



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**CONTROL DE LA CORRIENTE DE SALIDA PARA EL
CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN DE PIEZAS DE ACERO CON
DIFERENTES DIMENSIONES.**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA:

Julio Argüelles Castañeda

DIRECTOR DE TESINA:

Sergio García Galán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: CAMPILLO ILLANES BERNARDO FABIAN

VOCAL: Profesor: ARAMBURO PEREZ GERARDO

SECRETARIO: Profesor: GARCIA GALAN SERGIO

1er. SUPLENTE: Profesor: HERNANDEZ MORALES JOSE BERNARDO

2° SUPLENTE: Profesor: REYES CHAPARRO ITZEL

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

EDIFICIO "D"

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

FACULTAD DE QUÍMICA

UNAM

ASESOR DEL TEMA:


M. EN C. SERGIO GARCÍA GALÁN


SUPERVISOR TÉCNICO:

I.Q.M. AGUSTÍN RUIZ RAMÍREZ

SUSTENTANTE (S):

JULIO ARGÜELLES CASTAÑEDA





Julio Argüelles

Índice

<u>Resumen</u>	5
<u>Objetivo General</u>	6
<u>Objetivos Particulares</u>	6
<u>Hipótesis</u>	6
<u>Capítulo 1. Marco teórico</u>	7
1.1 <u>Aceros</u>	7
1.1.2 <u>Diagrama Fe-Fe₃C</u>	8
1.1.3 <u>Microconstituyentes de los aceros</u>	10
1.2 <u>Tratamientos térmicos</u>	13
1.3 <u>Métodos de calentamiento</u>	16
1.4 <u>Calentamiento por inducción</u>	18
1.4.1 <u>Breve historia del calentamiento por inducción</u>	18
1.4.2 <u>Principio físico del calentamiento por inducción</u>	20
1.4.2.1 <u>Generalidades de los sistemas de inducción</u>	28
1.5 <u>Efecto del calentamiento por inducción en la microestructura</u>	30
1.6 <u>Análisis de rutas térmicas</u>	37
<u>Capítulo 2. Desarrollo experimental</u>	41
2.1 <u>Características y descripción de la máquina de inducción</u>	41
2.2 <u>Efecto de la corriente de salida sobre el calentamiento de piezas cilíndricas de acero</u>	44
2.2.1 <u>Obtención de las curvas de calentamiento</u>	44
2.2.2 <u>Tratamiento de datos y análisis de las curvas de calentamiento</u>	48
<u>Capítulo 3. Resultados y análisis</u>	50

3.1	<u>Curvas de calentamiento</u>	50
3.2	<u>Análisis térmico</u>	53
3.2.1	<u>Comparativa de la diferencia de masas</u>	58
	<u>Capítulo 4. Conclusiones</u>	62
	<u>Bibliografía</u>	63

Resumen.

Los tratamientos térmicos son procesos que consisten en tres etapas: calentamiento, retención y enfriamiento. La etapa mayormente estudiada es el enfriamiento, por lo que un área de oportunidad en la cuál se puede investigar es el calentamiento, debido a que se tienen diferentes métodos y por lo tanto diferentes rutas de calentamiento como, por ejemplo: los hornos de gas, hornos eléctricos y las máquinas de inducción.

La inducción electromagnética, o simplemente "inducción", es un método de calentamiento de materiales eléctricamente conductores tales como los metales. Como su nombre implica, el calentamiento por inducción se basa en las corrientes eléctricas que son inducidas internamente en la pieza. En este método se obtienen rapidezces de calentamiento muy elevadas las cuales son de interés para este trabajo ya que afectan directamente en las líneas de transformación y por ende deberán repercutir en las propiedades mecánicas.

En el presente trabajo se estudió el efecto de la corriente de salida en el calentamiento por inducción a través de la medición constante de la temperatura en piezas cilíndricas de acero 4140 de tres diámetros diferentes, con las cuales se construyeron gráficos de tiempo vs temperatura para poder analizar las diferentes rapidezces de calentamiento encontradas a través de análisis térmico. Adicionalmente se estudió el efecto de la masa en el calentamiento por inducción, pero manteniendo la corriente como constante.

Como resultado de la experimentación y análisis de este trabajo, se determinó que con la máquina de inducción se obtienen rapidezces de calentamiento elevadas, que se puede mantener temperaturas constantes sin necesidad de modificar el valor de la corriente de salida y que a menor diámetro la pieza se calienta más rápido con respecto a las demás, entre otras.

Objetivo General.

- Analizar el efecto de la corriente de salida entregada por la máquina de inducción *PWR25-3AF* de *Inducción de Metales S.A. de C.V.* sobre la rapidez de calentamiento en piezas cilíndricas de acero de diferentes dimensiones.

Objetivos Particulares.

- Construir las curvas de operación tiempo vs temperatura para diferentes valores de corriente de salida.
- Construir las curvas de operación tiempo vs temperatura para piezas cilíndricas de acero de diferentes dimensiones.
- Realizar el análisis térmico del efecto de la corriente de salida sobre la rapidez de calentamiento.
- Determinar el inicio y fin de la transformación austenítica en el calentamiento por inducción de las probetas de acero.

Hipótesis.

- La variación de la corriente de salida en la máquina de inducción modificará el valor de potencia del campo magnético que se induce sobre el acero, modificando de esta manera la rapidez de calentamiento.
- La masa total de las piezas cilíndricas se incrementa al aumentar el diámetro por lo que la pieza tendrá una ruta térmica distinta durante el calentamiento.

Capítulo 1.

Marco teórico.

1.1 Aceros.

El acero se puede definir como una aleación base hierro que tienen al carbono como principal elemento de aleación. Pueden tener más elementos aleantes hasta en porcentajes mayores que el carbono, pero éste es el elemento clave que confiere las propiedades mecánicas que dan paso a una gama extensa de aplicaciones. El contenido de carbono en un acero varía desde cantidades muy pequeñas como 0.0018% en peso hasta alrededor de 2.11% en peso [1]. Estas variaciones en el contenido de carbono dan origen a diferentes propiedades mecánicas, pero también la adición de elementos aleantes como Cr, Mo, W, V, Ni, Mn, etc. confieren diferentes propiedades a los aceros con el mismo contenido de carbono.

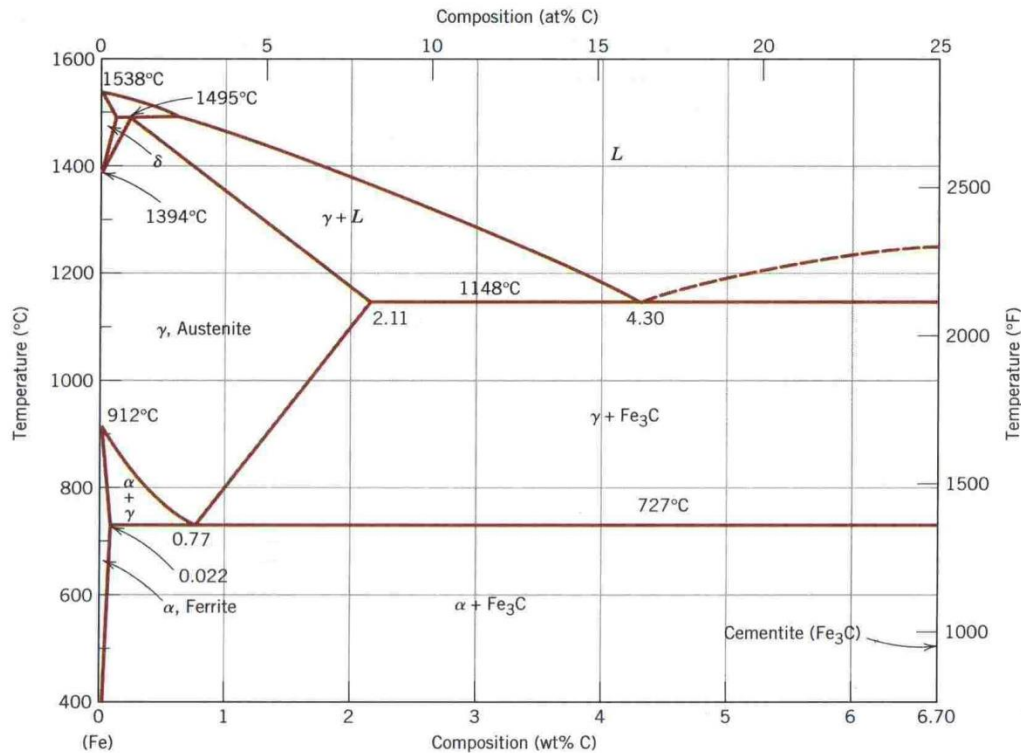
Los aceros pueden clasificarse de diferentes maneras para facilitar su selección y promover su uso adecuado en aplicaciones dadas. Las maneras de clasificarlos son:

- Composición química.
- Proceso de manufactura.
- Tratamiento Térmico.
- Propiedades mecánicas y físico-químicas.
- Tipo de microestructura
- Aplicación
- Generación

El acero es un material cuya microestructura se puede modificar en estado sólido, debido a las transformaciones de fase que sufre el material. Dichas transformaciones pueden ser controladas principalmente con la rapidez de enfriamiento, el tiempo de permanencia a cierta temperatura y, en menor medida, la rapidez de calentamiento. Debido a que el acero puede modificarse térmicamente de muchas maneras, se sigue trabajando e innovando para tener un mejor control de la microestructura.

1.1.2 Diagrama Fe-Fe₃C.

Para entender las transformaciones de fase que sufre un acero por efecto de la temperatura, se hace uso del diagrama de equilibrio meta-estable Fe-Fe₃C mostrado en la figura 1.



The iron-iron carbide phase diagram. [Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.]

Figura 1. Diagrama Fe-Fe₃C.

Este diagrama proporciona información acerca de las fases presentes en los aceros. El *hierro α* es una fase del hierro puro a temperatura ambiente, con sistema cristalino BCC (cúbico centrado en el cuerpo). La ferrita es una solución sólida intersticial de carbono en el *hierro α* con una solubilidad máxima de carbono de 0.022% a 727°C. El siguiente sistema cristalino del hierro puro es el *hierro γ* con estructura FCC (cúbico centrado en las caras). La austenita es una solución sólida intersticial de carbono en *hierro γ* que, gracias a este sistema cristalino, aumenta la solubilidad del carbono hasta un 2.11% en peso a 1148°C. Por último siguiendo el diagrama presentado en la figura 1 encontramos el *hierro δ* también llamada ferrita de alta temperatura, ya

que comparte el mismo sistema cristalino que el *hierro* α (BCC), como éste se presenta a temperaturas superiores a los 1400°C, no forma parte del campo de acción de los aceros convencionales. En el extremo derecho del diagrama encontramos al compuesto intermetálico con sistema cristalino ortorrómbico $Fe_{12}C_4$ cuya fórmula mínima es Fe_3C , a este compuesto se le conoce como cementita o carburo de hierro y tiene una composición estequiométrica definida de 6.67%C.

El diagrama cuenta con un punto peritético, un punto eutéctico, un punto eutectoide y la zona de líquido, así como las diferentes zonas bifásicas. La zona de interés y de trabajo para los aceros en la rama de los tratamientos térmicos del acero, es la que comprende únicamente el punto eutectoide.

La zona de interés para los aceros es la parte que comprende desde 0.0018% en peso de C, hasta 2.11% [1], ya que al aumentar el contenido de carbono por encima de 2.11%, se considera a la aleación como una fundición de hierro. Un material muy diferente a los aceros con otro tipo de aplicación.

Las líneas que delimitan las zonas de interés para los aceros son básicamente tres: A_1 , A_3 y A_{cm} , mostradas en la figura 2. Éstas llevan el nombre de líneas críticas de transformación. Tanto A_3 como A_{cm} , dependen del contenido de carbono, en cambio A_1 no. En detalle, cada una de estas líneas corresponden con:

- A_1 : La temperatura del punto eutectoide (727°C).
- A_3 : La línea comprendida desde el cambio de fase del *hierro* α a *hierro* γ (0%C, 912°C), hasta el punto eutectoide (0.77%C, 727°C).
- A_{cm} : La línea comprendida desde el punto eutectoide (0.77%C, 727°C), hasta el punto de máxima solubilidad de carbono en austenita (2.11%C, 1148°C).

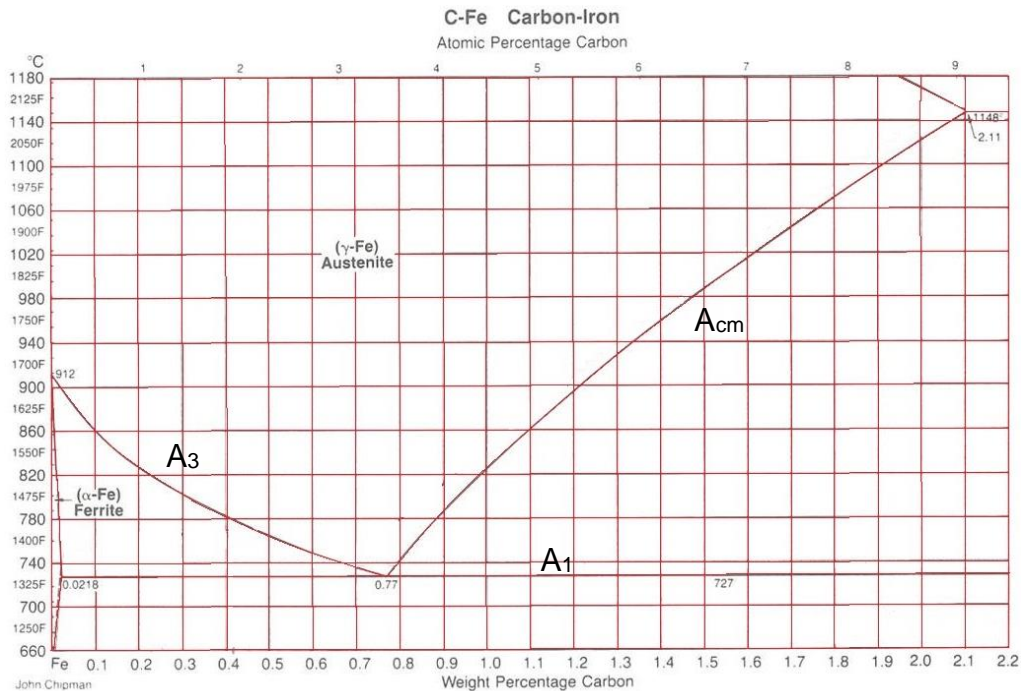


Figura 2. Porción del diagrama de fases Fe-Fe₃C, enfatizando las regiones de formación de ferrita proeutectoide y cementita proeutectoide, así como la transformación eutectoide de la austenita.

Suelen usarse las letras c y r antes del número que identifica cada línea crítica como referencia al calentamiento A_{c1}, A_{c3} y A_{ccm} (la c es del francés chauffant) o al enfriamiento A_{r1}, A_{r3} y A_{rcm} (la r es del francés refroidissant) [2]. Es importante denotar si se está llevando a cabo un calentamiento o un enfriamiento, debido a que las líneas críticas se ven ligeramente desplazadas debido a que durante la experimentación que se realiza estas están fuera del equilibrio.

1.1.3 Microconstituyentes de los aceros.

Un microconstituyente es una porción reproducible del material formado por una o más fases, se puede ver definidamente en el microscopio óptico metalográfico. Todas las fases son microconstituyentes, pero no todos los microconstituyentes son fases. En lo aceros, debido a la pequeña cantidad de carbono adicionado, se empiezan a formar microconstituyentes.

