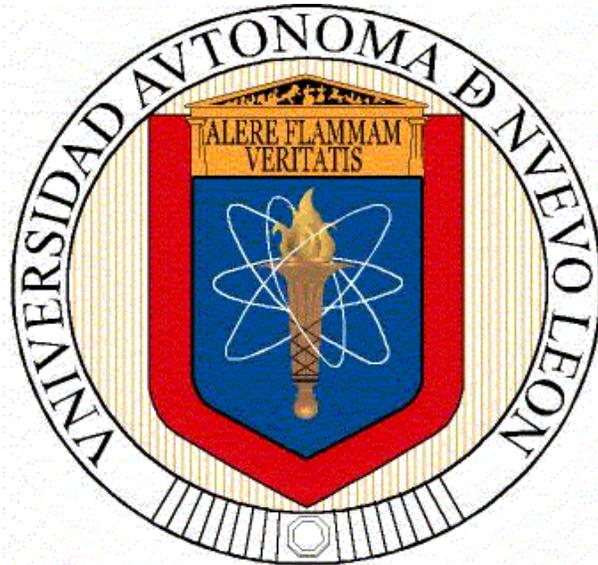


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DE
PREDICCIÓN EN PROCESOS DE TEMPLE POR INDUCCIÓN PARA
UN ACERO AISI-SAE 1043**

POR

HÉCTOR LEOBARDO TORRES GARCÍA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AGOSTO, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DE
PREDICCIÓN EN PROCESOS DE TEMPLE POR INDUCCIÓN PARA
UN ACERO AISI-SAE 1043**

POR

HÉCTOR LEOBARDO TORRES GARCÍA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AGOSTO, 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Desarrollo e implementación de modelo de predicción en procesos de temple por inducción para un acero AISI-SAE 1043", realizada por el alumno Hector Leobardo Torres Garcia, matrícula 1394951, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Automotriz

El Comité de Tesis



Asesor
Dr. Oscar Jesús Zapata Hernandez



Coasesor
M.C. Jesus Manuel Orona Hinojos

Coasesor
Dra. Gina María Idárraga Ospina

Vo.Bo.
Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdivisión de Estudios de Post-grado.

San Nicolás de los Garza, N.L. Agosto 2015

DEDICATORIA

A mi familia por el apoyo brindado.

AGRADECIMIENTOS

A Sistemas Automotrices de México S.A. de C.V. por la oportunidad brindada de continuar con mis estudios y superación en el aspecto profesional y personal.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado a si mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y a la coordinadora del posgrado Dra. Tania Berber por la oportunidad y consejos brindados.

A mi asesor académico el Dr. Oscar Zapata por el apoyo brindado incondicionalmente, amistad, paciencia y conocimiento transmitido sin interés de por medio.

A mi asesor industrial y jefe de departamento Ing. Jesus Orona por el apoyo, comprensión y confianza brindada durante este proceso.

Al Ing. Armando Villanueva e Ing. Ismael Garcia por haberme dado la confianza y la oportunidad de pertenecer a este gran equipo de trabajo de Innovación y permitirme desarrollarme profesionalmente durante este proyecto.

Al Ing. Mario Cabriales y el equipo del Laboratorio de Ing. de Materiales por el apoyo brindado durante las pruebas y validaciones realizadas durante este proyecto.

Al Ing. Pedro Moratalla, Mariluz Rosaleny y el equipo de Laboratorio de GH por su incondicional apoyo y amistad que me brindaron durante mi estancia en su empresa.

A mi compañera de generación Adriana Osuna por su apoyo, su gran amistad y todos los momentos que vivimos durante esta etapa de nuestra vida y a mis compañeros de generación Chio, Marco, Fer, Miguel, Charly y Mario.

A mi familia por alentarme a seguir adelante y estar apoyándome en mis proyectos profesionales y personales.

Contenido

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 Introducción..... | 3 |
| 1.1. Calentamiento por inducción electromagnética..... | 6 |
| 1.2. Aspectos históricos del calentamiento por inducción | 10 |
| 1.3. Fenómenos físicos que originan el calentamiento por inducción | 12 |
| 1.3.1. Efecto Piel..... | 13 |
| 1.3.2. Efecto de proximidad | 14 |
| 1.4. Propiedades electromagnéticas de los materiales..... | 19 |
| 1.5. Sistemas de calentamiento por inducción | 21 |
| 1.6. Bobinas de inducción..... | 27 |
| CAPÍTULO 2 Modelación y simulación del sistema | 36 |
| 2.1. Introducción..... | 36 |
| 2.2. Modelación matemática..... | 38 |
| 2.3. Modelación matemática de campo electromagnético..... | 40 |
| 2.4. Modelación matemática del proceso térmico..... | 42 |
| 2.4.1. Análisis térmico mediante el método de residuos ponderados | 42 |
| 2.5. Modelación matemática de la transformación de fase | 47 |
| 2.6. Modelación matemática del sistema | 50 |
| 2.6.1. Propiedades del material | 50 |
| 2.6.2. Propiedades del material | 52 |
| CAPÍTULO 3 Método de Elemento Finito y Método de Elemento Frontera | 54 |
| 3.1. Modelación matemática del sistema | 54 |
| 3.2. Definición del método de elemento frontera (BEM)..... | 56 |
| 3.2.1. Desarrollo histórico del Método de Elemento Frontera | 58 |
| 3.3. Definición del Método de Elemento Finito (FEM)..... | 60 |
| CAPÍTULO 4 Experimentación | 68 |
| 4.1. Introducción..... | 68 |
| 4.2. Proceso de temple por inducción método escaneo (actual) | 69 |
| 4.3. Diseño de bobinas..... | 76 |
| 4.4. Proceso de temple por inducción método estático (propuesta)..... | 78 |
| CAPÍTULO 5 Resultados y conclusiones | 81 |

| | | |
|----------------------------------|---|------------|
| 5.1. | Introducción..... | 81 |
| 5.2. | Resultados proceso de temple por inducción método escaneo (actual) | 82 |
| 5.3. | Resultados proceso de temple por inducción método estático (propuesta)..... | 93 |
| LISTADO DE SÍMBOLOS | | 106 |
| BIBLIOGRAFIA..... | | 108 |
| LISTADO DE FIGURAS | | 111 |
| LISTADO DE TABLAS..... | | 114 |

RESUMEN

La fabricación de los componentes automotrices engloba una gran cantidad de procesos de manufactura los cuales van desde el proceso de fundición del acero, forjados, mecanizados y tratamientos térmicos, entre otros. Estos procesos se llevan a cabo con el objetivo de lograr que el componente a fabricar cumpla con lo especificado y tenga un buen desempeño en su funcionalidad.

La gran mayoría de los componentes son fabricados a partir de aceros aleados, aceros al carbono de baja y media aleación los cuales son posteriormente tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas. Uno de los tratamientos térmicos más utilizados es el temple superficial, el cual tiene como objetivo principal endurecer la superficie del componente para mejorar su resistencia a la flexión, resistencia al desgaste, resistencia al impacto, entre otras propiedades mecánicas.

La inducción electromagnética, o simplemente "inducción", es un método de calentamiento de materiales eléctricamente conductores tales como metales. Como su nombre implica, el calentamiento por inducción se basa en las corrientes eléctricas que son inducidas internamente en el material a calentar, es decir, la pieza de trabajo.

La experimentación realizada durante este trabajo de tesis fue dividida en 2 etapas:

- Proceso de temple por inducción actual (Técnica de escaneo).
- Proceso de temple por inducción propuesto (Técnica calentamiento estático).

Durante la etapa de experimentación del proceso de temple por inducción actual se llevó a cabo la validación de los resultados de temperatura superficial mediante la toma de video de una cámara termografía realizando un comparativo con los resultados de la simulación de calentamiento. Posteriormente se realizó la simulación del proceso de temple y transformación de fase martensita con su respectiva validación mediante corte y evaluación metalúrgica de muestra, además de la comparación de resultados de durezas obtenidos durante el proceso de temple y los resultados obtenidos en la simulación.

La segunda etapa del proceso de temple por inducción fue llevada a cabo con la colaboración del personal del laboratorio de aplicaciones de GH Induction. Durante esta etapa se realizaron 2 propuestas de diseño de bobinas y se realizaron las pruebas de simulación así como las validaciones físicas y metalúrgicas. Previo a las pruebas se realizaron cálculos teóricos para establecer los parámetros iniciales del proceso mediante las gráficas de Lozinski.

Los resultados obtenidos durante las etapas de este proyecto fueron satisfactorios. En la primer etapa se logró simular en 2D el proceso actual de temple por inducción obteniendo una aproximación cercana al 90% en los resultados de temperaturas, transformación de fase y dureza. Este modelo y los resultados obtenidos fueron utilizados como parámetros de entrada para la segunda etapa.

Durante la segunda etapa los resultados obtenidos durante las simulaciones mostraron que el diseño de bobinas 1 no sería efectivo al momento de calentar la zona del diámetro interno, por lo cual se descartó la fabricación de estas bobinas. La propuesta número 2, incluyó el uso de concentradores de flujo magnético, los cuales colaboran a dirigir el campo magnético en zonas específicas. Los resultados obtenidos durante la simulación 3D de la propuesta 2 fueron satisfactorios por lo cual se decidió fabricar las bobinas y llevar a cabo las pruebas físicas. Los resultados finales obtenidos de transformación de fase comparados con las pruebas físicas tiene una aproximación de 90%.

