/o enfriamiento.