Los microconstituyentes presentes en los aceros a temperatura ambiente son:

- **Ferrita:** Es una Solución sólida intersticial de carbono en *hierro* α con una máxima solubilidad a temperatura ambiente de 0.0018% y a 727°C de 0.022% C en peso. Tiene sistema cristalino BCC (cúbico centrado en el cuerpo) y es el microconstituyente más blando de los aceros. También es una fase.
- **Cementita:** Es un Compuesto intermetálico de los aceros con composición única de 6.67% en peso de carbono. Su sistema cristalino es ortorrómbico con 12 átomos de Fe por 4 átomos de C. Es el microconstituyente más duro del acero. También es una fase.
- **Austenita:** Es una Solución sólida intersticial de carbono en *hierro* γ con una máxima solubilidad a 1148°C de 2.11% C. Por lo general sólo es estable a temperaturas altas (por encima de A_1) pero con ayuda de elementos aleantes en grandes cantidades como Cr y Ni, puede mantenerse a temperatura ambiente. Su sistema cristalino es FCC (cúbico centrado en las caras) y es el microconstituyente al cual se desea llegar en los tratamientos térmicos de austenización completa en la parte del calentamiento, porque es una estructura que disuelve los elementos de aleación y homogeniza la composición. También es una fase.
- **Martensita:** Es una fase metaestable de los aceros formada por enfriamientos sumamente bruscos. Tiene una estructura BCT (tetragonal centrada en el cuerpo). Se considera como una ferrita sobresaturada de carbono o enriquecida de carbono. Este enriquecimiento en el contenido de carbono de la ferrita hace que se modifique el parámetro "c" de la red cristalina, haciendo que cambie su tetragonalidad, pasando de ser un cubo a ser un paralelepípedo rectangular. Su contenido de carbono varía desde un porcentaje mayor a 0.0018% hasta 2% aproximadamente, aunque en aceros con bajo contenido de carbono (menor al 0.20%) es complicado formarla. Es

el segundo microconstituyente más duro de los aceros, por debajo de la cementita, tiene alta dureza y resistencia, pero alta fragilidad. Forma microestructuras aciculares con ángulos de 60° .

- **Perlita:** Es un Microconstituyente constituido por láminas intercaladas y paralelas de ferrita y cementita. Es el microconstituyente que corresponde a la transformación eutectoide que está en 0.77% en peso de carbono y 727°C . Está compuesta por 88.48% de ferrita y 11.52% de cementita. Generalmente se distinguen tres tipos de este microconstituyente que son: perlita fina, perlita media y perlita gruesa. La diferencia radica en el espaciamiento que existe entre las láminas de ferrita y cementita. Esta diferencia se logra de dos maneras: a) mediante tratamientos isotérmicos por encima de la rapidez crítica de enfriamiento y b) con rapidezces de enfriamiento distintas, a una rapidez de enfriamiento mayor, obtendremos un menor espaciamiento interlaminar, lo que dará lugar a perlita fina. De manera contraria, si la rapidez de enfriamiento es menor, se obtendrá un espaciamiento interlaminar mayor lo que dará lugar a perlita gruesa. La resistencia mecánica de la perlita dependerá de manera inversa del espaciamiento interlaminar.
- **Bainita:** Es un microconstituyente metaestable de los aceros que se obtiene por enfriamientos bruscos, es decir rapidezces de enfriamiento altas. También puede obtenerse a través de tratamientos isotérmicos. Consiste en ferrita acicular y carburo de hierro, ambos extremadamente finos. Suelen presentarse dos formas: bainita superior y bainita inferior. La bainita superior son carburos de hierro precipitados alrededor de las agujas de ferrita. En cambio, la bainita inferior, al formarse por enfriamientos más rápidos tiene precipitados los carburos de hierro en dentro de las agujas de ferrita. Es un microconstituyente duro y con alta resistencia.

1.2 Tratamientos térmicos.

La gama extensa de propiedades mecánicas y posibilidades que tiene un acero, no sólo radica en su composición química, sino también en los cambios microestructurales porque confieren al mismo acero diferentes propiedades mecánicas, a veces, totalmente opuestas entre sí. Uno de los procesos existentes para cambiar la microestructura de un material se denomina tratamiento térmico. Los tratamientos térmicos a grandes rasgos se definen como procesos de calentamiento, permanencia y enfriamiento controlado para modificar la microestructura del material. Las condiciones de calentamiento y permanencia, así como la temperatura de austenización, dependen de la composición química, las dimensiones de la pieza y las condiciones iniciales. Con el tiempo de permanencia y enfriamiento controlado se podrán controlar las transformaciones de fase y así obtener una microestructura acorde a las necesidades.

Los tratamientos térmicos pueden clasificarse en tres grupos generales de acuerdo con la temperatura de permanencia: Los tratamientos completos o de austenización completa, los tratamientos intercríticos y los tratamientos subcríticos.

- Tratamientos térmicos de austenización completa: Son aquellos en donde se calienta ligeramente por encima de A_3 o A_{cm} para obtener una estructura totalmente austenítica en la etapa de permanencia.
- Tratamientos intercríticos: Son aquellos en los que se calienta a una temperatura entre A_1 y A_3 o A_{cm} para obtener una estructura parcialmente austenítica en la etapa de permanencia.
- Tratamientos térmicos subcríticos: Son aquellos en los que no se busca austenizar al material, sólo se busca calentar al material para activar los procesos difusivos. Se hacen a temperaturas por debajo de A_1 .

Otra forma de clasificarlos de manera más específica y basados en el objetivo del tratamiento y el enfriamiento, es la siguiente:

- Temple
- Revenido
- Normalizado
- Recocido
- Tratamientos isotérmicos

Temple: Es un tratamiento de austenización completa el cual consiste en calentar hasta la zona austenítica, mantener un tiempo de permanencia a esa temperatura para enfriar de manera súbita (en la mayoría de los casos) buscando obtener una rapidez real de enfriamiento mayor que la rapidez crítica de enfriamiento y con ello cruzar satisfactoriamente M_s . La microestructura buscada en este tratamiento es la martensita. Este tratamiento térmico se usa para incrementar la resistencia y la dureza del material, pero por las distorsiones generadas en la red cristalina que hacen que el material sea muy frágil, no se utiliza como tratamiento final.

Revenido: Es un tratamiento subcrítico secundario que se aplica, de manera general, a piezas previamente templadas el cual consiste en calentar a temperaturas por debajo de A_1 . El tiempo de permanencia a esa temperatura es variable dependiendo del grado de ablandamiento que se busque. El tratamiento confiere al material un incremento en la tenacidad, disminuye la dureza, disminuye la resistencia y se eliminan las tensiones generadas en el temple.

Normalizado: Es un tratamiento de austenización completa el cual consiste en calentar de 30 a 50°C por encima de las temperaturas críticas superiores A_3 y A_{cm} , después del tiempo de permanencia adecuado se prosigue a un enfriamiento al aire quieto. Con este tratamiento se busca refinar y homogeneizar el tamaño de grano, se eliminan tensiones internas del material. La dureza y resistencia son mayores a las de un recocido, pero menores a las de un temple.

Recocido: Este es un conjunto de tratamientos térmicos que engloban los tratamientos de austenización completa, los tratamientos intercríticos y los

tratamientos subcríticos. La característica del recocido, sea del tipo que sea, es que es un enfriamiento relativamente lento, ya sea al aire o dentro de la mufla u horno, con frecuencia, tratando de simular un enfriamiento al equilibrio. En este tratamiento es donde se tiene la menor rapidez de enfriamiento, por lo general se enfría la muestra dentro del horno o mufla. Lo que se logra con este tratamiento es homogeneizar la microestructura, disminuir la dureza y la resistencia, aumentar la ductilidad y maleabilidad del material, eliminar tensiones y, dependiendo del tipo de recocido, puede o no recristalizar la microestructura proveniente de una deformación plástica en frío.

Tratamientos isotérmicos: Son tratamientos por lo general de austenización completa, los cuales consisten, a diferencia de los anteriores que son enfriamientos continuos, en hacer un enfriamiento interrumpido a una temperatura determinada. Dicho de otro modo, se enfría desde temperatura de austenización lo más pronto posible hasta una temperatura de interés y se permanece a esa temperatura el tiempo requerido dependiendo de las características físicas y químicas de la pieza. Lo que se busca en estos tratamientos es tener una estructura lo más homogénea posible en morfología y promover la transformación completa de un microconstituyente o mezcla de los mismos en particular, que enfriando de manera continua no se logra.

Por otra parte, encontramos a los tratamientos superficiales que a diferencia de los anteriores que buscan la modificación microestructural de toda la pieza, en dichos tratamientos se busca únicamente modificar la microestructura cercana a la superficie. Los hay de dos tipos: Los tratamientos térmicos superficiales con (tratamientos termoquímicos) y sin cambio en la composición química. Sus características son:

- **Tratamientos térmicos superficiales sin cambio en la composición química:** En estos tratamientos sólo se calienta la superficie a temperatura de austenización y el tiempo de permanencia a esa temperatura es corto, para pasar a un enfriamiento, por lo general, brusco. Lo que se busca generalmente es incrementar la dureza únicamente de la superficie del

material, manteniendo un centro tenaz. También se encuentran en este campo los tratamientos localizados, en los cuales se busca modificar la microestructura de una zona en particular de toda la superficie.

- Tratamientos termoquímicos o con cambio en la composición química: Estos tratamientos consisten en modificar la composición química de la superficie del material controlando la atmósfera o el medio en el que se lleva a cabo el calentamiento, permanencia y enfriamiento la pieza. La finalidad es aumentar la dureza y resistencia superficial de las piezas, resistiendo mejor el desgaste, pero manteniendo el centro tenaz. Por lo regular se aplican a piezas que no pueden ser endurecidas satisfactoriamente en la superficie por un tratamiento sin cambio en la composición química. Un ejemplo son las piezas con bajos contenidos en carbono, que se les aplica una carburación para formar martensita únicamente en la zona que se le modificó la composición química.

1.3 Métodos de calentamiento.

La fuente de calentamiento en los tratamientos térmicos es muy importante, es indispensable ocupar una fuente de calentamiento eficiente y potente para realizar el tratamiento en poco tiempo ya que todo se traduce en gastos.

Los métodos más comunes para las etapas de calentamiento y permanencia en los tratamientos térmicos son:

- Horno: Es una tecnología de calentamiento en el que se usan combustibles o electricidad para suministrar el calor. Hay de dos tipos, los de atmósfera controlada y los que no. Se usa para piezas de dimensiones muy grandes o lotes de piezas. El calentamiento en estos hornos es relativamente lento y por lo general las piezas se introducen a él cuando el horno ya está a la temperatura deseada. Hay una gran variedad de hornos por ejemplo los hornos de paso continuo, hornos tipo caja, hornos para revenido, hornos para carbonitruración, horno de enfriamiento rápido operado con o sin vacío, muflas, etc. Dependiendo del tipo de tratamiento térmico es el horno a utilizar

y por lo tanto la temperatura a la cual va a llegar. Dentro de los tipos de hornos, existen unos hornos eléctricos llamados *mufflas*, son para piezas relativamente pequeñas o pocas en número. Son mayormente utilizadas en laboratorios y de manera personal. Pueden ser o no de atmósfera controlada, siendo estáticas. Todos ellos suelen alcanzar temperaturas máximas entre 1200°C y 1300°C [3].

- Calentamiento por inducción: Es un método eléctrico de no contacto para calentar metales o cualquier material conductor a través de una bobina que induce una corriente eléctrica sobre el material a calentar, el cual funge como resistencia y es por eso que se calienta. Se puede usar en segmentos de piezas, piezas completas pequeñas o grandes, todo depende de las dimensiones y características de la bobina y de la fuente de poder a utilizar. La rapidez de calentamiento es muy alta y puede ser bien controlada y modificada dependiendo de los requerimientos. Dependiendo del tipo de máquina de inducción, pueden alcanzar temperaturas entre 3000°C hasta 6000°C. Pueden ser o no de atmósfera controlada y son ampliamente utilizadas en piezas endurecidas por sección o superficialmente [4].
- Láser: Consiste en hacer incidir un láser sobre la sección de interés y variar la densidad de potencia láser y los tiempos de interacción aplicados para llegar así a la temperatura de interés y así obtener las propiedades deseadas. La exposición láser puede ser momentánea o continua de tal manera que el movimiento entre la pieza y el láser produzca una huella. Tiene una rapidez de calentamiento relativamente alta. Los tratamientos por láser tienden a ser de endurecimiento y tienen una ventaja decisiva, ya que posibilita una entrada de calor selectiva en zonas predefinidas lo que no se puede en los métodos anteriores o no con tanta precisión. Los tratamientos térmicos realizados con éste método de calentamiento suelen mantener el núcleo del material tenaz y sólo endurecer la superficie y, como prácticamente no se producen grandes distorsiones en la estructura del material, no hay necesidad de aplicar tratamientos adicionales [5].

- A la flama: Es el método más antiguo y rudimentario para calentar metales al realizar tratamientos térmicos. La fuente de calentamiento es a base de combustibles y no se puede controlar la atmósfera, la pieza siempre está en contacto con la flama y los gases de combustión. Actualmente está en desuso ya que las temperaturas a alcanzar no son tan altas ni homogéneas en las piezas. Se utiliza más para tratamientos protectores como el pavonado. También se utiliza en la forja en caliente artesanal.

1.4 Calentamiento por inducción.

1.4.1 Breve historia del calentamiento por inducción [6].

La técnica de inducción ha existido desde casi 100 años y se han aplicado en la industria desde la década de 1920. La primera aplicación industrial de este método de calentamiento fue para la fusión y fue desarrollada en los Estados Unidos. Se convirtió en la técnica de fusión que incorporaban las nuevas fundidoras. Para la década de 1930, se desarrolló el primer proceso de tratamiento térmico por inducción.

Es un método ampliamente utilizado en la industria, gracias a que es rápido, eficiente, preciso y repetible. A su vez, cuando se requiere el calentamiento o fundición de metales en una atmósfera controlada y libre de oxígeno, éste es un método idóneo y muy utilizado. En esta manera de calentamiento, el material a calentar no está en contacto con otros materiales. El calentamiento por inducción estableció uno de los grandes avances en las tecnologías de manufactura, especialmente en la automotriz, producción de metales, forja, soldadura de tubos y otras áreas de la industria metalúrgica. Actualmente el campo de aplicación del calentamiento por inducción va en crecimiento, abarcando la industria médica, de comida, química, electrónica, agrícola, entre otros.

Estados Unidos y Rusia desarrollaron procesos comerciales para el endurecimiento por inducción de los pernos de los cigüeñales y juntas del cigüeñal. Rusia en 1939,

publicó el primer libro técnico sobre este tema, con un análisis profundo de tratamientos térmicos por inducción, titulado “Endure Surface Hardening by Induction Method”. Consecuentemente empezaron a aparecer más métodos y publicaciones donde se describía el efecto físico en los sistemas de inducción y ofrecían una guía para determinar el tiempo de calentamiento, frecuencia y potencia dependiendo si era calentamiento, fusión o endurecimiento. En la década de 1950 aparecieron diferentes procesos revolucionarios como el crecimiento de grano y soldadura de tubos a través de inducción.

Actualmente este método es usado en una gran variedad de aplicaciones en las que destacan:

- Fusión (producción de metal, refinación, fusión secundaria, aleaciones).
- Conformado en caliente (laminado, prensado, forja, extrusión, doblado).
- Tratamientos térmicos (endurecimiento superficial, crecimiento de grano, endurecimiento completo, temple, recocido y sinterizado).
- Tratamientos superficiales (recubrimientos, endurecimiento superficial, refusión, sellado).
- Unión (soldadura de tubos y perfiles, soldadura de contornos, soldadura, acoplamiento por contracción, unión adhesiva).
- Aplicaciones especiales (plasma por inducción, espectrómetros, medicina).

El calentamiento por inducción se utiliza en procesos con temperaturas que van desde tan solo 100°C hasta incluso 3000°C. Puede usarse en procesos de calentamiento breves en donde el campo está activo menos de medio segundo o en procesos que mantienen el campo en marcha durante meses.

1.4.2 Principio físico del calentamiento por inducción.

La inducción consiste en transferir energía a través de un campo electromagnético mediante una bobina a una pieza que se desea calentar o tratar.

El campo magnético utilizado se crea con una corriente alterna que fluye a través de la bobina. El campo es variante con el tiempo y éste es el encargado de inducir las corrientes eléctricas llamadas corrientes de remolino o *corrientes de Foucault* en el material a calentar [4]. El calor se genera en la pieza debido a la resistividad del material. Dicho fenómeno puede ser explicado de la siguiente manera. Cuando se tiene una corriente eléctrica atravesando un cable, se crea un campo magnético alrededor del mismo, cuando la corriente eléctrica cambia de sentido, se crea otro campo en el sentido opuesto al cambio del sentido de la corriente. Si se coloca un segundo cable dentro de ese campo magnético alterno, se genera una corriente alterna en el segundo cable. La corriente del segundo cable es proporcional a la corriente del primer cable y su magnitud es el inverso del cuadrado de la distancia que los separa [6].