En conclusión, fue posible el desarrollo de un modelo para la simulación del proceso de calentamiento por inducción para componentes automotrices con geometría compleja.

Como contribución principal esta modelación validó el diseño de bobinas con las cuales se logró obtener una disminución en el tiempo ciclo del proceso del husillo de 36.4% y un ahorro en la energía consumida de 22.3% medida en la unidad de kW-segundo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz de México es madura, dinámica y está en continuo crecimiento. A nivel global, México está posicionado como el octavo productor de vehículos ligeros. En términos de vehículos pesados, las OEMs han alcanzado un importante nivel de desarrollo en el país, realizando actividades que van desde ensamblado, estampado y carrocería, produciendo un amplio rango de modelos para satisfacer la demanda doméstica y de los mercados de exportación (1).

Dentro de la gama de componentes automotrices fabricados en México en el área de vehículos pesados se encuentra la manufactura de engranes, flechas de transmisión y

los componentes que forman parte del ensamble de ejes traseros y delanteros (husillos, fundas, vigas y muñones).

La fabricación de los componentes automotrices engloba una gran cantidad de procesos de manufactura los cuales van desde el proceso de fundición del acero, forjados, mecanizados y tratamientos térmicos, entre otros. Estos procesos se llevan a cabo con el objetivo de lograr que el componente a fabricar cumpla con lo especificado y tenga un buen desempeño en su funcionalidad.

La gran mayoría de los componentes son fabricados a partir de aceros aleados, aceros al carbono de baja y media aleación los cuales son posteriormente tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas. Uno de los tratamientos térmicos más utilizados es el temple superficial, el cual tiene como objetivo principal endurecer la superficie del componente para mejorar su resistencia a la flexión, resistencia al desgaste, resistencia al impacto, entre otras propiedades mecánicas.

Uno de los principales componentes para el ensamble de la funda es el husillo (figura 1); este componente es ensamblado mediante el proceso de soldadura por fricción en las puntas de la funda la cual protege el sistema de engranes de los ejes traseros. Su principal función es ser el soporte para los rodamientos o baleros que ayudaran durante el giro de las ruedas de la unidad.



Figura 1. Modelo de husillo.

El husillo está fabricado de un acero al carbón AISI 1043, el cual paso por un proceso de formado, posteriormente se realizan una serie de operaciones de mecanizado para pasar al proceso en el cual nos enfocamos en esta tesis que es el tratamiento térmico por inducción magnética. Una de las principales características que debe tener este componente es la resistencia al desgaste y resistencia a la flexión, esto debido a las funciones que desempeñará como parte del eje motriz. El tratamiento térmico por inducción realizado es un proceso de temple, el cual consta del calentamiento mediante inducción magnética y un enfriamiento brusco para obtener la transformación de la fase martensita. Para este proceso puede tenerse dos herramientas específicamente para cada operación, es decir uno para calentar el cual lleva el nombre de inductor o bobina de inducción y las duchas o sistemas de enfriamiento.

El proceso de temple por inducción actual al que es sometido el husillo es mediante la técnica llamada escaneo o barrido, la cual se refiere a que el componente o las zonas del mismo a calentar por inducción pasan a través del centro del anillo inductor o bobina.

Objetivo

- Desarrollar e implementar una metodología para predecir el comportamiento termo-mecánico en un acero SAE 1043 procesado mediante temple por inducción utilizando parámetros de la bobina a través de un método mixto de elementos finitos y elementos frontera.

Objetivos específicos

- Generar modelo electromagnético para el diseño de bobina.
- Desarrollar modelo numérico mediante elemento finito para determinar el comportamiento termo-mecánico.
- Identificación de parámetros críticos del proceso.
- Validación del modelo mediante pruebas experimentales.

Hipótesis

Es posible determinar las variables críticas de un proceso de calentamiento por inducción utilizando modelos numéricos que permitan generar un diseño adecuado de la geometría de la bobina.

1.1. Calentamiento por inducción electromagnética

La inducción electromagnética, o simplemente "inducción", es un método de calentamiento de materiales eléctricamente conductores tales como metales. Se utiliza comúnmente en el proceso de calentamiento antes del trabajo del metal, y en el tratamiento térmico, soldadura y fusión (2)(Tabla 1). El número de artículos industriales y de consumo que se someten a calentamiento por inducción durante alguna etapa de su producción es muy grande y en rápida expansión.

Tabla 1. Aplicaciones del calentamiento por inducción.

| <i>Pre calentamiento previo a trabajo de metal</i> | <i>Tratamiento termico</i> | <i>Soldadura</i> | <i>Fusión</i> |
|--|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| Forjado | Temple superficial | Soldadura de cordón | Lingotes |
| Engranés | Engranés | Tubos para petróleo | Tocho |
| Flechas | Flechas | Productos de refrigeración | Fundición |
| Herramientas | Valvulas | Linea de tubería | |
| | Herramientas | | |
| Extrusión | | | Fusión en vacío |
| Vigas | Temple | | |
| Flechas | Miembros estructural | | |
| | Resortes | | |
| | | | |
| | Recocido | | |
| | Aluminio | | |
| | Bandas de acero | | |

Como su nombre implica, el calentamiento por inducción se basa en las corrientes eléctricas que son inducidas internamente en el material a calentar, es decir, la pieza de trabajo. Estas llamadas corrientes de Eddy disipan la energía y provocan el calentamiento. Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción son una bobina (inductor) de inducción, una fuente de poder de corriente alterna y la propia pieza (figura 2). La bobina, que puede adoptar distintas formas, dependiendo del patrón de calentamiento requerido, es conectada a la fuente de poder. El flujo de corriente fluye a través de la bobina generando un campo magnético alterno que corta a través de la pieza de trabajo. Es este campo magnético alterno que induce las corrientes parásitas que calientan la pieza de trabajo.

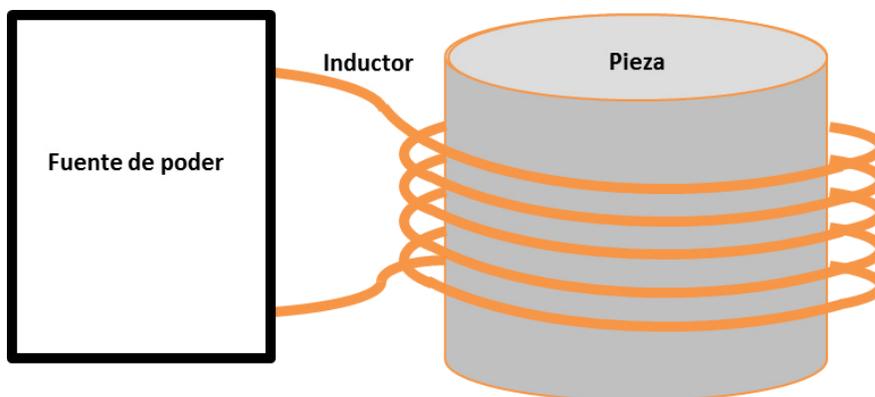


Figura 2. Sistema básico de calentamiento por inducción.

Debido a que la magnitud de las corrientes de Foucault disminuye con la distancia desde la superficie de la pieza, la inducción se puede utilizar para el calentamiento de la superficie y el tratamiento térmico. En contraste, si se permanece el tiempo suficiente para que la conducción de calor haga su trabajo, patrones de calentamiento relativamente uniformes se pueden obtener a través de los efectos de tratamiento térmico, calentamiento para trabajo de metal, y así sucesivamente.

La atención cuidadosa al diseño de la bobina (inductor), la selección de la frecuencia de la fuente de poder y la clasificación garantiza un estrecho control de la velocidad de calentamiento y el patrón a obtener.

Una analogía común utilizada para explicar el fenómeno de la inducción electromagnética hace referencia al efecto transformador. Un transformador consta de dos bobinas colocadas en estrecha proximidad entre sí. Cuando un voltaje es suministrado través de una de las bobinas, conocido como el embobinado primario o simplemente el "primario", (3) (Figura 3). En el calentamiento por inducción, la bobina de inducción, que es energizada por la fuente de alimentación de CA, sirve como el principal, y la pieza de trabajo es análoga a la secundaria.

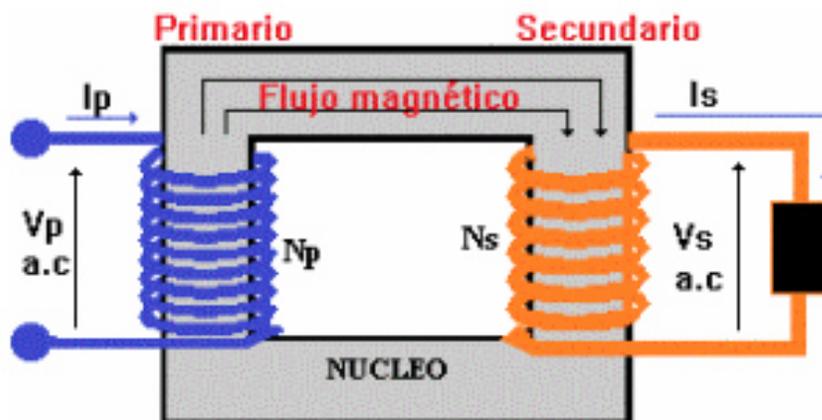


Figura 3. Sistema básico de un transformador.

El análisis matemático de los procesos de calentamiento por inducción puede ser bastante complejo para todos, pero el más simple de geometrías de pieza. Esto es debido a los efectos acoplados de generación de calor no uniforme a través de la pieza de trabajo, la transferencia de calor, y el hecho de que las propiedades eléctricas, térmicas y metalúrgicas de la mayoría de los materiales presentan una fuerte dependencia de la temperatura. Por esta razón, existen soluciones cuantitativas en su mayor parte sólo para el calentamiento de barras redondas o tubos, placas rectangulares y láminas. Sin embargo, estos tratamientos proporcionan información útil sobre los efectos de la bobina de diseño y equipamiento características de patrones de calentamiento en partes de forma irregular. Esta información, junto con el conocimiento generado a través de años de experimentación, tanto en entornos de laboratorio y producción, sirve como base para el diseño práctico de los procesos de calentamiento por inducción.

Los principios de la aparición del fenómeno de calentamiento a través de este método fueron como un efecto no deseado en equipo tales como motores, generadores y transformadores, a lo cual se tuvieron que desarrollar nuevos diseños en los cuales se minimizara la presencia del calentamiento.

A través del estudio de este fenómeno y de sus propiedades, se concluyó que las características por las cuales se generaba el calentamiento por inducción lo volvía un importante método, a lo cual hoy en día se ha vuelto parte importante en muchos procesos de producción de la industria. El desarrollo en las últimas décadas en la electrónica de potencia y semiconductores ha permitido un avance muy importante en los sistemas de calentamiento por inducción.

Una de las ventajas de este proceso es que puede ser localizado esto significa que no necesariamente calienta por completo la pieza de trabajo si no que dependiendo de la geometría de la bobina puede ser dirigido a una zona en específico. Dentro de este proceso existen condiciones que deben tomarse en cuenta para obtener los resultados de calentamiento deseados como lo son la cantidad de material a calentar, la técnica a utilizar, la rapidez a la cual se desea calentar y la geometría de la bobina la cual determinara las zonas que serán calentadas.

1.2. Aspectos históricos del calentamiento por inducción

El primer fenómeno de inducción fue observado por primera vez a mediados del año 1800 y fue descubierto por Michael Faraday cuando provocó un calentamiento no deseado en un transformador y en un embobinado de motor. Faraday llegó a la conclusión de que una corriente inducida podía generar un campo magnético cambiante. Sin haber contacto físico entre dos bobinas se puede decir que la corriente en la segunda bobina es producida por un voltaje inducido desde la primera bobina. La ley de Faraday del estado de inducción la cual dice “la fuerza electromotriz inducida en un circuito es directamente proporcional a la velocidad del tiempo de cambio del flujo magnético a través del circuito” (4).

La primera aplicación industrial de este fenómeno fue en la fundición de metal cuando Ferrati en 1887 diseñó un horno de fusión con un núcleo magnético en el cual colocó un transformador con un embobinado primario en el cual aplicaba una corriente alterna a 50Hz (5).

Hacia el año 1915 el americano Wyatt desarrolla una idea de utilizar un canal de carga vertical con lo cual el metal se mantenía protegido de la oxidación, este desarrollo tuvo aplicación inicial a la fusión de Latón con lo cual rápidamente tuvo aceptación a nivel mundial eliminando prácticamente los hornos de reverbero en esta aplicación. Por el año de 1927 se instala el primer horno de media frecuencia en una planta de Sheffield (Inglaterra). Desde entonces las instalaciones de han ido creciendo en tamaño hasta llegar a la 1,500 toneladas para el calentamiento de arrabio líquido.

Seguido de la aceptación de la aplicación del calentamiento por inducción para la fusión de metales, algunas otras aplicaciones de esta tecnología fueron desarrolladas. Dentro de estos desarrollos están el temple de acero con la aplicación de inducción desarrollada por Midvale Steel y la compañía de Ohio Crankshaft (6).

El gran impulso de la utilización de la inducción sucedió durante la Segunda Guerra Mundial, principalmente en la aplicación de tratamientos térmicos a componentes militares tales como proyectiles perforadores y balas (7). La capacidad de utilizar la inducción de manera localizada, así como el temple de la superficie también fue muy importante para salvar más de un millón de proyectiles que habían sido tratados térmicamente produciendo puntos suaves en ciertas zonas.

Actualmente con los nuevos sistemas de control y la automatización de los procesos industriales, el desarrollo de la inducción ha sido a pasos agigantados siendo aplicada esta tecnología no solo en la industria de los metales sino también en otras industrias como alimentaria, textil, entre otras como parte de sus procesos en diferentes aplicaciones para la elaboración de sus productos.

1.3.Fenómenos físicos que originan el calentamiento por inducción

El calentamiento por inducción se basa en dos mecanismos de disipación de energía con el propósito de calentar. Estas son las pérdidas de energía debido al efecto Joule de calentamiento y asociados con histéresis magnética (8). El primero de ellos es el único mecanismo de generación de calor en materiales no magnéticos (por ejemplo, aluminio, cobre, aceros inoxidable austeníticos, aceros de carbono por encima de la Curie, o la transformación magnético) y el mecanismo primario de los metales ferromagnéticos (por ejemplo, aceros al carbono por debajo de la temperatura de Curie). Un segundo medio, menos importante de generación de calor por inducción para la última clase de materiales es por pérdidas histéresis.

Una explicación simple pero cualitativamente útil de pérdidas por histéresis se establece que está causado por la fricción entre las moléculas, o los llamados dipolos magnéticos, cuando los metales ferromagnéticos se magnetizan primero en una dirección y luego en la otra. Los dipolos pueden ser considerados como pequeños imanes que giran en torno con cada inversión del campo magnético asociado con una corriente alterna (9)

Debido a varios fenómenos electromagnéticos, la distribución de corriente en una bobina y en la pieza de trabajo no es uniforme. Esta falta de uniformidad en la fuente de calor causa una uniformidad en el perfil de temperatura en la pieza. La no uniforme distribución de corriente puede ser causada por varios fenómenos electromagnéticos, entre ellos el efecto piel, efecto de proximidad y efecto anillo. Estos efectos juegan un rol importante en el entendimiento del fenómeno del calentamiento por inducción.

1.3.1. Efecto Piel

El efecto piel resulta de la tendencia de la densidad de corriente a ser mayor en la superficie. Incrementar la frecuencia no solo encamina el aumento en el efecto piel (10). Incluso con muy bajas frecuencias, si el material sólido a calentar es lo suficientemente largo, generará un eficiente efecto piel para el calentamiento por inducción.

El efecto piel no solo depende de la frecuencia de trabajo y del tamaño de la barra. Esto también depende de las propiedades magnéticas y eléctricas del material del cual la barra está fabricada. Si el material a estudiar está fabricado de un material suave esto significa que la permeabilidad magnética es alta. La misma corriente que fluye en la bobina de calentamiento establece la misma fuerza de campo magnético en el espacio entre la pieza a calentar y la bobina, pero el número de líneas de fuerza magnética que atraviesa el material por sí mismo es mayor. Esto seguido de que la velocidad de cambio de las líneas magnéticas de fuerza atraviesa la parte exterior esta también es mayor. Esto significa que el voltaje inducido en la parte exterior es alargado. La corriente, por la ley de Ohm es también mayor. Mientras la potencia desarrollada en la superficie por la misma corriente es mayor ahora. Este no es un pequeño efecto. Usualmente esta cantidad para una relación es muchas veces mayor a 1. El efecto piel incrementa con la permeabilidad magnética (figura 4).

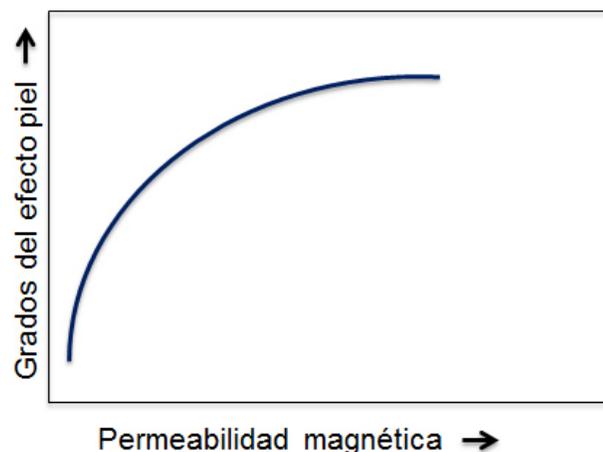


Figura 4. Grados de efecto piel en función de la permeabilidad magnética.

No solo la corriente y la potencia en la superficie son mayores que en los materiales no magnéticos; pero también el efecto de desmagnetización de esta corriente inducida de la fuerza del campo afectando a través de la superficie esta también crece.