Usando este principio, se sustituye el primer cable por una bobina que se utiliza para transferir la energía a la pieza mediante un campo electromagnético alterno y el segundo cable por una pieza metálica o conductora, la corriente alterna de la bobina crea un campo electromagnético y, mientras la pieza que se desea calentar se encuentra dentro del campo, se genera una corriente alterna sobre la pieza (figura 3).

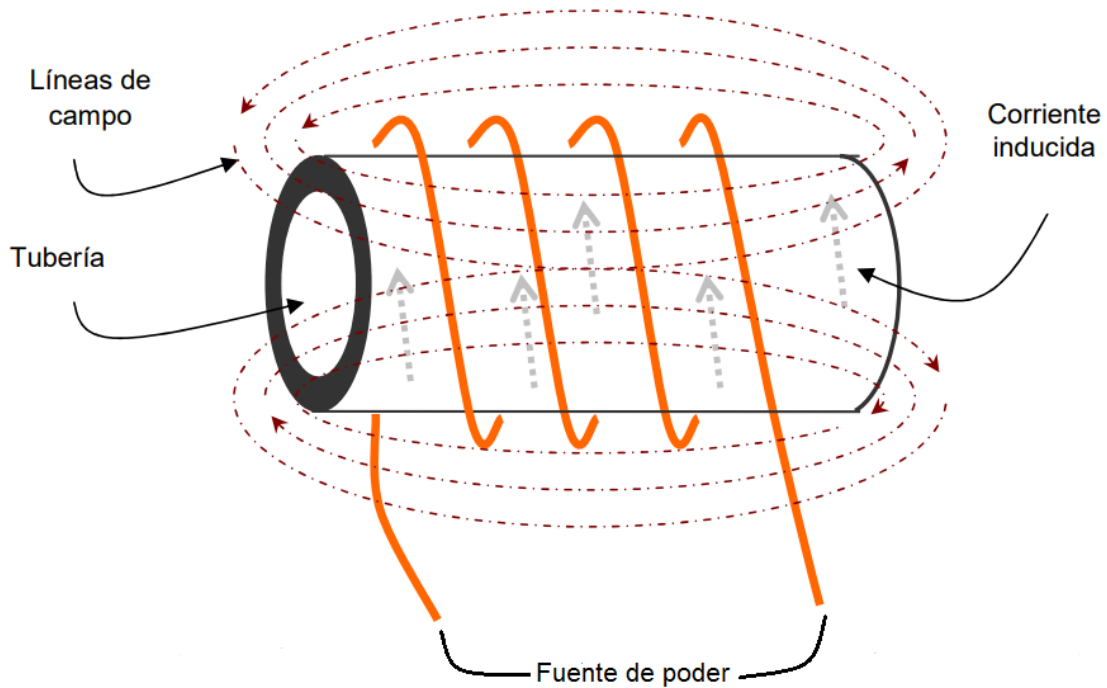


Figura 3. Esquema de inducción de corriente en un material conductor [7].

Visto de otra manera al colocar un objeto eléctricamente conductor dentro de una bobina con corriente variable, se generan corrientes parásitas a partir del campo magnético variable dentro del objeto. Estas corrientes parásitas se inducen como resultado de la ley de inducción electromagnética de Faraday [2]:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Dónde:

- e: es el voltaje inducido.
- N: número de vueltas de la bobina.
- $d\Phi/dt$: la tasa de cambio del campo electromagnético en función del tiempo.

El proceso de calentamiento por inducción puede ser modelado mediante la utilización de las leyes de Faraday, Ampere y el efecto Joule. Para aumentar la temperatura del metal, se requiere someter la pieza a un campo magnético variable en el tiempo, y de amplitud considerable. Bajo estas condiciones, en el interior de la

pieza se inducen corrientes que producen disipación de potencia; la cual se manifiesta con un incremento en la temperatura [8].

Si se mide en algún instante la dirección de la corriente inducida en la pieza de trabajo, la corriente de la bobina de inducción será aproximadamente opuesta a la corriente de la pieza y su patrón de flujo, por lo general, describirá una especie de imagen de semejanza o espejo de los patrones de los conductores de la bobina (figura 4). Las corrientes que son inducidas a la pieza generan también sus propios campos magnéticos, los cuales van a estar opuestos al campo generado por la bobina, evitando que el campo penetre en el centro del objeto, éste fenómeno es conocido también como corrientes parásitas. Debido a esto, las corrientes de Foucault estarán concentradas en la superficie, disminuyendo su fuerza hacia el centro del material. Este fenómeno produce el llamado *efecto piel*. En la figura 5 se esquematiza el efecto de la densidad de corriente (a) y la densidad de potencia (b). En a) J_x representa la densidad de corriente a cierta distancia desde la superficie, J_s es la densidad de corriente en la superficie. En b), W_x representa la densidad de potencia a cierta distancia de la superficie y W_s la densidad de potencia de superficie. En ambos casos d es la profundidad de referencia [2].

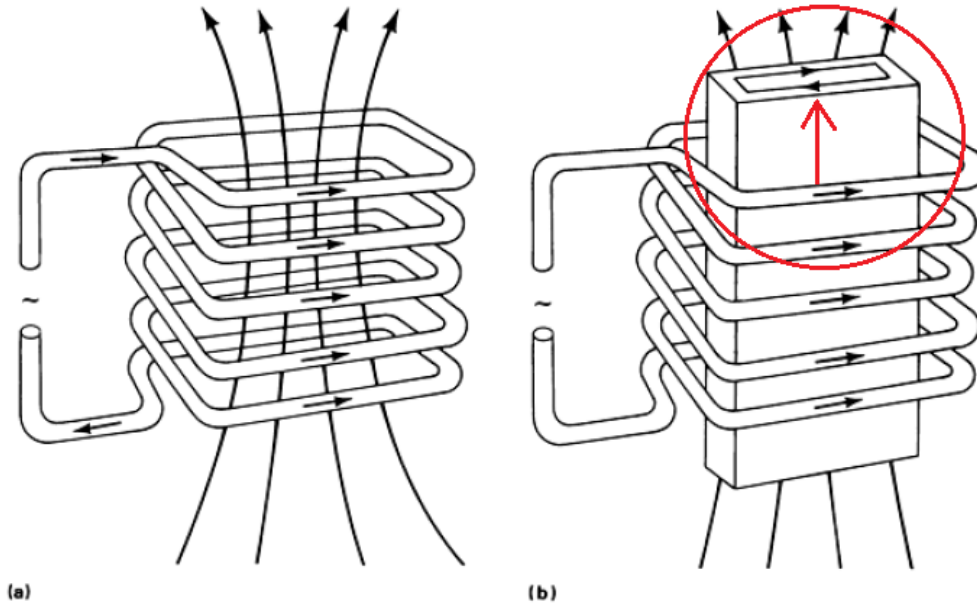


Figura 4. (a) Patrón de corrientes y campo magnético en una bobina tipo solenoide. (b) Patrón de corrientes y campo magnético inducidas a una pieza de trabajo. Nótese que las corrientes de Foucault son opuestas a la dirección de las corrientes de la bobina, señaladas con una flecha roja [2].

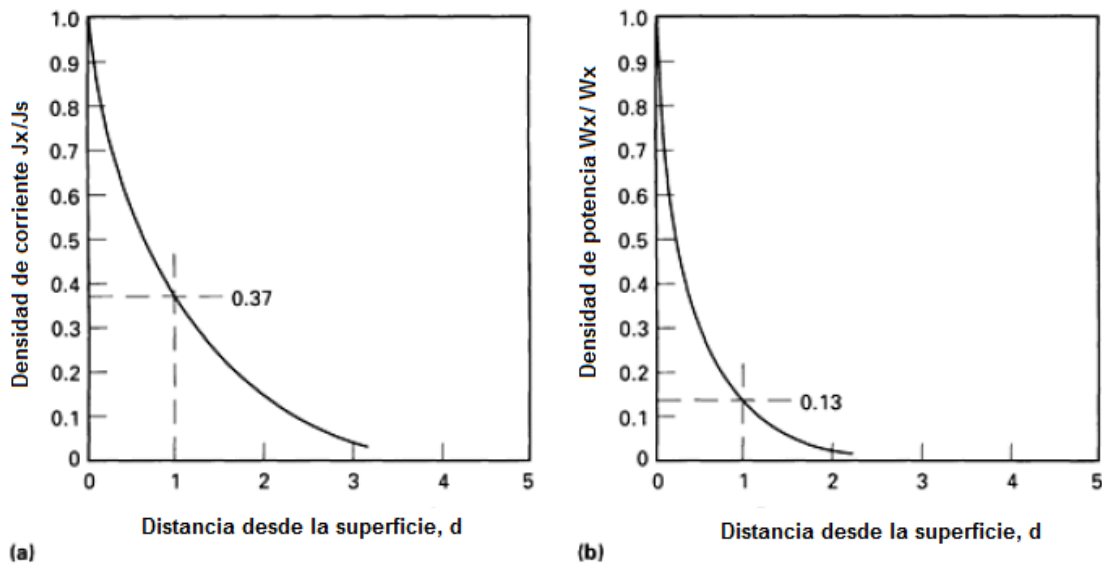


Figura 5. (a) Esquema de las características de densidad de corriente. (b) Esquema de las características de densidad de potencia [2].

La frecuencia a utilizar en un sistema de calentamiento por inducción depende de las dimensiones de la pieza que se desea calentar y el material del que está hecha. Cuando el campo electromagnético induce una corriente en la pieza, dicha corriente fluye principalmente por la superficie de la pieza. **Cuanto mayor es la frecuencia de trabajo, menor es la profundidad de alcance del campo**; cuanto menor es la frecuencia de trabajo, mayor es la profundidad de alcance del campo y la penetración del efecto de calentamiento (figura 6) [6]. También va a depender de las propiedades físicas del material, por ejemplo, un material con una permeabilidad magnética muy alta, provocará que el campo magnético se intensifique dentro del material y por consiguiente la corriente inducida será mayor, de tal forma que las corrientes llamadas *corrientes de Foucault* son las responsables del aumento de la temperatura de la pieza, debido a que existe una disipación de potencia en la superficie de la pieza muy grande [8]. A este efecto también se le conoce como *efecto cortical* [4]. Entonces la penetración del campo va a depender de la frecuencia de trabajo, las propiedades del material y la temperatura de la pieza, lo que hará que nuestro material se caliente en todo su volumen o sólo en la superficie.

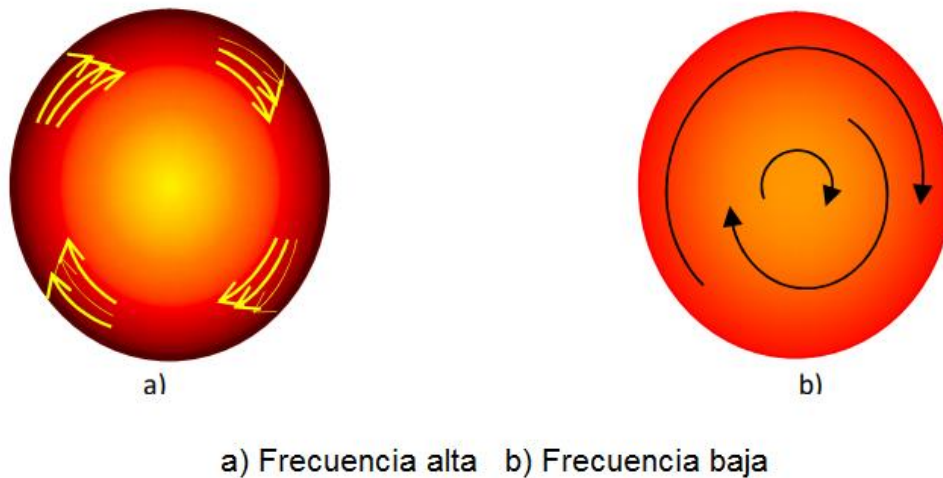


Figura 6. Efecto de la frecuencia en la zona de acción del campo en una pieza cilíndrica [9].

Para describir el *efecto piel* o el *efecto cortical* se hace uso de una ecuación diferencial que tiene soluciones en forma de funciones de Bessel. Estas soluciones demuestran que la corriente inducida en un objeto plano grande (entendiendo por esto que es mucho más grueso que la penetración de corriente parásita esperada) disminuye exponencialmente desde la superficie hacia el centro de la pieza de trabajo. Esto permite la definición de una profundidad efectiva de corrientes parásitas conocida como *profundidad de referencia* o *profundidad de penetración* (figura 6). La fórmula para calcular dicha profundidad está definida por [2]:

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\mu f}}$$

Dónde:

- d: es la profundidad de referencia.
- ρ : es la resistividad de la pieza de trabajo.
- μ_0 : es la permeabilidad magnética del vacío.
- μ : es la permeabilidad magnética relativa de la pieza de trabajo (sin tomar en cuenta las dimensiones).
- f: es la frecuencia del campo magnético alterno de la bobina.

Cuando la superficie de la pieza está más caliente que el resto del material, el calor comienza a migrar inmediatamente por conducción hacia la parte más fría, en este caso el centro de la pieza, causando que con el tiempo la temperatura sea uniforme en la misma. Por esta razón los tratamientos superficiales se realizan con calentamientos muy rápidos y con tiempos de permanencia cortos, para evitar la migración del calor al centro de la pieza y sólo se vea modificada la parte o zona de interés. Se usan niveles elevados tanto de potencia como de frecuencia para lograr el calentamiento sólo en la superficie, debido al efecto cortical. El control de la potencia se da gracias al control de un convertidor resonante, el cual es un puente

inversor que es el encargado de convertir la corriente continua en corriente alterna, tiene como función cambiar un voltaje de corriente continua de entrada en un voltaje corriente alterna simétrico a la salida, procurando que este posea la magnitud y frecuencia deseada [10]. Es alimentado por una fuente de corriente continua, conectado a una carga resonante que es la que se produce en un circuito eléctrico a una frecuencia de resonancia particular cuando las impedancias o admitancias de los elementos del circuito se cancelan entre sí [11]. En los circuitos de las máquinas de inducción se utilizan con el fin de aumentar la potencia. Dicho control se realiza mediante la modificación del nivel de corriente de entrada o por medio de la variación de la frecuencia [8].

Por otra parte, si lo que se requiere calentar es toda la pieza, de manera general se tiene que usar potencias bajas, así como frecuencias bajas para lograr un calentamiento uniforme de toda la sección transversal de la pieza.

De manera general, el calentamiento de piezas pequeñas por inducción requiere sistemas de alta frecuencia, muchas veces por encima de los 10 kHz y las piezas grandes se calientan más eficientemente con sistemas de baja frecuencia, usualmente 60 Hz. Se han desarrollado tres rangos de frecuencia básicos para la clasificación de los sistemas de calentamiento por inducción:

- Sistemas de baja frecuencia: sistemas de frecuencia de línea de 50 o 60 Hz.
- Sistemas de frecuencia media: con triplicadores o convertidores de 150 o 180 Hz hasta aproximadamente 10 kHz.
- Sistemas de alta frecuencia: con 10 kHz o superiores.

Los sistemas de frecuencia van a depender en gran medida de la instalación eléctrica del lugar de trabajo, siendo el más comúnmente utilizado el sistema de baja frecuencia, ya que las redes eléctricas de muchos países oscilan entre los 50 y 60 Hz.

Por otro lado, el campo electromagnético debe ser lo suficientemente intenso para inducir la corriente necesaria para que pueda elevar la temperatura del material de interés en un tiempo muy corto. Cuando el material es ferromagnético, el campo

necesario puede ser menos potente, pero cuando se trabaja con piezas que no son ferromagnéticas, el campo necesario debe de ser más potente.

Suponiendo que se necesita una intensidad de campo “H” y la bobina del tipo solenoide consta de pocas espiras, entonces el nivel de corriente debe ser muy grande para obtener una intensidad del campo magnético alta. Si se requiere la misma intensidad de campo “H” y el número de espiras es grande, se debe amplificar el voltaje para que circule un nivel de corriente bajo y evitar grandes pérdidas por conducción ya que la resistencia de la bobina se ha incrementado [4].