Este fenómeno es de mayor importancia en la práctica en las aplicaciones eléctricas que usan corriente alterna. Porque de este efecto, aproximadamente 86% de la potencia será concentrada en la capa superficial del conductor. Esta capa es la llamada profundidad de referencia o penetración. El grado de efecto piel depende la resistividad del material y la permeabilidad relativa.

1.3.2. Efecto de proximidad

El fenómeno de proximidad puede ser aplicado directamente en calentamiento por inducción. Un sistema de inducción consiste de 2 conductores (11). Uno de estos conductores es una bobina que transmite la corriente de la fuente de poder, y la otra es la pieza de trabajo localizada cerca de la bobina. Las corrientes de Eddy son inducidas en la pieza por un campo magnético de corriente alterna. Como se muestra en la figura 5 las corrientes inducidas en la pieza tienen la dirección opuesta a las de la bobina regidas por la Ley de Faraday. Por lo tanto, para el efecto de proximidad, en la corriente de la bobina y la pieza las corrientes de Eddy son concentradas en las zonas encontradas de uno con el otro.

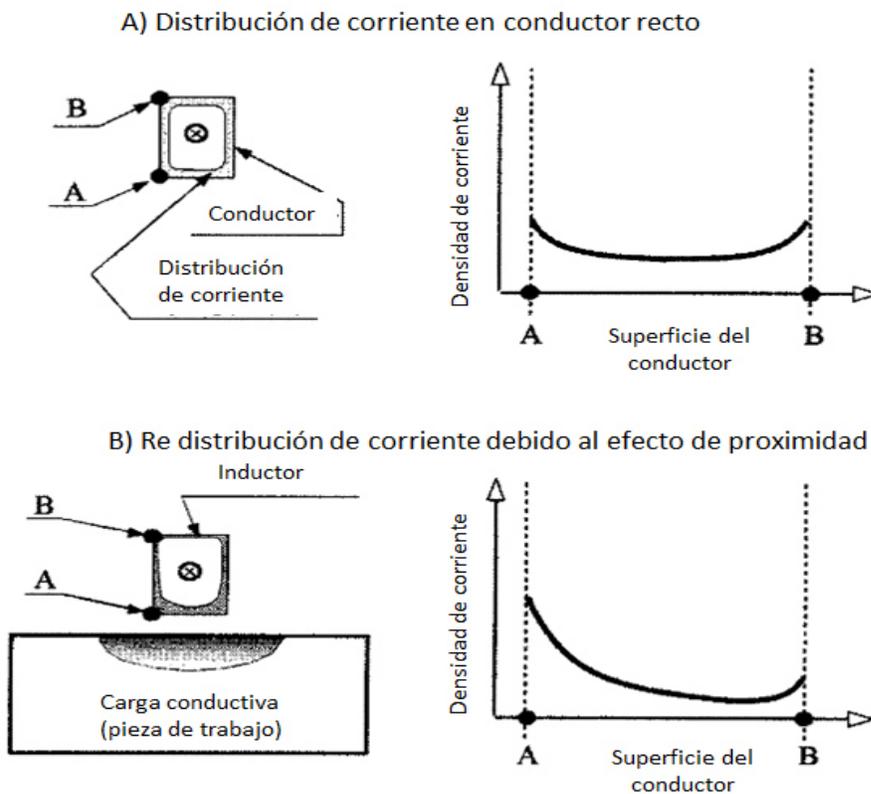


Figura 5. Efecto de proximidad y distribución de corriente en una bobina.

La figura 6 muestra como el efecto de proximidad produce diferentes patrones de calentamiento. Una barra de acero es colocada asimétricamente en una bobina de vuelta simple. Si el cilindro es estáticamente calentado (sin rotación), después dos diferentes patrones serán observados.

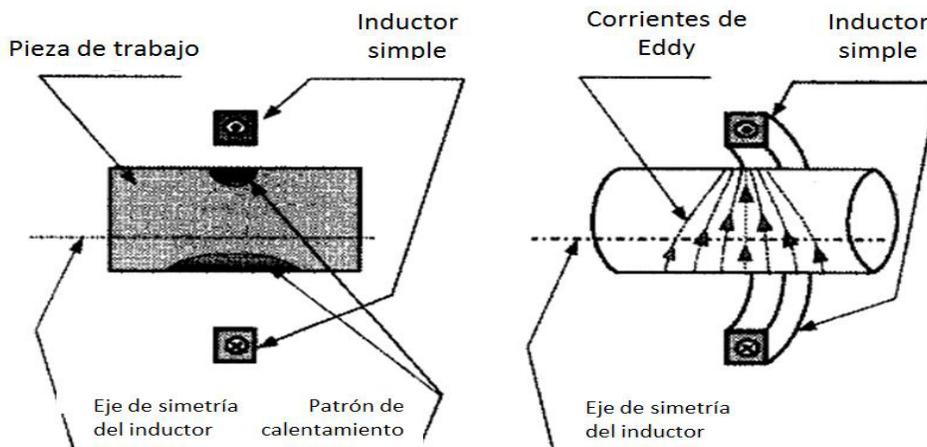


Figura 6. Efecto de proximidad en una bobina no asimétrica.

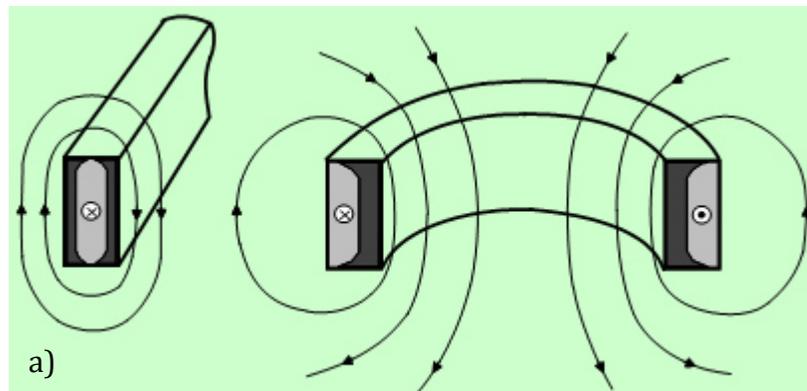
La apariencia de estos patrones es causada por una diferencia en la distribución de las corrientes de Eddy en la barra de acero. Como se observa las corrientes de Eddy tienen mayor densidad en la zona donde el espacio entre la bobina y la pieza es menor (mejor acoplamiento). Por lo tanto en esta zona existirá un calentamiento más intenso debido al efecto Joule.

En el área con mayor espacio entre la bobina y la pieza (acoplamiento pobre) la temperatura más alta no será tan significativa como en el caso del mejor acoplamiento. También, el patrón de calentamiento será más amplio pero menos intenso.

En el caso de una bobina con la distancia bobina-pieza diferente, se debe obtener un patrón de calentamiento idéntico mediante la rotación de la pieza.

1.3.3. Efecto electromagnético de anillo

Cuando una barra conductora de corriente se le da forma de anillo, la corriente será re distribuida. Las líneas de flujo magnético se concentrara en el interior del anillo, y por lo tanto la densidad del campo magnético será mayor en la parte interior del anillo como se muestra en la figura 7. En la parte exterior del anillo las líneas del flujo magnético serán diseminadas. La mayor parte de la corriente fluirá por una capa delgada de la superficie del anillo (12)



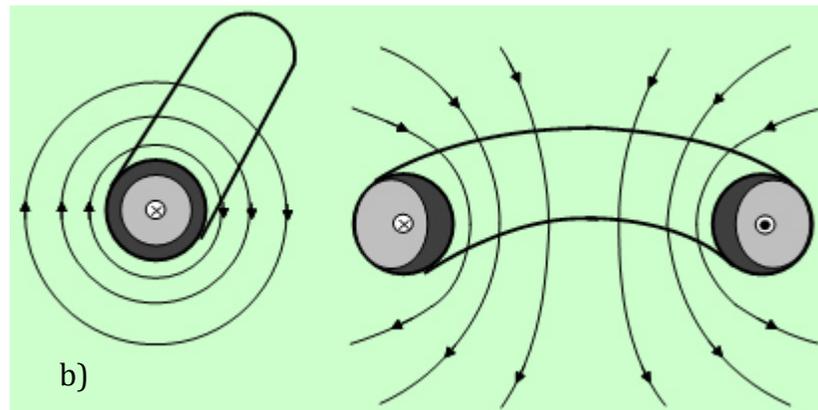


Figura 7. Densidad de campo magnético en un anillo rectangular (a) y redondo (b).

El efecto anillo no solo se presenta en las bobinas de vuelta sencilla sino también en multi-espiras, por lo tanto este es el tercer fenómeno electromagnético que es responsable de la distribución de la corriente en un sistema de inducción (13).

El efecto de anillo tiene un rol negativo en el proceso de superficies internas. Donde la bobina de inducción es localizada dentro de la pieza. En estos casos el efecto de la concentración de la distribución de la corriente en la parte interior de la bobina afecta ya que el calentamiento debe ser mayor hacia la parte exterior de la bobina y no al contrario. Figura 8.

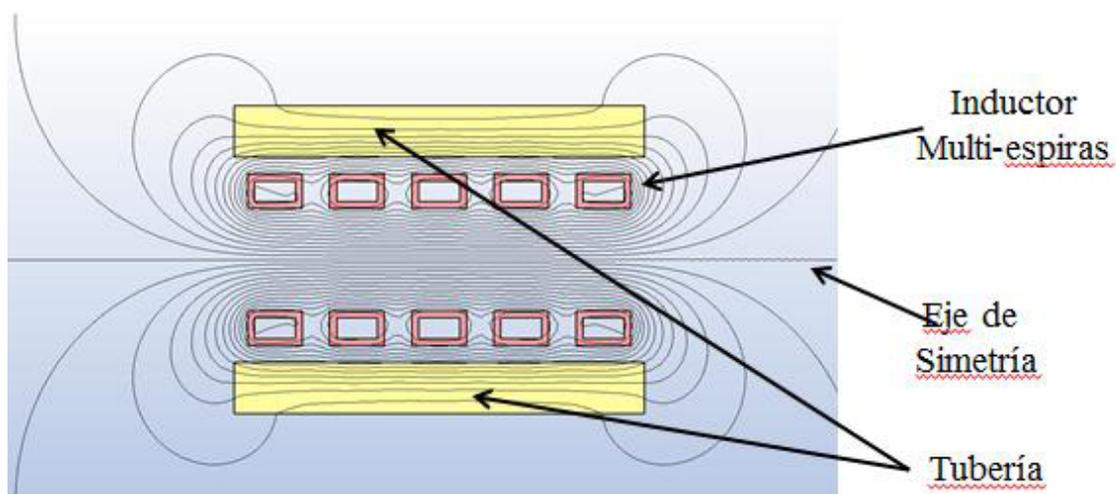


Figura 8. Efecto negativo del efecto anillo en el calentamiento de paredes internas.

En estos casos se aplica una solución en la cual se colocan concentradores de flujo magnético para dirigir la mayor cantidad de densidad de corriente hacia el tubo o la pieza de trabajo. Figura 9.

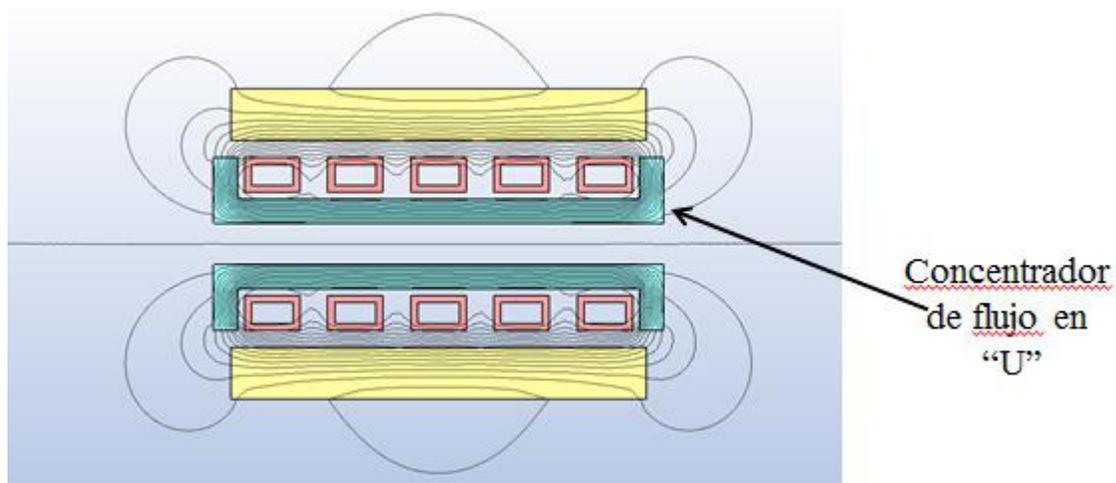


Figura 9. Eliminación del efecto anillo mediante el uso de concentradores de flujo magnético.

1.4. Propiedades electromagnéticas de los materiales

Las propiedades electromagnéticas de los materiales es una expresión bastante amplia que se refiere a un número de características electromagnéticas incluyendo permeabilidad magnética, resistividad eléctrica (conductividad eléctrica), densidad de flujo de saturación, fuerza coercitiva, pérdidas de histéresis, permeabilidad inicial, permitividad, susceptibilidad magnética, momentos magnético, entre otros.

1.4.1 Resistividad eléctrica (Conductividad eléctrica)

La habilidad de un material para conducir eléctricamente la corriente eléctrica es especificada por conductividad eléctrica σ (14). El recíproco de la conductividad es la resistividad eléctrica ρ . Las unidades para ρ y σ son ohm-metro y ohm/metro, respectivamente. Ambas características pueden ser usadas en las prácticas de la ingeniería, sin embargo la mayoría de los datos que contiene un libro consisten en datos de resistividad eléctrica.

Metales y aleaciones son considerados buenos conductores y tienen menos resistencia eléctrica comparada con otros materiales. (Ejemplo, cerámico y plásticos, etc.).

La resistividad eléctrica de un metal particular varía con la temperatura, composición química, microestructura del metal y el tamaño de grano. Para más metales, la conductividad eléctrica aumenta con la temperatura. La tabla 2 muestra algunas resistividades eléctricas de materiales comunes.

Tabla 2. Resistividad eléctrica de materiales comunes.

| <i>Material</i> | <i>Resistividad Electrica ($\mu\Omega\text{-m}$)</i> | <i>Material</i> | <i>Resistividad Electrica ($\mu\Omega\text{-m}$)</i> |
|---------------------------|---|-----------------|---|
| Plata | 0.015 | Inoxidables | 0.7 |
| Cobre | 0.017 | Plomo | 0.21 |
| Oro | 0.024 | Titanio | 0.42 |
| Aluminio | 0.027 | Grafito | 14000 |
| Tugsteno | 0.054 | Nitruro | 1 |
| Zinc | 0.059 | Madera | 10x14-10x17 |
| Cobalto | 0.068 | Vidrio | 10x16-10x20 |
| Aceros de medio carbón | 0.09 0.16 | Mica | 10x17-10x21 |
| | | Teflon | 10x19 |

La resistividad es una propiedad física imperativa. Esta afecta prácticamente todos los parámetros importantes de un sistema calentamiento por inducción incluyendo profundidad de calentamiento, uniformidad de calentamiento, eficiencia eléctrica de la bobina, impedancia de la bobina entre otras.

1.4.2. Permeabilidad magnética y permitividad relativa.

La permeabilidad relativa μ_r indica la habilidad de un material a conducir el flujo magnético mejor que el aire o el vacío. Permitividad relativa ϵ indica la habilidad de un material a conducir el campo eléctrico mejor que en el aire o vacío. Ambas son parámetros no dimensionales y tienen significados muy similares. Para el diseño de sistemas de inducción entender esta física es importante (15).

La permeabilidad magnética relativa tiene un efecto marcado en todo el fenómeno básico de la inducción, incluyendo el efecto piel, formas electromagnéticas, efecto de salida, proximidad y el efecto anillo, pero también tiene influencia marcada en

la calculación de bobinas y la calculación de la distribución de campos electromagnéticos.

1.5. Sistemas de calentamiento por inducción

Los elementos que componen un sistema de tratamiento térmico por inducción se muestran en la figura 10. Estos elementos son el agua de refrigeración para el sistema eléctrico, fuente de poder, estación de calor, accesorios de manipulación de trabajo, controles, bobina y el sistema de enfriamiento o temple. Dependiendo de los requerimientos de suministro de energía y procesamiento, estos elementos pueden ser suministrados por separado o unificados.

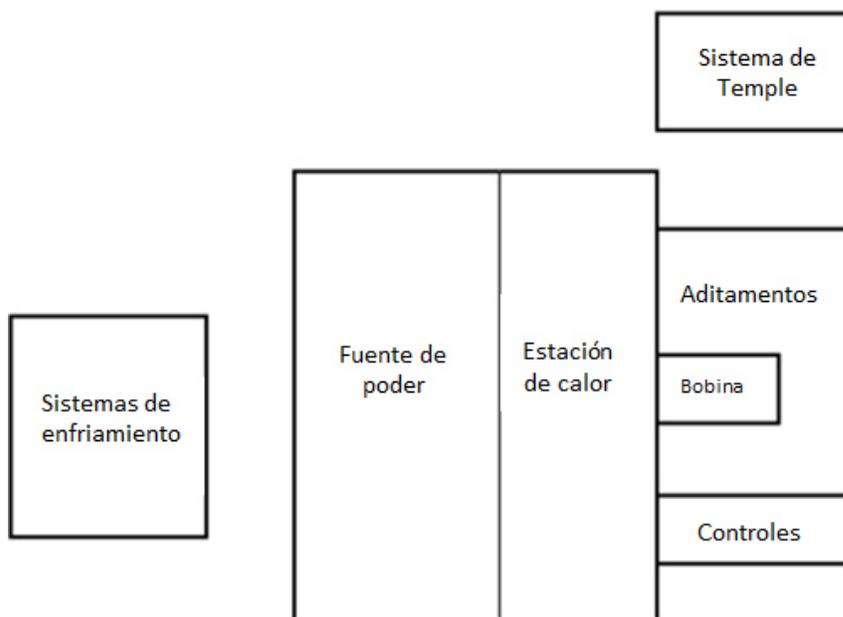


Figura 10. Sistema de tratamiento térmico por inducción.