Para esto se usa la relación de un solenoide:

$$H = \frac{N * I}{L}$$

Dónde:

- H = Intensidad de campo magnético
- N = Número de espiras.
- I = Corriente que circula a través de la bobina.
- L = Longitud del solenoide.

Todo lo anterior radica, más que en la fuente de poder, en la construcción y diseño de la bobina de calentamiento ya que determina el nivel de corriente que se le debe suministrar.

1.4.2.1 Generalidades de los sistemas de inducción.

Los sistemas de calentamiento por inducción constan de una fuente de alimentación de inducción que convierte la potencia de la red eléctrica en una corriente directa y la suministra a un cabezal de trabajo y una bobina que crea un campo electromagnético, mejor conocida como fuente de poder. Tienen tableros ya sea integrados o de manera externa para controlar frecuencia, potencia, tiempo de operación, etc. Constan también de una bobina hueca (generalmente, aunque suele haber bobinas macizas) que se acopla a la fuente de alimentación. Dicha bobina es hueca para ser refrigerada con agua ya que por radiación se empieza a calentar y si se usan temperaturas mayores al punto de fusión del cobre (1083°C) éste puede fundirse, o si la bobina está soldada con soldadura de estaño (que funde a los 232°C) ésta también puede fundirse y deja de inducir el campo, (figura 7). El agua es bombeada por un sistema de recirculación que va desde una simple bomba de agua, hasta columnas de enfriamiento e intercambiadores de calor para que el agua siempre ingrese fría al equipo y por esta razón las bobinas son frías al tacto.

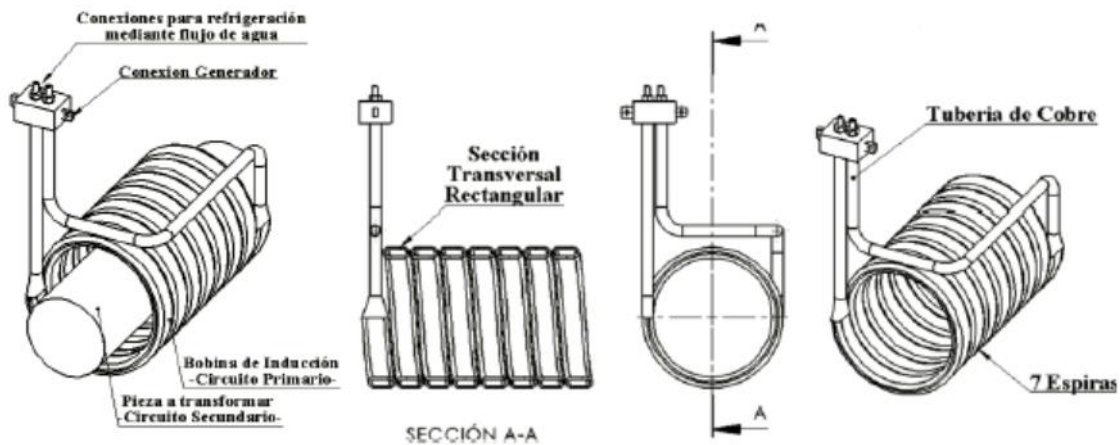


Figura 7. Representación de un sistema de inducción [12].

La pieza se sitúa dentro de la bobina, donde este campo induce una corriente en la pieza, generalmente alrededor de la pieza de trabajo o junto a ésta. La bobina no toca la pieza y el calor se genera únicamente por la corriente inducida que fluye por la pieza. El material de la pieza puede ser un metal, por ejemplo, acero, cobre, aluminio o latón, o puede ser un semiconductor, como carbón grafito o carburo de silicio. Para calentar materiales no conductores, por ejemplo, los plásticos o el vidrio, la inducción puede calentar a un conductor de la electricidad, típicamente el grafito, que a su vez transfiere el calor al material no conductor [6].

Existen principalmente seis tipos de fuentes de poder para aplicaciones de calentamiento por inducción de corriente alterna. Cada una diseñada para suministrar energía de corriente alterna dentro de un rango de frecuencia dado. Estos seis tipos son [2]:

- Sistemas de frecuencia de línea.
- Multiplicadores de frecuencia.
- Motor-generador.
- Fuentes de alimentación de radiofrecuencia (RF).
- Tubo de vacío.
- Inversores de estado sólido (estático).
- Convertidores de chispa.

Actualmente el oscilador de chispa ya no se fabrica, y la fuente de alimentación estática de estado sólido ha reemplazado a las máquinas rotativas o motor-generador. La Tabla 1 proporciona los rangos de frecuencia, potencia, eficiencias aproximadas y otras características de las cuatro fuentes principales de poder en las máquinas de calentamiento por inducción.

Tabla 1. Características de la mayoría de las fuentes de poder de calentamiento por inducción [2].

Fuente de Poder	Rango de Frecuencia	Rango de Potencia	Eficiencia (%)	Características
Sistemas de frecuencia de línea.	60 Hz	100 kW a 100 MW	90-95	Alta eficiencia, bajo costo, sin equipo complejo, profunda penetración de corriente
Motor-generador	500 Hz a 10 kHz	10 kW a 1 MW	75-85	Baja sensibilidad al calor ambiental, baja sensibilidad a sobretensiones de línea, frecuencia fija, bajo costo de mantenimiento, repuestos no necesarios
Inversores de estado Sólido	180 Hz a 50 kHz	1 kW a 2 MW	75-95	Sin corriente de espera, alta eficiencia, sin partes móviles, necesita protección al aire libre, sin tiempo de calentamiento, la impedancia coincide con las cargas cambiantes
Tubo de vacío	50 kHz a 10 MHz	1 kW a 500 kW	50-75	Profundidad de calentamiento superficial, calefacción localizada; mayor costo, la impedancia coincide con las cargas cambiantes, eficiencia más baja

Por otro lado, las bobinas varían en complejidad, desde una simple bobina enrollada con forma helicoidal, hasta una bobina mecanizada con alta precisión a partir de cobre macizo y soldada. Las hay de diferentes morfologías dependiendo del uso, la geometría y dimensiones de la pieza a calentar.

1.5 Efecto del calentamiento por inducción en la microestructura [2].

En un tratamiento térmico la dureza, así como el perfil de durezas dependen del contenido de carbono, la composición química del acero y del medio de temple o

enfriamiento. Las piezas austenizadas por inducción no son la excepción. Los métodos convencionales de calentamiento mediante hornos o muflas llevan un control riguroso del tiempo y la temperatura ya que son los parámetros críticos que deben controlarse. Para austenizar completamente un acero hipoeutectoide, se requiere elevar la temperatura de la pieza por encima de A_3 un cierto tiempo. El tiempo de permanencia para formar una microestructura totalmente austenítica depende de la temperatura de austenización seleccionada y de la microestructura inicial. En ambos casos, inducción o métodos convencionales, la velocidad con la que se forma la austenita se controla mediante la difusión de carbono, un proceso que puede acelerarse en gran medida aumentando la temperatura. Por ejemplo, el tiempo para una austenización completa en un acero al carbono simple de composición eutectoide con una microestructura inicial de perlita se reduce de aproximadamente 400 segundos a una temperatura de austenización de 730°C a aproximadamente 30 segundos a una temperatura de austenización de 750°C .

El calentamiento por inducción se considera un ciclo de calentamiento continuo, por lo que las temperaturas críticas en dicho tipo de calentamiento siempre están por encima de las temperaturas críticas de equilibrio. Esta diferencia se incrementa conforme la velocidad de calentamiento aumenta, este efecto se muestra, en la figura 9 para la temperatura A_{c3} de un acero 1042 con diferentes microestructuras iniciales. La microestructura proveniente de temple que es martensita, presenta el menor cambio en A_{c3} , en comparación con la temperatura de equilibrio, mientras que el mismo acero con microestructura recocida presenta la mayor diferencia de A_{c3} inclusive con velocidades de calentamiento muy lentas. La tendencia mostrada se explica por el hecho de que al austenizar, el carbono tiene que difundir de los lugares de mayor concentración (de la cementita en el caso de las muestras recocida y normalizada) a donde hay menor concentración. La distancia recorrida en esta difusión para homogeneizar el carbono en la austenita es más corta en la muestra templada, ya que el carbono está inmerso en la ferrita, distorsionándola. Por su contraparte la distancia de difusión es más larga en las otras dos muestras y mayor en la recocida, debido a que las placas de cementita tienen mayor espesor.

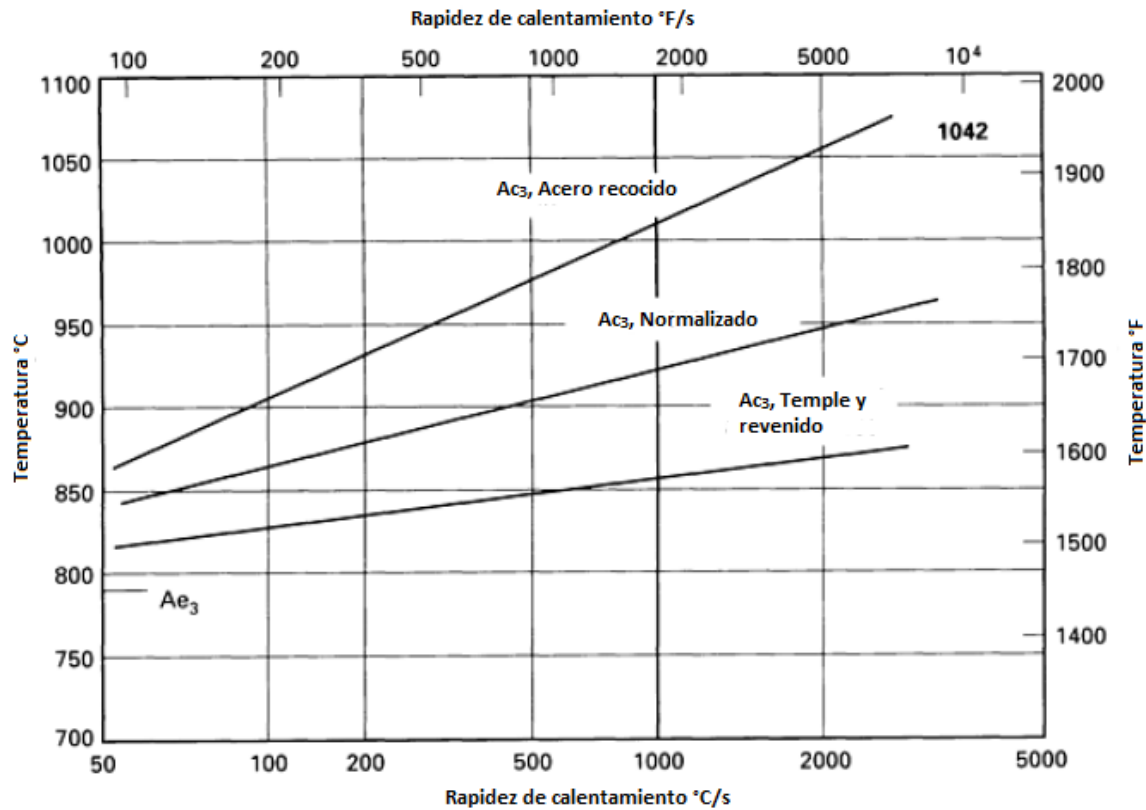


Figura 8. Efecto de la microestructura previa y la velocidad de calentamiento sobre la temperatura A_{c3} de un acero 1042.

Haciendo uso de las investigaciones y datos arrojados por experimentos como el mostrado en la figura 8, se han derivado pautas para determinar la temperatura de austenización requerida para el endurecimiento de una amplia gama de aceros mediante el calentamiento por inducción. En la tabla 2 se muestran los parámetros cercanos al acero 4140.

Tabla 2. Diferencias en la temperatura de austenización completa para diferentes aceros al carbono.

% de Carbono	Temperatura de calentamiento en el Horno (°C)	Temperatura de calentamiento por inducción (°C)
0.35	830-855	900
0.40	830-855	870-900
0.45	800-845	870-900

De manera general, A_{c3} se ve modificada conforme se modifica el contenido de carbono según el diagrama de fases (figura 1). Dicha temperatura se debe desplazar aproximadamente 100°C por encima de la temperatura crítica superior de equilibrio, principalmente para reducir el tiempo de austenización durante los ciclos continuos de calentamiento por inducción. A pesar de este incremento se estima que todavía se operará por debajo de las temperaturas donde se produce un crecimiento indeseable de grano austenítico. Este incremento depende únicamente del contenido de carbono, por lo que se recomienda para aleaciones con fuertes elementos formadores de carburos como titanio, cromo, molibdeno, vanadio, niobio o tungsteno, una temperatura de austenización de al menos otros 100°C por encima de la ya modificada anteriormente.

Una de las características importantes por el cual se endurecen piezas mediante calentamiento por inducción es la capacidad para obtener durezas un poco más altas que las obtenidas con calentamientos convencionales en horno (figura 9).

El incremento en la dureza de las muestras calentadas por inducción se atribuye a tres razones principales: tensiones residuales, menores cantidades de austenita retenida y segregación de carbono. Profundizando:

- En el caso de las tensiones residuales, se crean esfuerzos de compresión en aquellos aceros que se endurecieron superficialmente, debido a la menor cantidad de martensita. Durante el enfriamiento, las capas internas de mayor

densidad se contraen más que las capas superficiales, lo que genera estas tensiones residuales aumentando así la dureza.

- En el caso de la austenita retenida, hay menores cantidades de austenita retenida en aceros calentados por inducción y templados debido a la formación de una martensita más fina. La martensita también puede ser más dura ya que se forma de un grano menos homogéneo y más fino de austenita al no tener permanencias en calentamiento largas. Esto ocasiona un mayor número de defectos cristalinos.
- El incremento en la dureza debido a la segregación de carbono se deriva del hecho de que la austenización por inducción normalmente implica un calentamiento rápido y requiere tiempos de retención cortos, lo que puede conducir a una variación en el contenido de carbono dentro de los granos de austenita. Por lo tanto, se forma una mezcla de martensita de alto carbono y una de bajo carbono durante el enfriamiento rápido. Es la martensita alta en carbono la que da lugar a mayores durezas. Este efecto disminuye en los aceros cuyo contenido de carbono excede aproximadamente del 0,6 al 0,8% en peso, por encima del cual la dureza de la martensita no cambia.

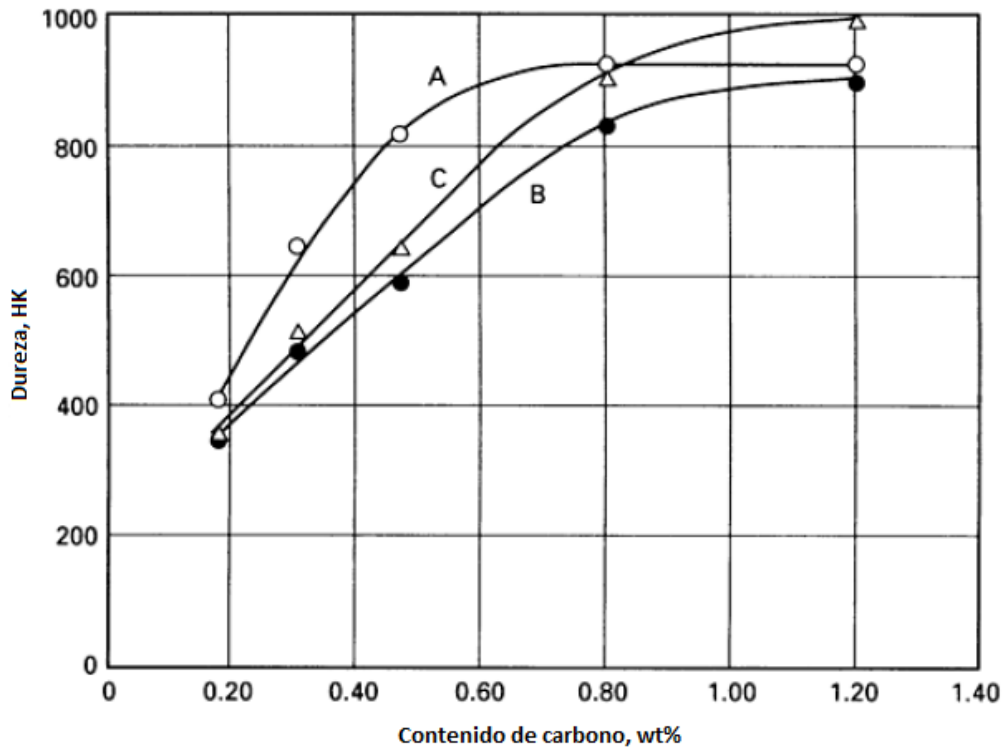


Figura 9. Efecto del contenido de carbono sobre la dureza en aceros al carbono. Curva A: endurecimiento por calentamiento por inducción y temple en agua. Curva B: endurecido por calentamiento en horno y enfriamiento en agua. Curva C: endurecido por calentamiento en horno, templado en agua y revenido.

Por otro lado, los cambios metalúrgicos durante el calentamiento con altas velocidades apenas se están estudiando. Se han realizado estudios a partir de la dilatometría de inducción. El equipo de Clarke et al [13] aplicó en un acero 5150 dicha técnica, con microestructuras iniciales de ferrita-perlita y martensita templada para evaluar los efectos de la microestructura previa controlada experimentalmente y la velocidad de calentamiento sobre la cinética de austenización. Las velocidades de calentamiento se variaron de 0.3 a 300 °C/s para simular procesos industriales y se realizaron pruebas de dureza y metalografía. Los resultados muestran que la cinética de transformación para microestructuras previas de ferrita-perlita es significativamente más lenta que para microestructuras templadas con martensita templada, aunque la dureza final es equivalente. La evidencia metalográfica sugiere

una significativa segregación remanente de cromo en regiones de cementita dentro de la perlita, no se observó evidencia de segregación en la pieza con martensita templada previa. El artículo habla acerca de las simulaciones de transformación basadas en difusión, se observó segregación a partir de ferrita-perlita, también sugieren que la segregación residual de elementos de aleación es posible para estructuras de martensita templada previa [13].

Por otra parte, Spezzapria et al [14] estudiaron, la formación de austenita a partir de tres microestructuras previas diferentes. En un acero 39NiCrMo3 (equivalente SAE 9840), que es ampliamente utilizado en la industria, especialmente para tratamientos de calentamiento por inducción, debido a su resistencia al agrietamiento. La microestructura inicial de *sorbita*¹ con carburos finos, *sorbita* con carburos gruesos y martensita templada, se examina en detalle mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y mediciones de microdureza Vickers. Las pruebas dilatométricas se realizan empleando diferentes velocidades de calentamiento que abarcan de 100 a 800°C/s.

Los resultados experimentales se comparan y se vinculan críticamente para determinar los factores fundamentales que rigen la formación de austenita cuando se usan altas velocidades de calentamiento. Se observa que la formación de austenita a partir de *sorbita* con carburos gruesos y finos se produce en dos etapas consecutivas: 1.-disolución del carburo y 2.-transformación de ferrita a austenita. La temperatura de inicio y finalización de la transformación austenítica aumenta con la velocidad de calentamiento. Para la microestructura martensítica templada, en cambio, la transformación ferrita a austenita puede tener lugar a través de dos mecanismos diferentes: difusivo a bajas velocidades de calentamiento y desplazable (reversión de austenita) a alta velocidad de calentamiento, formando en esta última una martensita más dura. Los puntos críticos de la formación de austenita aumentan inicialmente con la velocidad de calentamiento, alcanzan un máximo y luego disminuyen a una velocidad de calentamiento alta [14].

1.- Se usa el término sorbita como microconstituyente porque el autor del artículo así lo presenta, aunque actualmente la sorbita recibe el nombre de bainita.

1.6 Análisis de rutas térmicas.

Como se menciona con anterioridad, cuando un acero se calienta o se enfría ya sea desde el estado líquido o solamente en estado sólido, sufre cambios de fase, los cuales pueden ser monitoreados con ayuda del análisis de rutas térmicas. En la figura 10 se muestra una ruta térmica de los cambios alotrópicos o cambios de fase que presenta el hierro puro desde la fase líquida hasta temperatura ambiente, en la cual para cada cambio de fase se observa una meseta o línea horizontal, que representa el calor latente de la transformación para después observar un cambio de pendiente. Cabe destacar que la meseta correspondiente al cambio de ferrita a ferrita magnética es únicamente ilustrativa, ya que en una curva de enfriamiento no se distingue ese cambio.

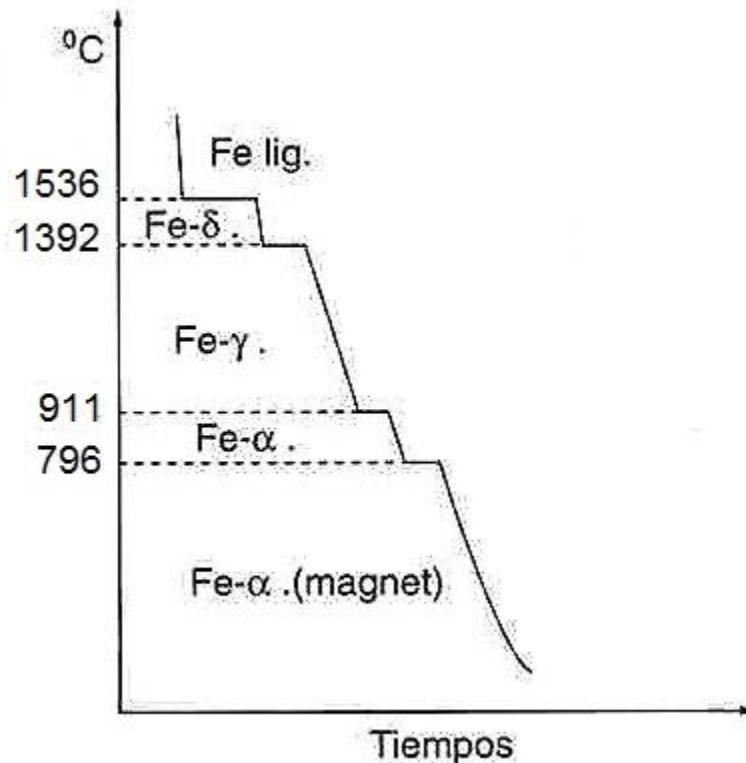


Figura 10. Curva de enfriamiento del hierro puro.

Durante la aplicación de los tratamientos térmicos es común monitorear la temperatura. El análisis de las rutas térmicas puede conducirnos a la obtención de los datos de transferencia de calor en función de la temperatura (flujo de calor) y es la manera más útil de describir con precisión, por ejemplo, el régimen de mojabilidad durante el temple a partir de la obtención de una curva de enfriamiento para el medio de temple bajo condiciones controladas. [15].

La información que nos provee dicho análisis es diversa, pero se basa en encontrar los cambios de pendiente o los puntos de inflexión de la curva. En el caso de los hierros y aceros, los cambios de pendiente pueden corresponder a los puntos eutéctico y eutectoide, en los aceros, también al cruce de las temperaturas críticas superiores de transformación (A_3 y A_{cm}), incluso puede ser indicio del inicio de la transformación martensítica, entre otros casos. El primer cambio que aparece durante el enfriamiento puede decirse que es el inicio de alguna transformación y cuando se encuentra otro, se puede decir que está terminando la transformación o comenzando otra nueva. Esto ocurre debido a que el material absorbe energía (en el caso del calentamiento) o libera energía (en el caso del enfriamiento) para realizar dicha transformación. Por ejemplo, para un temple de un acero 4140, los parámetros mayormente obtenidos son:

- La rapidez de enfriamiento máxima.
- La rapidez de enfriamiento alrededor de M_s [16].

La figura 11 muestra una curva de enfriamiento experimental para una pieza rectangular de acero 4140 de 6"x7", en el que se monitorean diferentes secciones, enfriada en un medio polimérico para observar las diferentes rapidezces de enfriamiento. Los termopares T1, T3, T4 y T5 están en las orillas de la pieza y el termopar T2 está en el centro del material. Las curvas correspondientes a los termopares colocados en las orillas presentan un cambio de pendiente alrededor de los 314°C, posteriormente se incrementa la temperatura y alcanza un máximo alrededor de los 350°C y vuelve a descender la temperatura. Para este acero, estos cambios pueden ser los correspondientes a la transformación martensítica. En cambio, el termopar T2 no presenta esa tendencia ya que presenta otra rapidez de

enfriamiento como se puede observar en la figura 12, en este caso hay un cambio de pendiente a una temperatura mayor, alrededor de los 500°C, lo que correspondería a otra transformación.

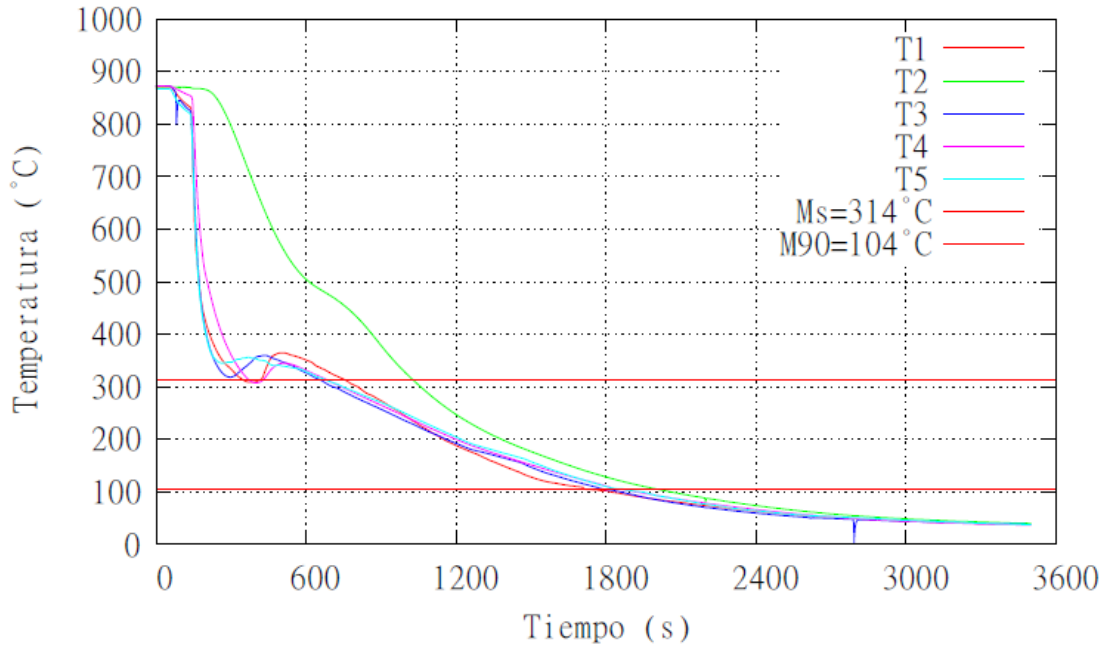


Figura 11. Curvas de enfriamiento para un acero 4140 [16].

Para determinar los puntos de inicio de cambio de pendiente en las curvas de calentamiento o enfriamiento, se hace uso de análisis matemáticos para encontrarlos. La rapidez de enfriamiento se obtiene derivando numéricamente la curva con respecto al tiempo para cada pareja de datos como se muestra a continuación:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

Con esta operación se genera un valor el cual nos indicará en forma de picos los cambios de pendiente que nos refieren a las transformaciones. La figura 12 muestra la aplicación del criterio de la primera derivada para el análisis de las rutas térmicas presentadas en la figura 11 para un acero 4140.

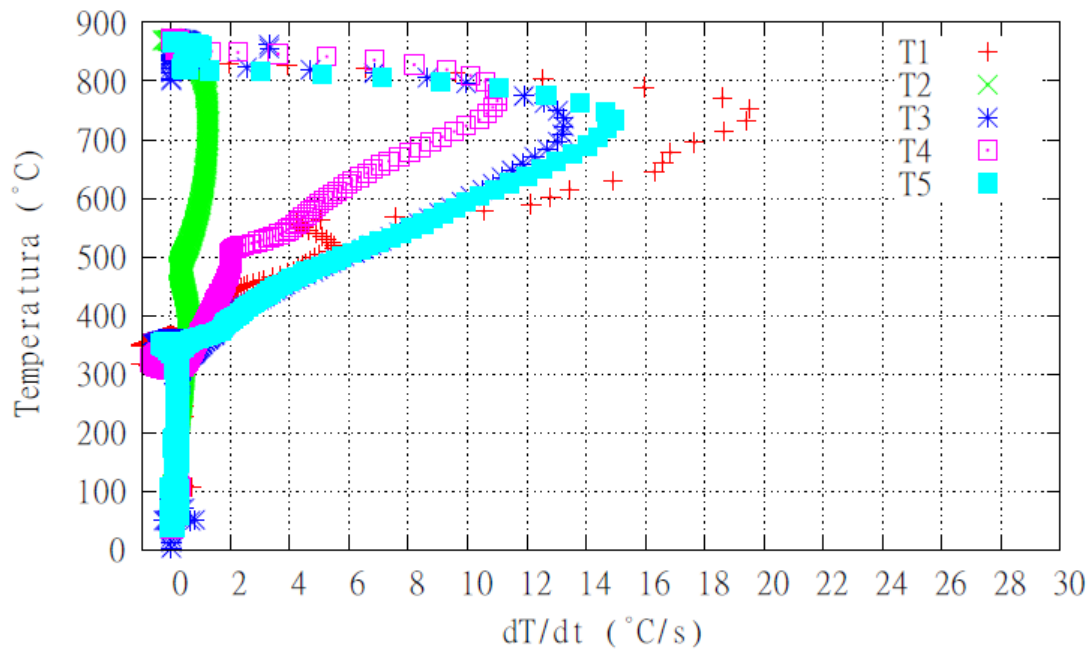


Figura 12. Rapideces de enfriamiento correspondientes a las rutas térmicas presentados en la figura 11 [16].

A pesar de que el enfriamiento es la etapa más analizada, es importante monitorear el calentamiento ya que se obtienen de manera experimental las temperaturas a las cuales se está transformando el material debido al calentamiento fuera del equilibrio. Cuando las rapidezces tanto de calentamiento como de enfriamiento son muy altas, se debe utilizar un equipo con mayor resolución ya que los cambios suceden muy rápidamente. Lo contrario sucede cuando las rapidezces de calentamiento son muy lentas, los cambios no son apreciables a simple vista.

Capítulo 2.

Desarrollo Experimental.

Para realizar la parte experimental se utilizó una máquina de inducción fabricada por la empresa Inducción de Metales S.A. de C. V. modelo PWR25-3AF, **adquirida con el proyecto PAPIME PE107619** (figura 14) con el fin de calentar piezas pequeñas de acero para realizar tratamientos térmicos.

En el presente trabajo se estudia el efecto de la corriente de salida sobre la rapidez de calentamiento en piezas cilíndricas de acero de diferentes diámetros.

2.1. Características y descripción de la máquina de inducción.

La máquina de inducción tiene acoplada una bobina de cobre del tipo solenoide con un diámetro de 47.6 mm (1.875”), una altura de 23.5 mm (0.926”), un diámetro del tubo de la bobina de 5.7 mm (0.224”) y 3 vueltas (figura 13). La máquina cuenta con las características enlistadas en la Tabla 3; de entre ellas las corrientes en el calentamiento y retención, así como los tiempos de calentamiento y retención corresponden a las variables de operación.



Figura 13. Bobina de la Máquina de inducción PWR25-3AF.

Tabla 3. Características de la máquina de inducción según el proveedor.