1.5.1. Fuentes de poder

Existen muchos tipos diferentes de fuentes de poder de calentamiento por inducción, que van desde las bobinas de frecuencia de línea, al calor para reducir el tamaño apropiado, a muchos tipos diferentes de fuentes de poder.

La mayoría de las fuentes de poder de inducción que se venden para el tratamiento térmico de hoy son ya sea algún tipo de estado sólido o tubo oscilador (vacío). Se hacen muchos tipos y modelos de fuentes de poder de inducción para satisfacer las diversas necesidades de diferentes frecuencias y los requisitos de potencia de salida para el tratamiento (16).

Independientemente de la tecnología electrónica, las fuentes de alimentación realizan una función común.

La figura 11 muestra un diagrama de bloques de las fuentes de alimentación modernas de alta frecuencia que realizan la conversión de frecuencia de línea a alta frecuencia.

Las fuentes de poder son, básicamente, cambiadores de frecuencia que cambian la 60 Hz, corriente trifásica suministrada por la compañía eléctrica en una frecuencia más alta, corriente monofásica de calentamiento por inducción. Estas fuentes de poder se conocen como convertidores de frecuencia, inversores, u osciladores, en función de los circuitos y dispositivos electrónicos que se utilizan, con muchas combinaciones posibles de técnicas de conversión.

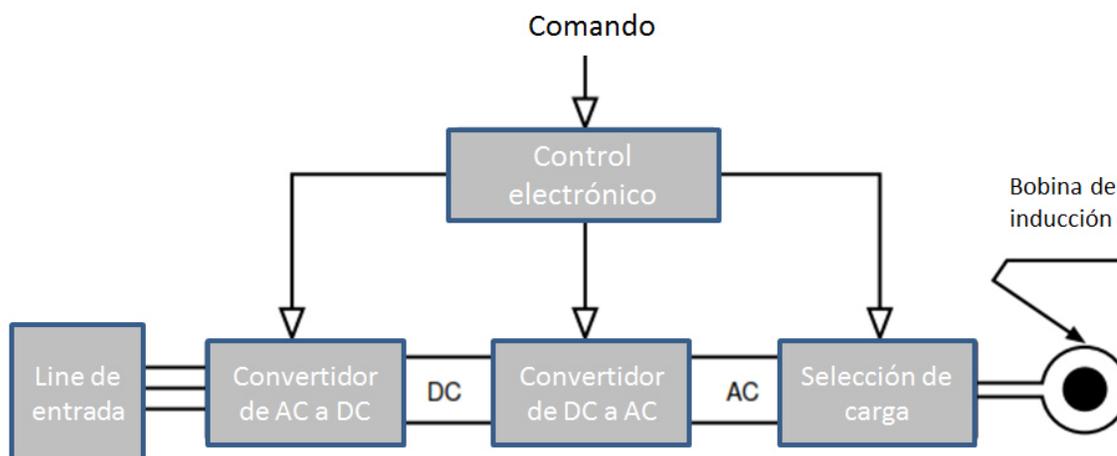


Figura 11. Diagrama de bloques de las fuentes de alimentación modernas de alta frecuencia.

Fuentes de poder en estado sólido convierten el voltaje de la línea alterna (CA) para producir una sola fase, de corriente continua (CC). La inversión se lleva a cabo a continuación, mediante el uso de tiristores (rectificadores controlados de silicio, o SCR), o transistores tales como los transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) o metal silicón de dióxido de campo (FET, MOS), para producir impulsos de corriente continua que luego se hicieron sinusoidal para formar alta frecuencia, de corriente alterna. (Algunas fuentes de poder de los suministros actuales hacen esto en un solo paso.) De radiofrecuencia (RF) (oscilador o tubo de vacío) las fuentes de poder utilizan un transformador para cambiar el voltaje de entrada a alta conversión antes de corriente continua (17).

Unidades de tubo oscilador operan en los 200 kHz a través de rangos de frecuencias de 2 MHz y tienden a tener un mayor costo por kW de potencia vendido. Fuentes de poder más antiguas utilizaban tubos rectificadores para completar la rectificación de corriente continua, mientras moderna unidades utilizan diodos de estado sólido. (El único tubo en una fuente de alimentación moderna es el tubo oscilador.) La potencia de salida de un oscilador de RF disminuye cuando las piezas de acero magnéticas se calientan por encima de la temperatura de Curie, por lo que es más difícil de mantener la potencia de salida total. Sin embargo, las fuentes de alimentación de RF han existido por muchos años y tienen más versatilidad en la adaptación de impedancia

y puesta a punto de las fuentes de alimentación de estado sólido. Unidades de RF son fáciles de ajustar, y cuando hay un fallo de un componente, son fáciles de solucionar. Los tubos de fuente de poder de radio frecuencia han estado en uso por 50 años y tienen un buen historial de operación. Aunque los tubos osciladores tienen 1.000 h garantías, la vida del tubo ha llegado hasta 25.000 h o más siendo algo inusual.

1.5.2. Sistema de enfriamiento

Se requiere agua de refrigeración, debido a que la energía eléctrica consumida se transfiere esencialmente en forma de calor al agua de refrigeración. Excepto para las pequeñas pérdidas por radiación y el calor residual que queda después del temple, incluso el calor producido en la pieza de trabajo es absorbido por el temple, que a su vez se enfría a través de un intercambiador de calor. Si la entrada de calor en la pieza de trabajo es de 50 kW en un sistema de calentamiento por inducción 100 kW, entonces el otro 50%, o 50 kW, representa la pérdida de sistema que está siendo absorbida por el agua de refrigeración.

Así, a plena potencia, un sistema de 100 kW a 50 kW se está transmitiendo en el agua de refrigeración. La calidad del agua es extremadamente importante en los sistemas de tratamiento por inducción.

Los diferentes elementos del sistema de calentamiento por inducción tienen diferentes requisitos de agua de refrigeración. Así, el agua de refrigeración necesaria para enfriar los componentes eléctricos en la fuente de poder, la estación de calor, la bobina de inducción, y el sistema de enfriamiento puede tener diferentes especificaciones. Esto es particularmente importante en los sistemas de potencia de gran tamaño por lo que los costos de agua de refrigeración puede ser minimizado.

Cuando se necesitan grandes cantidades de agua de refrigeración, estándares más bajos pueden ser utilizados para enfriar los elementos tales como el sistema de enfriamiento. Los fabricantes de equipos de suministro de energía dan definiciones claras de la calidad, la cantidad, y la temperatura máxima de agua que se necesita para la

refrigeración. Si bien ha habido una tendencia a relajar las normas en algunas de las fuentes de alimentación transistorizadas, en el largo plazo el agua de alta calidad se recomienda para funcionamiento continuo del equipo.

1.5.3 Estación de calor

Contiene los transformadores y condensadores, según sea necesario por una fuente de poder dada, para ayudar a que coincida con la tensión de alimentación o impedancia de la bobina (18). Estaciones de calor pueden tener tanques de circuitos con los condensadores de sintonía ya sea en paralelo o en serie con la bobina de inducción. Estos componentes pueden estar en el mismo recinto que los componentes de suministro de energía, o pueden estar en un recinto separado. Transformadores de alta frecuencia tienden a ser ineficaces, produciendo pérdidas de energía del sistema se ejecutan de 10 a 40% de la salida de la fuente de poder.

Cuando las estaciones están equipadas de calor por separado de la fuente de poder, el diseño adecuado del sistema requiere que los conductores de transporte de la alta frecuencia sean elegidos e instalados de acuerdo a las instrucciones del fabricante del equipo. Ubicación remota, incluso superior a un metro o varios pies, puede producir pérdidas del sistema que reducen la potencia de salida disponible en la bobina. Del mismo modo, el diseño de la bobina, es importante en la optimización de la cantidad de energía disponible para ser inducido en una pieza de trabajo. Un diseño adecuado de la bobina reduce la pérdida de potencia en la bobina, lo que permite más potencia a ser producido en la pieza de trabajo.

1.5.4 Sistema de temple

Los sistemas de temple pueden variar desde la simple utilización de agua de línea, con el gasto de agua que va por el desagüe después de que la pieza es templada, a

los sistemas de enfriamiento más sofisticados con tanques, intercambiadores de calor, bombas, filtros y controles de regulación de temperatura.

En el pasado, tanques de temple en aceite y los aceites solubles en agua fueron usados ampliamente. Hoy en día, a pesar de que el aceite se sigue utilizando para algunas aplicaciones, el enfriamiento con polímeros ha reemplazado ampliamente la mayor parte del aceite. Los polímeros no son inflamables, por lo que no proporcionan ningún peligro de incendio. Además, los polímeros son fácilmente limpiados después del temple. Polímeros de temple contienen inhibidores de biácidas y de óxido. La reducción de la bolsa de vapor proporcionado por bajas proporciones de polímero-agua se ha encontrado para hacer polímero de temple más deseables que temple de agua en muchas aplicaciones.

Propiamente los sistemas de temple requieren ciertas consideraciones durante la selección de un medio de temple para el sistema:

- El medio de temple se debe seleccionar para las características deseadas. Esto incluye la velocidad de temple, rango de temperatura de operación deseada, y aditivos.
- El sistema de enfriamiento debe ser dimensionado para tanto el volumen de temple y de la extracción de calor necesario. Una fuente de agua de línea, con el flujo y la temperatura de entrada dada, se necesita para enfriar el temple en el intercambiador de calor del sistema de enfriamiento.
- El sistema de enfriamiento debe ser capaz de proporcionar la cantidad de temple necesaria en la bobina.

Es importante durante el proceso de temple por inducción contemplar el sistema de temple, ya que de este dependerán los resultados obtenidos durante el proceso y la transformación deseada en este caso a martensita del acero a tratar.

1.6. Bobinas de inducción

Las bobinas, también conocidas como inductores, es básicamente un transformador primario que induce básicamente a alta frecuencia de salida de una fuente de poder a una pieza de trabajo, el cual es efectivamente el transformador secundario. El diseño de la bobina es de una aplicación específica, por lo que el tipo de bobina para ser utilizado debe ser seleccionado antes de diseñar un herramental (19). El tipo de proceso utilizado, por ejemplo, si las piezas son solo calentadas en una posición o si son barridas por la bobina, influyen en la selección.

Debido a la similitud de la bobina y la pieza de trabajo con el funcionamiento de un transformador, importantes características para el diseño de las bobinas es seguido en base a esta aplicación.

Una de las características más importantes de los transformadores reside en el hecho de que la eficiencia de acoplamiento entre los devanados es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. Además, la corriente en el primario del transformador multiplicado por el número de espiras del primario es igual a la corriente en el secundario multiplicado por el número de espiras del secundario. Debido a estas relaciones, hay varias condiciones que se deben tener en cuenta en el diseño de cualquier bobina de calentamiento por inducción:

- La bobina debe ser acoplado lo más estrechamente como sea posible para una máxima transferencia de energía. Es deseable que el mayor número posible de líneas de flujo atraviesen la pieza de trabajo en el área a ser calentada. Cuanto más denso el flujo en este punto, mayor será la corriente generada en la zona.
- El mayor número de líneas de flujo en una bobina de solenoide son hacia el centro de la bobina. Las líneas de flujo se concentran dentro de la bobina, que proporciona la máxima velocidad de calentamiento allí.

- Debido a que el flujo está más concentrado cerca de la bobina y disminuye más lejos de ella, el centro geométrico de la bobina es una zona de flujo débil. Por lo tanto, si una pieza se coloca fuera del centro en una bobina, el área más cerca a la bobina será atravesada por un mayor número de líneas de flujo y por lo tanto se calienta más rápido, mientras que el área de la parte con menos acoplamiento se calienta a una menor velocidad; el patrón resultante se muestra en la Figura 12. Este efecto es más observado en el calentamiento por inducción de alta frecuencia.

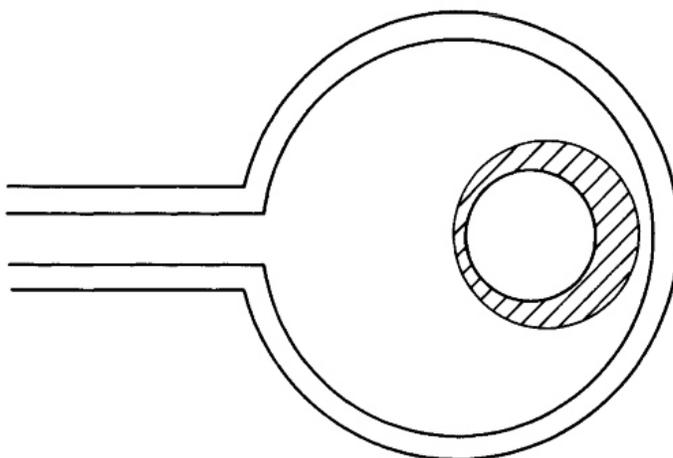


Figura 12. Patrón de calentamiento producido en una barra colocada fuera del centro de la bobina.

- En el punto donde los cables de la bobina y se unen, el campo magnético es más débil; Por lo tanto, el centro magnético de la bobina (a lo largo de la dirección axial) no es necesariamente el centro geométrico. Este efecto es más evidente en bobinas de un solo anillo. Como el número de vueltas de bobina aumenta y el flujo de cada uno a su vez se añade a la de las vueltas anteriores, esta condición se vuelve menos importante. Debido a este fenómeno y la imposibilidad de siempre centrar la pieza en el centro de la bobina, la pieza debe ser compensado ligeramente hacia esta área. Además, la pieza debe ser girada, si es posible, para proporcionar una exposición uniforme a las diferencias de campo magnético.

- La bobina debe estar diseñado para evitar la cancelación del campo de inducción magnética por lados opuestos de la bobina. La bobina de la izquierda mostrada en la figura 13 no tiene inductancia, porque los lados opuestos de la bobina están demasiado cerca uno del otro. Poner un bucle en la bobina (bobina de lado derecho) proporcionará alguna inductancia.

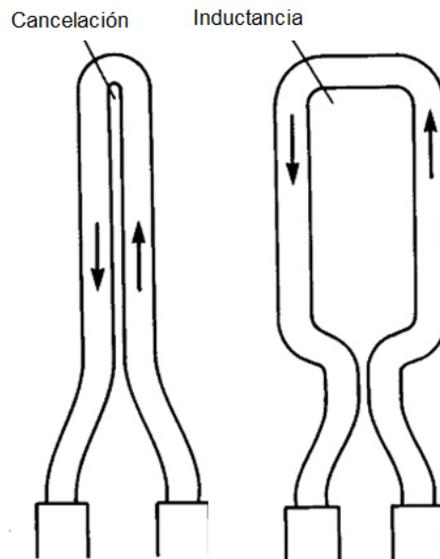


Figura 13. Bobina con cancelación de campo magnético por falta de bucle (izquierdo), bobina con bucle para evitar cancelación.

Debido a los principios anteriores, algunas bobinas pueden transferir el poder más fácilmente a una carga debido a su capacidad para concentrar el flujo magnético en la zona a calentar.

1.6.1 Clasificación de bobinas por campos electromagnéticos

La siguiente clasificación se refiere a la dirección de las corrientes de Eddy producidas por la bobina en la pieza de trabajo:

Flujo longitudinal (flujo de corriente inversa)

Las bobinas de inducción son por mucho el tipo más utilizado, con tipos de solenoide son las más comúnmente utilizadas. Bobinas de flujo longitudinales no deben confundirse con las bobinas de canal, que están orientadas en la dirección longitudinal de una pieza de trabajo. La pieza de trabajo está rodeada o envuelta, con las vueltas en los lados opuestos de modo que los flujos de corriente inducida alrededor de la pieza son generados como se muestra en la figura 14.

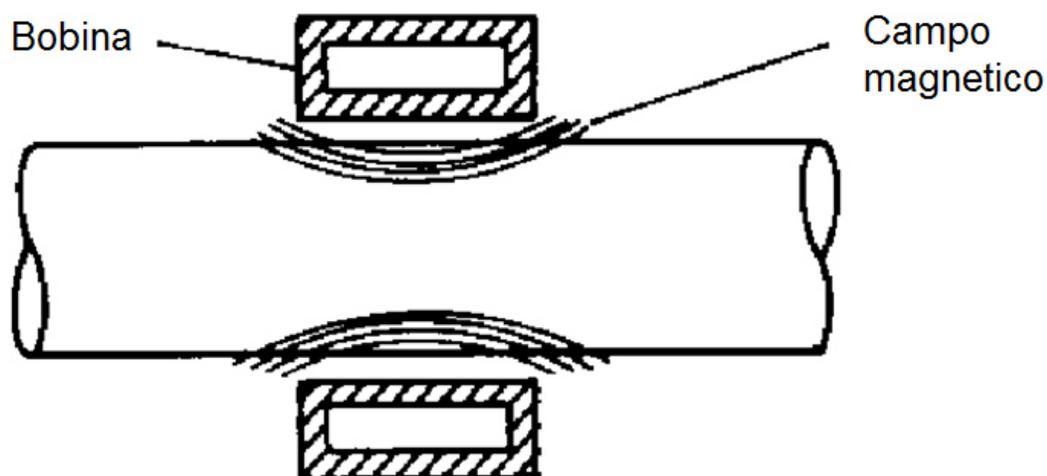


Figura 14. Flujos de corriente inducida en la pieza.

Cuando el espacio de aire entre la bobina y la pieza de trabajo es razonable para las condiciones de frecuencia y de carga implicados, el calentamiento puede ser muy eficiente porque las líneas de flujo tienden a ser confinado. Las bobinas vienen en muchas formas diferentes, formas y adaptaciones, con la bobina circular o anillo la forma más simple.