Modelo	PWR25-3AF
Voltaje de entrada	220 V fase simple
Rango de voltaje de entrada	200 – 240 V
Máxima potencia de salida	15 KW
Frecuencia oscilatoria de salida	30 – 80 KHz
Corriente en el calentamiento	200 - 780 A
Corriente en la retención	200 – 780 A
Tiempo de calentamiento	1 - 99 segundos
Tiempo de retención	1 - 99 segundos
Dimensiones	64 x 28 x 55 cm
Presión del agua de enfriamiento	> 0.12 MPa
Flujo del agua de enfriamiento	> 7 L/min
Temperatura del agua de enfriamiento	< 40°C
Estructura	Transformador separado

La máquina de inducción cuenta con un panel frontal que en la parte superior izquierda consta de tres focos led y un indicador digital de tiempo. En la parte derecha existen tres selectores analógicos de tiempo, uno para establecer el tiempo en que se acciona la bobina para el calentamiento (heating time), el segundo para el tiempo que se mantiene la inducción sobre la pieza (retaining time) y el tercero para un tiempo de enfriamiento (cooling time) que sirve para hacer una pausa entre varios ciclos de inducción. Tanto el tiempo de calentamiento como el tiempo de retención constituyen en suma el tiempo de acción de la inducción sobre la pieza. Los tres controles de tiempo se pueden ajustar desde cero hasta 99 segundos. Los focos led de la izquierda se encienden de acuerdo con la etapa operante en cada momento.

En la parte media izquierda, se observa un panel digital en donde se muestra el valor de la corriente de salida ya sea de la etapa de calentamiento o retención, esta

corriente de salida se selecciona con las perillas que se encuentran debajo de este panel, siendo la izquierda para el calentamiento y la derecha para la retención. En la parte derecha de esta sección media se encuentran varios indicadores led correspondientes a alertas o errores de funcionamiento, así como la indicación del modo con el que se opera el equipo (manual o automático). También consta de dos botones, uno verde y uno rojo, los cuales corresponden al inicio y paro de la inducción respectivamente. Debajo del botón de apagado está ubicada una palanca con la que se acciona el modo automático o manual.

En la parte inferior izquierda del panel de control se encuentra el botón (rojo) de encendido de la máquina de inducción. Por último, debajo del panel se encuentra la bobina (figura 14).



Figura 14. Máquina de inducción PWR25-3AF.

2.2 Efecto de la corriente de salida sobre el calentamiento de piezas cilíndricas de acero.

Con el objetivo de conocer el efecto de las corrientes de salida sobre el calentamiento logrado en las piezas de acero, el trabajo experimental se dividió en dos partes.

En la primera parte se realizaron una serie de pruebas en donde se utilizaron diferentes valores de corrientes de salida que entrega la máquina de inducción durante las etapas de calentamiento y retención, manteniendo constante su valor y el tiempo de operación en ambas etapas.

La segunda parte consistió en el estudio de las curvas de calentamiento para analizar el comportamiento térmico de las piezas de aceros con distintos diámetros.

2.2.1 Obtención de las curvas de calentamiento.

Esta primera parte consistió en obtener las curvas de calentamiento que muestren el efecto de la corriente de salida sobre el calentamiento de las piezas de acero, para comenzar se seleccionaron de acuerdo a la Tabla 3, siete valores de corriente de salida (200, 300, 400, 500, 600, 700 y 780 en amperes), es decir, todo el abanico de posibilidades que ofrece la máquina de inducción en intervalos representativos y de fácil control. En cuanto al tiempo se utilizó el máximo permitido por la máquina en funcionamiento automático, que es de 99 segundos, tanto en el calentamiento como en la retención, teniendo un tiempo total de acción de la inducción de 198 segundos sobre las piezas.

Para cada prueba se cortaron y refrentaron las piezas cilíndricas de acero de tal forma que tuvieran las dimensiones descritas en la tabla 4, con la finalidad de estudiar los diámetros más utilizadas en las prácticas de laboratorio de licenciatura sobre metalurgia física de la Facultad de Química. Todas las piezas constaron con una perforación al centro del diámetro a una profundidad de 10 mm (0.394”), esta perforación se realizó para insertar un termopar tipo K (alumel-cromel) de 1.58 mm

(0.062") de diámetro (figura 15) con el cual se monitoreo y registró la temperatura de la pieza durante los ciclos de calentamiento.

Tabla 4. Dimensiones de las piezas utilizadas para las curvas de calentamiento.

Diámetro	Altura
25.4 mm (1")	19.05 mm (¾")
19.05 mm (¾")	
12.7 mm (½")	



Figura 15. Probetas de acero utilizadas.

Cada pieza se colocó dentro de la bobina de manera centrada, como se muestra en la figura 16 a), sobre una pieza de material refractario con una cama de lana térmica para evitar las pérdidas de calor por conducción en la base del cilindro. Posteriormente en la perforación de la pieza de acero, se introduce el termopar tipo K y se conecta al sistema de adquisición de datos compuesto por una computadora portátil, el adquisidor **PicoLog® TC-08 (USB)** así como el software integrado al adquisidor (figura 16 b)).



a)



b)

Figura 16. a) Probeta colocada en el centro de la bobina. b) Sistema de experimentación completo.

Para cada abanico de corriente se parte de la misma temperatura como condición inicial de calentamiento para evitar posibles variaciones y cambios en el comportamiento de las curvas. Posteriormente se configuró la máquina de inducción colocando el interruptor en posición “automático”, las perillas que controlan las

corrientes de salida en el calentamiento y retención, se colocaron en la posición que entregara la corriente deseada y se configuró el tiempo de acción de la máquina de inducción en 99 segundos para calentamiento y 99 segundos para retención como se muestra en la figura 17. Una vez con la máquina de inducción configurada y con la pieza colocada dentro de la bobina, se configuró el sistema de adquisición de datos recopilando la información cada 250 milisegundos en tiempo real continuo. Todos estos pasos se repitieron para cada prueba realizada.



Figura 17. Ejemplo de la configuración del panel de control de la máquina de inducción.

Con todo lo anterior configurado se procedió con la recopilación de datos y a la par se presionó el botón verde (inicio) de la máquina de inducción para que el experimento comenzara. Con el experimento en proceso se monitoreó la temperatura alcanzada en tiempo real.

Se repitieron los pasos anteriores para cada corriente de salida para construir las curvas de calentamiento para cada diámetro de pieza cilíndrica, las pruebas se realizaron por triplicado para validar la repetitividad de las mediciones.

2.2.2 Tratamiento de datos y análisis de las curvas de calentamiento.

En esta segunda parte se analizaron las curvas de calentamiento, los datos obtenidos fueron suavizados en el programa **Sigma Plot 12.5** empleando el suavizador *bisquare* en dos dimensiones con la finalidad de disminuir la interferencia (ruido) en los datos obtenidos. Con los datos procesados se construyeron gráficos de tiempo vs temperatura para cada una de las diferentes condiciones (corriente y diámetro) que se utilizaron.

Primero se construyó un gráfico que abarcara todo el abanico de corrientes (desde la de menor hasta la de mayor valor) que describiera el comportamiento para cada una de las piezas cilíndricas, obteniendo tres gráficos correspondientes a los tres diámetros (tabla 4), cada uno con las curvas de calentamiento correspondientes a las corrientes de salida descritas en la sección 2.2.1 de este trabajo.

Posteriormente se aislaron las curvas de calentamiento correspondientes a cada corriente y se les aplicó el criterio de la primera derivada numérica hacia adelante con el fin de obtener el valor de rapidez instantánea, la cual se graficó como eje secundario de primera derivada vs tiempo para sobreponerla en la curva de calentamiento. Se analizaron los datos obtenidos tales como rapidez máxima de calentamiento, cambios de pendiente, etc.

Por último, se graficaron para cada corriente las tres curvas de calentamiento correspondientes a cada pieza de diferente diámetro para comparar el efecto de la diferencia de masa.

Hasta aquí concluye la parte del desarrollo experimental para la realización del presente trabajo, por lo que se procederá a presentar los resultados obtenidos derivados de lo descrito en este capítulo. Para fines prácticos y un mejor entendimiento de la nomenclatura de las curvas que se presentarán en el capítulo 3, se debe entender por “gráfico” a la compilación de curvas de calentamiento correspondientes a un mismo diámetro de pieza de acero cilíndrica o a la comparativa de curvas de calentamiento para diferentes diámetros de pieza de acero a una misma corriente.

Capítulo 3.

Resultados y análisis.

En los siguientes párrafos se muestran los resultados obtenidos del trabajo experimental realizado. Se presentan en tres partes. La primera corresponde a los gráficos obtenidos que describen el calentamiento por inducción para múltiples corrientes de salida y los tres diámetros de pieza de acero. Posteriormente se presentan los resultados de la segunda parte que consisten en el análisis térmico de las curvas de calentamiento utilizando el criterio de la primera derivada. Y, por último, la tercera parte presenta los resultados de la comparativa de las curvas de calentamiento observando y analizando el efecto de la diferencia de masa.

3.1 Curvas de calentamiento.

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la primera parte de este trabajo. En las figuras 18, 19 y 20 se presentan los tres gráficos construidos que describen el calentamiento por inducción de las piezas cilíndricas de diferentes diámetros. Durante la operación se encontró que, a diferencia de lo que menciona el manual de la máquina de inducción, las corrientes de salida van desde 70 A hasta 760 A y no de 200 A hasta 780 A, por lo que el barrido de corrientes se ajustó de la siguiente manera: Corriente mínima (70 A), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y corriente máxima (760 A), por lo que ahora se tienen nueve curvas de calentamiento en lugar de las siete planteadas originalmente.

Cada gráfico es una recopilación de las curvas obtenidas por triplicado para cada corriente de salida y diámetro de pieza. Al generar dichos gráficos, se encontró que, cuando la temperatura de inicio entre los experimentos para la misma corriente y mismo diámetro de pieza era mayor a 2°C, se tenía una variación en el comportamiento de las curvas de calentamiento, en cambio cuando la diferencia era de 1°C el comportamiento entre las curvas era similar. Por lo tanto, se tomó la decisión de seleccionar las curvas que iniciaran máximo a $\pm 1^\circ\text{C}$ entre sí. Por lo que se puede decir que el calentamiento por inducción parecer ser sensible a la

temperatura de inicio de las piezas de ensayo derivado de las elevadas rapidezces de calentamiento logradas, por lo que se sugiere que éste sea un tema de análisis para trabajos posteriores.

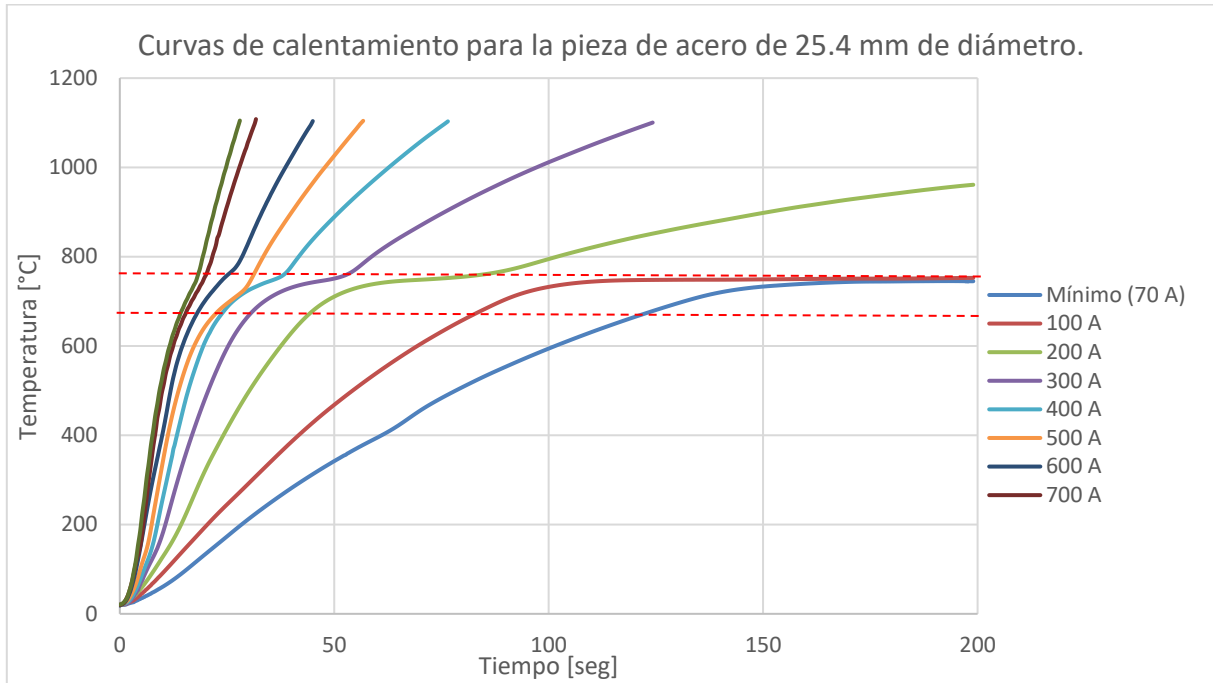


Figura 18. Gráfico de las curvas de calentamiento para para la pieza de acero de 25.4 mm de diámetro.

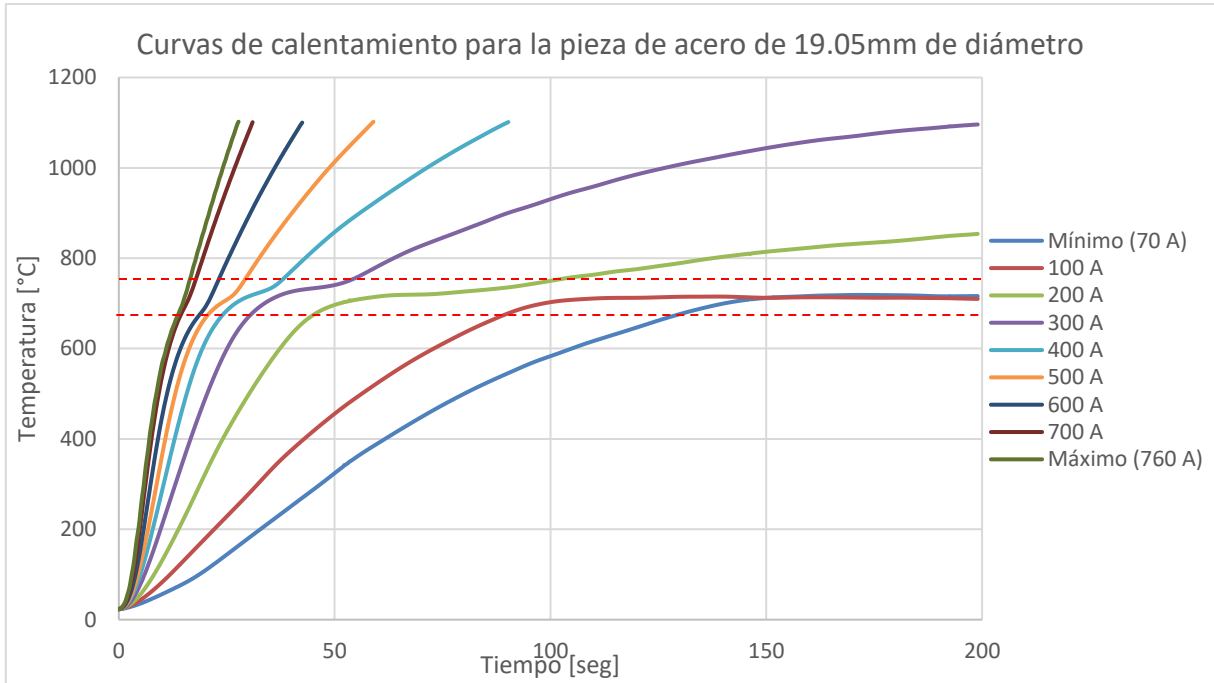


Figura 19. Gráfico de las curvas de calentamiento para la pieza de acero de 19.05 mm de diámetro.

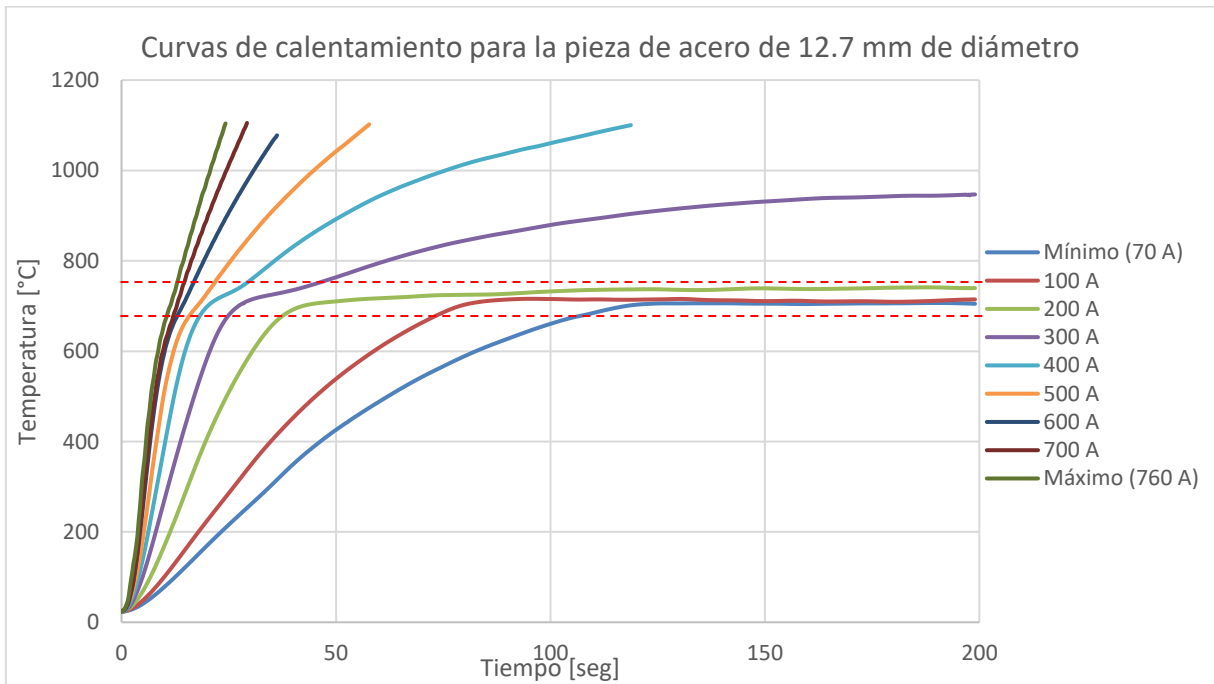


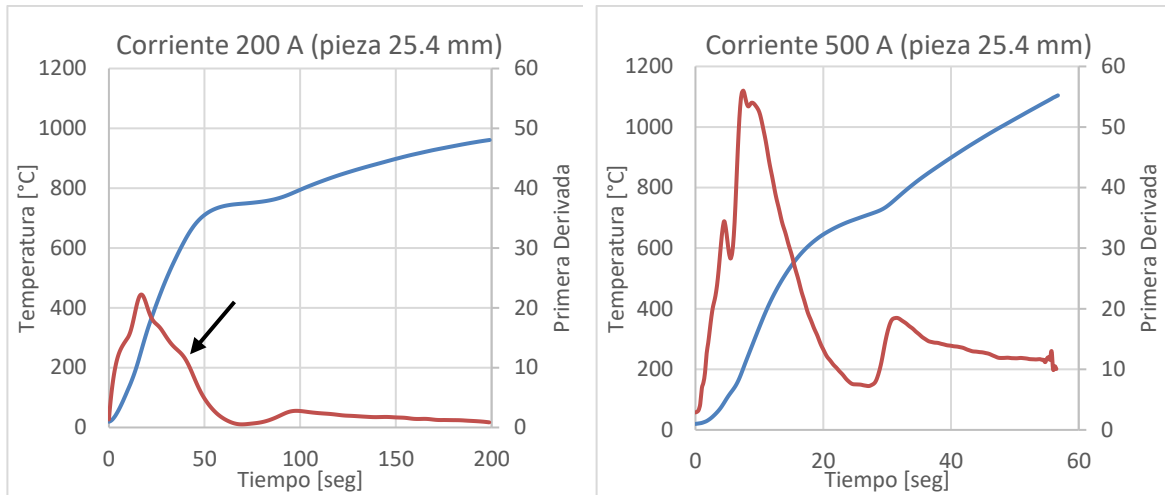
Figura 20. Gráfico de las curvas de calentamiento para la pieza de acero de 12.7 mm de diámetro.

En las figuras 18, 19 y 20, se muestra que todas las curvas de calentamiento no superan los 1100 °C. La razón por la cual se detuvieron los experimentos a dicha temperatura es que los termopares tipo K con un diámetro de 0.0625 mm o 1/16" no se recomiendan para medir temperaturas mayores a 1100°C debido a que se altera su incertidumbre por las tensiones térmicas [18]. Adicionalmente, en los tratamientos térmicos convencionales de los aceros no suelen utilizarse temperaturas mayores a 1100°C.

En todos los gráficos anteriores se presenta un cambio en el comportamiento de las curvas de calentamiento, este ocurre aproximadamente entre 680°C y 750°C (líneas rojas punteadas), dependiendo de la corriente de salida y el diámetro de la pieza. Para explicar dicho cambio, primero es necesario presentar y explicar los resultados de la parte dos de este trabajo.

3.2 Análisis térmico.

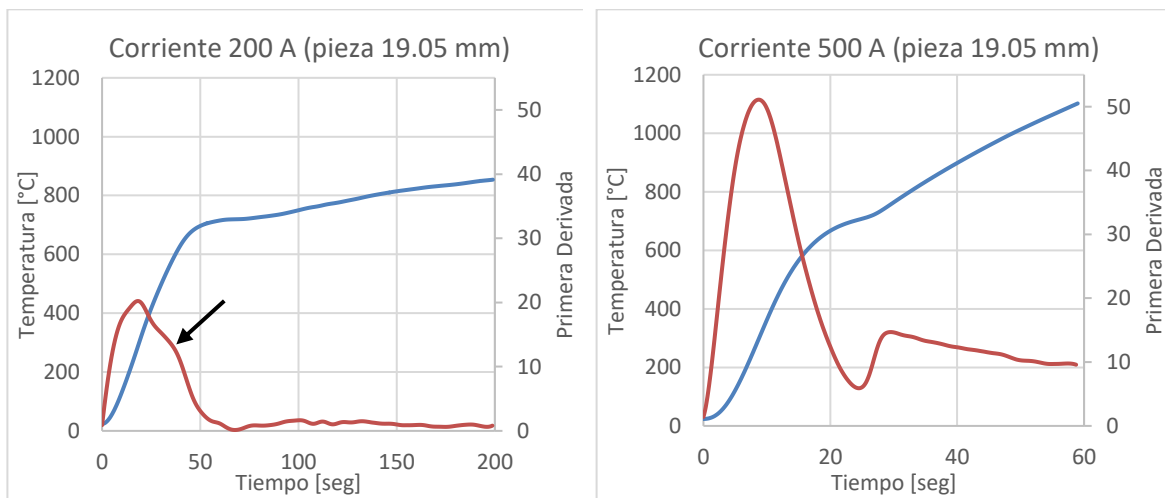
En esta sección se presentan los resultados de la segunda parte de este trabajo. Las figuras 21, 22 y 23 muestran los gráficos correspondientes a las curvas de calentamiento para corrientes de 200 A y 500 A, las cuales tienen aplicado y graficado en el eje secundario de las ordenadas al origen, el criterio de la primera derivada, con el fin de analizar lo que ocurre durante el calentamiento. Se muestra la corriente de 200 A debido a que para todos los diámetros es la corriente mínima en la cual se puede alcanzar A_1 , que teóricamente es de 727°C utilizando el diagrama de fase (figura 1) o 743°C determinado con la ecuación de Andrews. También se muestra la corriente de 500 A debido a que en este valor todas las piezas alcanzan 1100°C y el ruido es mínimo (comparado con las corrientes mayores a esta) y no interfiere con el análisis.



a)

b)

Figura 21. Gráfico para la pieza cilíndrica de acero de 25.4 mm de diámetro sometida a una corriente de: a) 200 A b) 500 A. En color azul la curva de calentamiento, en color rojo el criterio de la primera derivada.



a)

b)

Figura 22. Gráfico para la pieza cilíndrica de acero de 19.05 mm de diámetro sometida a una corriente de: a) 200 A b) 500 A. En color azul la curva de calentamiento, en color rojo el criterio de la primera derivada.

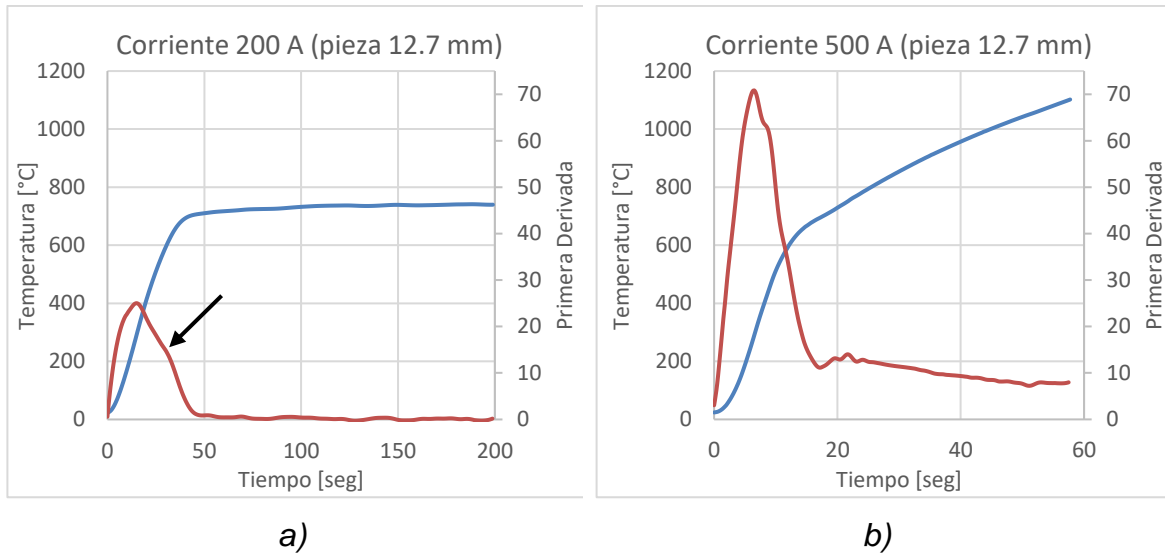


Figura 23. Gráfico para la pieza cilíndrica de acero de 12.7 mm de diámetro sometida a una corriente de: a) 200 A b) 500 A. En color azul la curva de calentamiento, en color rojo el criterio de la primera derivada.

Para la serie a) de las figuras 21, 22 y 23 se señala con una flecha negra el cambio de pendiente en la curva de la primera derivada para una corriente de 200 A. Este cambio en primera instancia puede sugerir que se está cruzando la temperatura crítica inferior (A_1), pero la temperatura a la que esto ocurre es menor a A_1 como para poder afirmar que ese cambio se debe a la transformación de fase, aunado a que en el calentamiento por inducción las líneas críticas se desplazan a temperaturas mayores. Para la corriente de 500 A (serie b) de las figuras 21, 22 y 23) ese cambio de pendiente en la primera derivada, no se distingue con claridad, por lo que se puede sugerir que el calentamiento es demasiado rápido y que el ruido presente a pesar de que se suavizaron los datos dificulta su identificación, entonces no se señala en el gráfico.

Las piezas de 25.4 mm y 19.05 mm alcanzan temperaturas mayores a los 791.32°C que es la temperatura crítica superior según la ecuación de Andrews para un acero 4140. En estos casos podemos asegurar que, al detener el experimento, ya se cruzó A_3 , por lo que se debería percibir algún cambio en la pendiente en el transcurso de la gráfica de primera derivada, el cual se asocia a una temperatura de

transformación. Para la pieza de 12.7 mm con una corriente de 200 A se descarta totalmente el cruce de la temperatura crítica superior durante el calentamiento por inducción debido a que la temperatura máxima alcanzada es de 744°C.

Por otro lado, se observa que todos los gráficos presentan para la curva de la primera derivada, máximos y mínimos o puntos de inflexión que sugieren la presencia de un fenómeno ya que la rapidez de calentamiento varía drásticamente y no coincide con ninguna temperatura crítica. Por lo tanto, se sugiere que esta pueda ser una rama de investigación para trabajos posteriores y poder explicar el fenómeno observado.

En los gráficos de las figuras 18, 19 y 20, se observa un cambio en la rapidez de calentamiento (líneas punteadas rojas) que se puede deber a dos factores: la temperatura de Curie y la fracción de ferrita y austenita formadas en la zona intercrítica entre A_1 y A_3 conforme el acero se va calentando.

Como se mencionó en el capítulo 2, el monitoreo de la temperatura se llevó a cabo en el centro de la pieza. En esta posición la mayoría del calor llega por conducción desde la superficie, entonces se plantea lo siguiente: cuando la superficie cambie sus propiedades magnéticas, en el centro se verá reflejado dicho cambio unos milisegundos o segundos después. Esto podría ser la razón del porqué aparece el cambio en el comportamiento de las curvas a temperaturas menores a la temperatura de Curie que es de 771.11°C (1420°F) para aceros con un contenido de carbono máximo de 0.5% [19]. La superficie entonces pudo haber alcanzado la temperatura de Curie generando este cambio en el comportamiento, esto se puede comprobar realizando un trabajo en donde se monitoree la temperatura a diferentes posiciones del radio incluyendo la superficie.

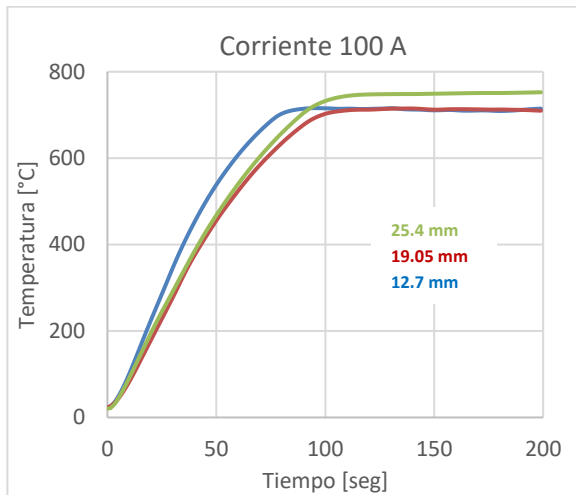
Pasando ahora al segundo factor, antes de superar la temperatura crítica inferior (A_1), el acero es magnético, ya que la fase predominante es la ferrita. Cuando se supera la temperatura crítica inferior se transforma la cementita en austenita, la cual no es magnética, haciendo que el carácter magnético de todo el acero comience a cambiar. Si se continúa aumentando la temperatura, la ferrita comenzará a

transformar en austenita, de tal forma que la ferrita magnética remanente va a tener menos presencia y, al superar la temperatura de Curie, el acero dejará de ser magnético en su totalidad y por lo tanto habrá cambiado su carácter magnético completamente lo que a su vez es equivalente a rebasar la temperatura crítica superior (A_3). Se propone abrir aquí una rama de investigación complementaria a este trabajo en donde se comprueben las propiedades magnéticas del acero a dichas temperaturas y tiempos en los que se presentan los cambios en las curvas de calentamiento.

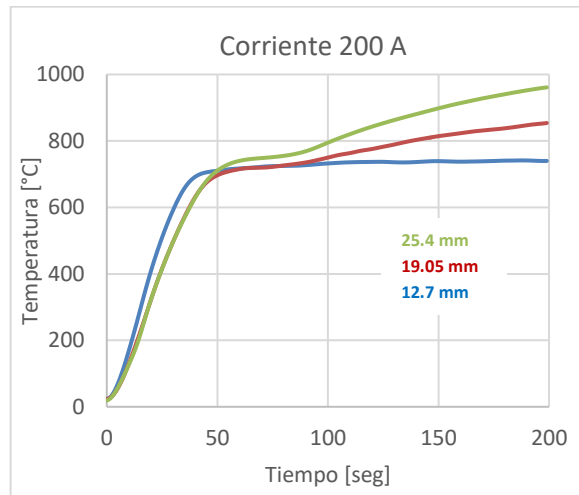
Por otra parte, para la corriente de 200 A (*serie a*)), de las figuras 21, 22 y 23 se observa en el último segmento de la curva de primera derivada, que la rapidez de calentamiento permanece prácticamente constante y presentando algunas variaciones debidas al ruido e interferencia. En el caso de la *serie b*) de las figuras 21, 22 y 23 (corriente de 500 A) el último segmento de la rapidez de calentamiento se observa una mayor variación con respecto a la corriente de 200 A. Esta variación es debida a que, al ser una corriente mayor, el calentamiento por inducción es más rápido y toma cierto tiempo homogenizar la temperatura dentro de la pieza por lo que este se va a expresar en forma de variaciones que, conforme se disminuye el diámetro de la pieza (y por ende su masa), son cada vez menores. Esto abre un nuevo punto de análisis de este trabajo, el cual se presenta en el apartado siguiente.

3.2.1 Comparativa de la diferencia de masas.

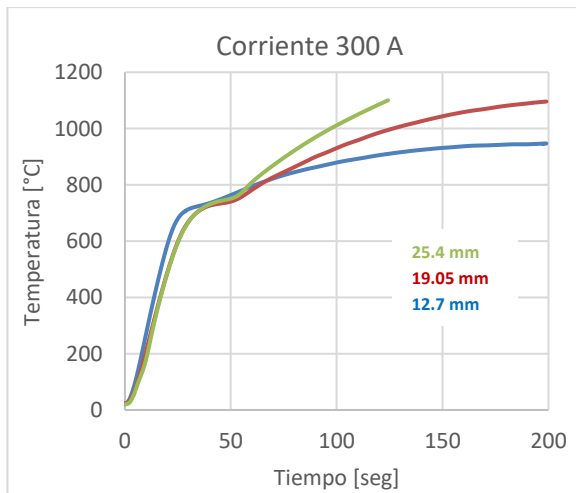
En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la tercera parte de este trabajo que consisten en el análisis de las curvas de calentamiento por inducción y el efecto de la masa de las piezas. Por lo tanto, se graficaron curvas de calentamiento de los tres diámetros de pieza utilizados para una misma corriente. En la figura 24, se presentan los gráficos construidos para comparar el efecto de la masa calentada a diferentes corrientes.



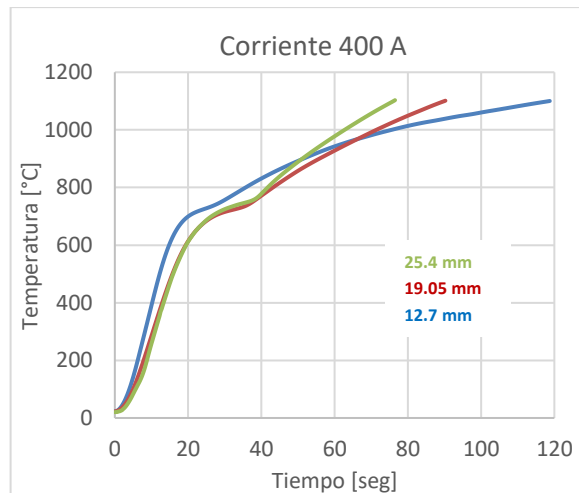
a)



b)



c)



d)

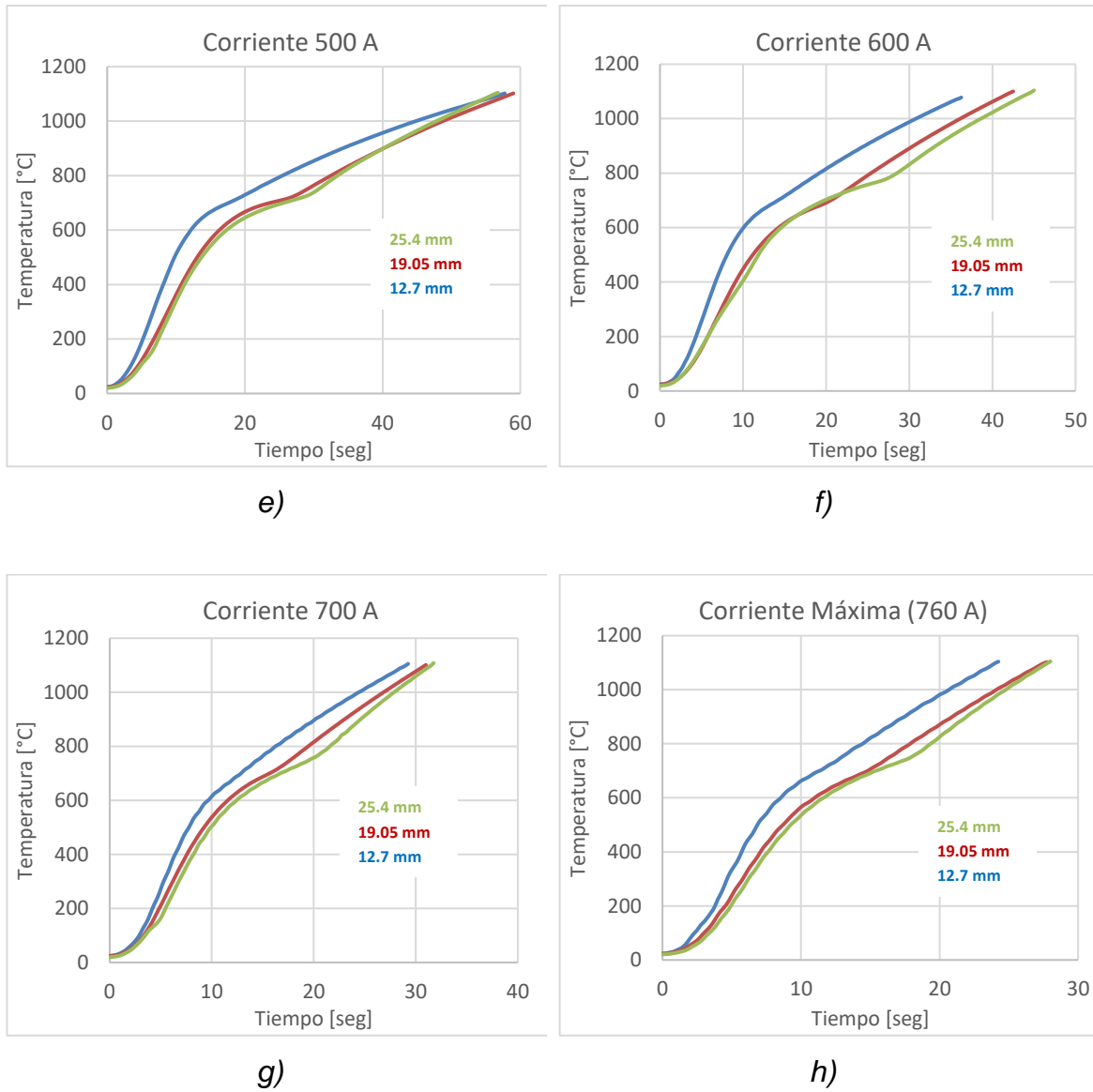


Figura 24. Comparativo del efecto de la masa en las curvas de calentamiento para las piezas cilíndricas de acero a una corriente de: a) 100 A, b) 200 A, c) 300 A, d) 400 A, e) 500 A, f) 600 A, g) 700 A y h) Corriente máxima (760 A).

Como se puede observar en todos los gráficos de la figura 24, la pieza que se calienta en menor tiempo, es la correspondiente al diámetro de 12.7 mm, es decir la de menor diámetro y por ende menor masa. Se observa que también es la que tiene una mayor rapidez de calentamiento antes de presentar el cambio en el comportamiento descrito en la sección anterior, es decir antes de los 680°C aproximadamente.

Para las corrientes desde 100 A hasta 400 A (figura *incisos a), b), c) y d)*), la pieza con un diámetro de 12.7 mm tarda más tiempo en alcanzar la temperatura más alta, siendo la corriente de 400 A la única corriente de las mencionadas en lograr los 1100°C. Para la pieza de 25.4 mm se logran los 1100°C a partir de la corriente de 200 A y para la pieza de 19.05 mm se logran con la corriente de 300 A. Por lo que, a corrientes bajas y medias generadas por la máquina de inducción, las piezas con mayor masa se calientan un poco más lento, pero logran alcanzar temperaturas más altas en el mismo o en menor tiempo que para piezas de menor masa. Esto es debido a que los experimentos se realizaron en un sistema abierto (figura 16), por lo que se esperan pérdidas de calor por convección natural y por conducción con el material refractario de la base, haciendo que la pieza de menor diámetro presente una mayor pérdida de temperatura, reflejándose como más tiempo en alcanzar la máxima temperatura y menor temperatura alcanzada.

La pieza de diámetro de 12.7 mm a corrientes de 100 A y 200 A (figura 24 *incisos a) y b)*) llega a una zona a los 680°C aproximadamente en que ya no sigue aumentando su temperatura. En este caso, la potencia y penetración del campo magnético no son suficientes para lograr que la pieza aumente más su temperatura, aunado a que es un sistema abierto como se mencionó anteriormente. Sucede algo similar con la pieza de 19.05 mm, pero sólo con la corriente de 100 A. Por lo tanto, se sugiere un trabajo complementario en el que se logre medir qué tanto penetra el campo magnético dentro de la bobina y cuánto de este se induce sobre cada dimensión de pieza, ya que para la pieza de 25.4 mm a una corriente de 100 A, es donde se alcanza una temperatura mayor. Esto es debido a que la diferencia de

masa hace que la pieza conserve mejor su temperatura y que la presencia del campo logre mantenerla más elevada.

Para las corrientes de 500 A hasta 760 A (figura 24 *e*), *f*), *g*) y *h*)), el comportamiento es diferente, la pieza de 12.7 mm, es decir, la de menor masa, alcanza los 1100°C en un menor tiempo que todas las demás y la pieza de mayor masa (25.4 mm) es la que tarda más en alcanzar dichos 1100°C. Esto es debido a que como la superficie de la pieza cilíndrica es la que se calienta por inducción y el centro se calienta principalmente por conducción, el efecto de la masa es desfavorable (desde el punto de vista de calentar más rápido), ya que, a mayor masa, tarda más en calentarse debido a que de manera radial, el calor debe recorrer mayor distancia.

Por otro lado, se observa que para todas las corrientes de la figura 24, la pieza con un diámetro de 25.4 mm es la que presenta la inflexión a mayor temperatura con respecto a las otras dos piezas más pequeñas. Esto puede atribuirse a que al ser la pieza de mayor masa podría existir un retraso en el tiempo y un aumento en la temperatura en los cambios de las propiedades magnéticas, pero se tendría que confirmar con experimentaciones posteriores.

Hasta aquí se termina el análisis de resultados del presente trabajo experimental. Como se notó a lo largo de este recorrido, se dejan muchas puertas abiertas para seguir profundizando en el conocimiento y entendimiento del calentamiento por inducción con investigaciones complementarias que tomen al presente escrito como punto de partida.

Capítulo 4

Conclusiones.

- La rapidez de calentamiento de las piezas de acero mediante la inducción es mayor que la que se obtiene en las mufas.
- Se logró calentar una pieza de acero de 12.7 mm de diámetro desde temperatura ambiente hasta 1100°C en aproximadamente 24 segundos.
- El calentamiento por inducción es sensible a la temperatura de inicio de la pieza a calentar.
- La máquina de inducción puede mantener temperaturas constantes sin necesidad de modificar la corriente de salida.
- No se logró determinar el inicio y fin de la transformación austenítica (A_1 y A_3).
- Para corrientes comprendidas entre 70 A y 400 A: entre menor sea el diámetro de la pieza más rápido se calentará hasta temperaturas cercanas a A_{e1} , pero toma más tiempo llegar a una temperatura cercana a 1100°C.
- Para corrientes comprendidas entre 500 A y 760 A: entre menor sea el diámetro de la pieza, más rápido se calentará hasta los 1100°C.
- En los gráficos se observa una relación directa entre retraso en el tiempo en el que suceden los cambios y la masa de la pieza.
- En los gráficos se observa una relación directa entre el aumento de la temperatura a la que suceden los cambios y la masa de la pieza.

Bibliografía.

[1] George E. Totten, Ph.D., FASM STEEL HEAT TREATMENT Metallurgy and Technologies, Portland, Oregon, U.S.A., segunda edición, editorial Taylor & Francis, 2007, pág. 1-27, 50-84.

[2] ASM International Vol 4 páginas 16, 398-402, 404-406, 442-448.

[3] Koyo Machine Industries Co., Crystec Technology Trading GmbH, Tratamientos térmicos de acero, Hornos de revenido, temple, recocido, enfriamiento. Consultado el 8/06/2020. Recuperado de:

<https://www.crystec.com/klthsts.htm>

[4] Julio Ortega Alejos, Leonel Estrada Rojo, Carlos A. Fuentes Hernández, Elías J. J. Rodríguez Segura, Israel Álvarez Ariza, José Jesús Arizaga Ibarra y Diego Díaz López, *Sistema de calentamiento por inducción electromagnética para pruebas experimentales en laboratorios de Físico-Química*, Pistas Educativas, No. 112, Noviembre 2015. México, Instituto Tecnológico de Celaya, pág. 642-647.

[5] GNC láser, *Servicios para el procesado de materiales por Tecnología Láser*, Descargado el 8/06/2020, Recuperado de:

<https://www.gnclaser.es/files/galeria/Temple%20GNC%20L%E1ser.pdf>

[6] George E. Totten, Ph.D., FASM STEEL HEAT TREATMENT Equipment and Process Design, Portland, Oregon, U.S.A., segunda edición, editorial Taylor & Francis, 2006, pág. 277-400.

[7] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, "Handbook of Induction Heating". 2003.

[8] Acevedo Picón Alfredo, Barrero Pérez Jaime y Augusto Gélvez Figueredo Julio, *CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO*, UIS Ingenierías, Volumen 6, Junio 2007; Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, UIS, pág. 70.

[9] V. Rudnev, "A fresh look at induction heating of tubular products: Part 1". Heat treating progress. July-August 2004.

[10] Christian Brañas, Rosario Casanueva, Francisco J. Azcondo, Salvador Bracho, Convertidores Resonantes, Propiedades y Aplicaciones para la Alimentación de Cargas Irregulares, Universidad de Cantabria, Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática. Consultado el 5/07/2020. Recuperado de:

<http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/taee:congreso-2004-1070/S2F04.pdf>

[11] Quiles Hoyo, José, Problemas resueltos de electromagnetismo y semiconductores: Resonancia, Universidad Politécnica de Valencia. Consultado el 5/07/2020. Recuperado de:

<http://personales.upv.es/jquiles/prffi/alterna/ayuda/hlpresonancia.htm>

[12] González, Winder Aller, José M Lászlo, Sajó-B Horvart, JulioW, *Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción Electromagnética*, uct vol.17 no.66 Puerto Ordaz mar. 2013, Descargado el 8/06/2020, Recuperado de:

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000100004

[13] Clarke, K.D., Van Tyne, C.J., Vigil, C.J. et al. Induction Hardening 5150 Steel: Effects of Initial Microstructure and Heating Rate. J. of Materi Eng and Perform 20, 161–168 (2011). Consultado el 25/06/2020. Recuperado de:

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11665-010-9825-8>

[14] Spezzapria, M., Settimi, AG, Pezzato, L., Novella, MF, Forzan, M., Dughiero, F., Bruschi, S., Ghiotti, A., Brunelli, K. y Dabalà, M. (2017), Efecto de la microestructura previa y la velocidad de calentamiento sobre la cinética de austenización del acero 39NiCrMo3. steel research int., 88: 1600267. doi: 10.1002/srin.201600267

[15] G. E. Totten C. E. Bates and N. A. Clinton. Handbook of Quenchants and Quenching Technology. ASM International, 1993, pág 70-72.

[16] Márquez de la Torre Carlos Eduardo, Tratamiento Térmico de Anillos de Acero AISI 4140, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Tesis de Maestría, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. 2012, pág. 42, 43, 91, 92, 108-110.

[17] SISA – SERVICIO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V., Acero grado Maquinaria SISA 4140T, AISI 4140, Ficha técnica, Descargado el 18/06/21, Recuperado de:

<http://sisa1.com.mx/wp-content/uploads/Acero-SISA-4140T-Tratado-y-Revenido.pdf>

[18] Instrumentos Wika, “Uso de Termopares”, Hoja Técnica, 09/2016, pp. 5, 7, 8. Consultado el 24/08/2021, recuperado de:

https://www.wikapolska.pl/upload/DS_IN0023_es_es_62452.pdf

[19] Carl R. (Rod) Nave, Hyperphysics blog digital, Departamento de física y Astronomía, Universidad del Estado de Georgia, Atlanta Georgia, publicado el 18/03/2019, recuperado el 18/06/2021 de:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/ferro.html>