Las bobinas pueden ser orientadas a lo largo de las piezas de trabajo y deben estar rodeados por una bobina de solenoide con la corriente que fluye alrededor de la circunferencia de la pieza, o, en el caso de bobinas de canal, orientada perpendicular a la pieza de trabajo de manera que la corriente fluye a lo largo de la dirección longitudinal.

Flujo transversal (llamadas de proximidad)

Este tipo de bobinas no son tan ampliamente utilizadas y se utilizan para calentar las piezas de trabajo en el que el espesor de sección transversal es inferior a cuatro veces la profundidad de referencia. Como se muestra en la figura 15 un ejemplo de una bobina transversal. La pieza de trabajo se coloca esencialmente entre las vueltas de la bobina de inducción, en el que la corriente está fluyendo en la misma dirección. Al hacer esto, no hay efecto de cancelación actual y piezas delgadas se puede calentar de manera eficiente.

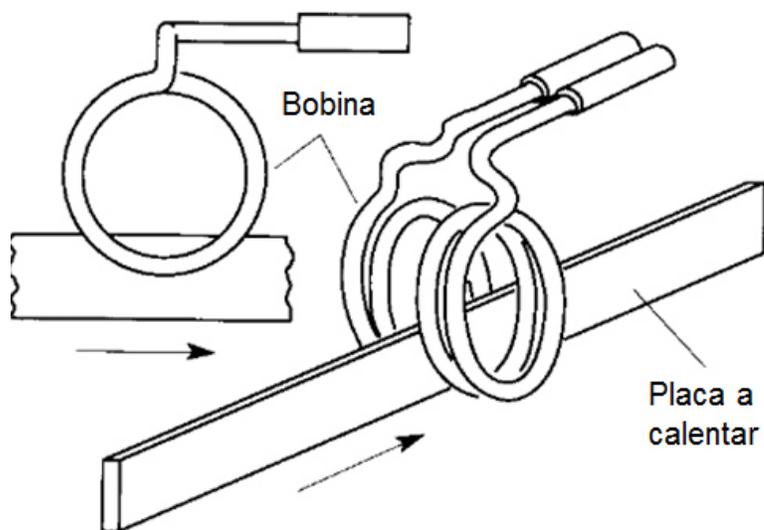


Figura 15. Bobina de flujo transversal.

1.6.2 Diseño de bobinas

Los factores que influyen en el diseño de la bobina y la selección incluyen las dimensiones y forma de la pieza de trabajo, número de piezas a calentar, patrón de dureza deseada, proceso de producción a utilizar (calentamiento en una sola posición o escaneo), la frecuencia y la potencia de entrada, pieza a ser templada y las consideraciones de la vida de la bobina (19).

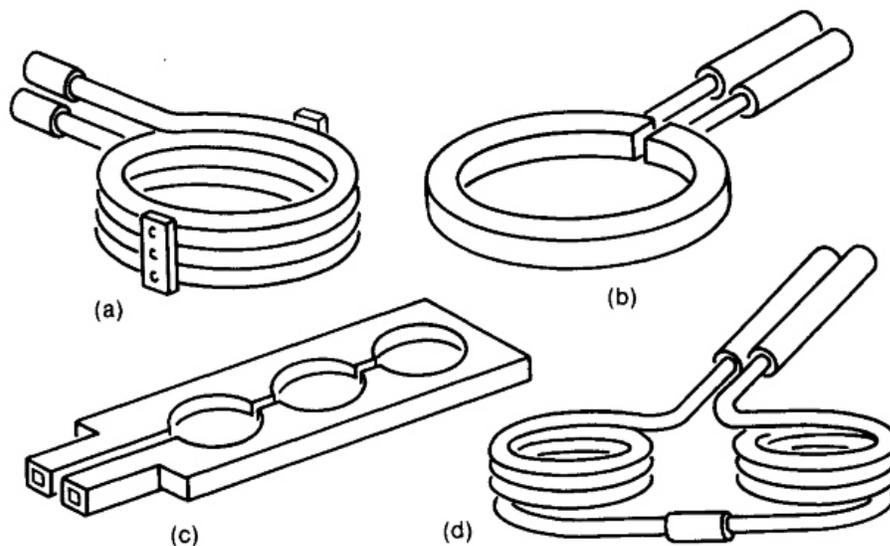


Figura 16. Configuraciones típicas de bobinas a) multi espiras, b) anillo, c) anillo multi puestos, d) multi espiras multi puestos.

Los parámetros de trabajo son un factor muy considerable, el calentamiento por inducción de baja frecuencia es generalmente deseado para calentamiento de metales, particularmente aquellos con grandes y relativamente simples secciones transversales. Las aplicaciones típicas son barras cuadradas, redondas, tochos para forjar o extrusión y placas para laminación en caliente. En estos casos, el diseño de la bobina es a menudo bastante simple, por lo general consta de una bobina de solenoide o una variación de la misma que coincide con la forma de la sección transversal de la pieza básica (por ejemplo, cuadrada, trapezoidal rectangular, etc.)

Bobinas de baja frecuencia suelen tener muchas vueltas. En consecuencia, la bobina por lo general forma la inductancia total del tanque, y un autotransformador se puede utilizar para que coincida con la impedancia de la bobina de alta a la del generador de inducción.

Bobinas simples, así como las variaciones de los mismos, son también a menudo implicadas en aplicaciones de medianas a altas frecuencia, tales como el tratamiento térmico. Estos incluyen los tipos de uno y múltiple vueltas.

Muy comúnmente, las aplicaciones de medianas y altas frecuencia requieren especialmente configurados o bobinas contorneadas con el acoplamiento ajustado para la uniformidad del calor. En los casos más simples, las bobinas se doblan o se forman a los contornos de la pieza.

Muchas bobinas se construyen con base en el conocimiento de los principios de diseño de la bobina y en la experiencia, mientras que otras bobinas necesitan programas de desarrollo con el fin de producir piezas de trabajo ajustables.

1.6.3 Concentradores de flujo magnético

Cuando se coloca en un campo de inducción, materiales magnéticos tienden a reunirse las líneas de flujo. Tales materiales se dice que tiene alta permeabilidad. Por otro lado, los materiales no magnéticos (por ejemplo, cobre, aluminio, etc.) no exhiben esta propiedad cuando se coloca en un campo magnético; por lo tanto, su permeabilidad es equivalente a la del aire. En el diseño de calentamiento por inducción, la capacidad relativa permeabilidad magnética, o la permeabilidad relativa a la del aire, es de importancia (20). La permeabilidad magnética relativa del aire se le asigna el valor de uno. Por el contrario, los materiales magnéticos tienen permeabilidades magnéticas relativas de aproximadamente 100 a 1000, dependiendo de la fuerza del campo magnético en el que se colocan. Por encima de la temperatura de Curie, sin embargo, pierden sus propiedades ferromagnético, y su permeabilidad magnética relativa baja a la unidad.

Concentradores de flujo son materiales magnéticos que se utilizan para recoger el campo de flujo establecido durante el calentamiento por inducción y por lo tanto modificar el patrón de calentamiento resultante. El medio por el cual esto se logra se

ilustra en la figura 17. Aquí, se puede ver que un concentrador de flujo en forma de un núcleo de hierro permeable provoca una distorsión del campo de flujo que rodea la bobina de inducción. El material permeable presenta un camino más fácil para las líneas de flujo; por lo tanto, se concentran en el material permeable.

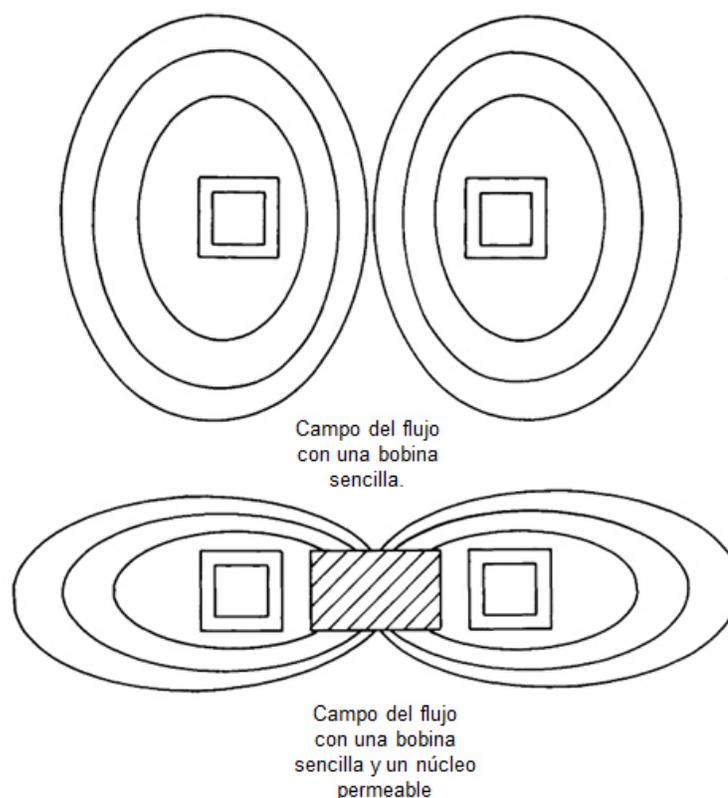
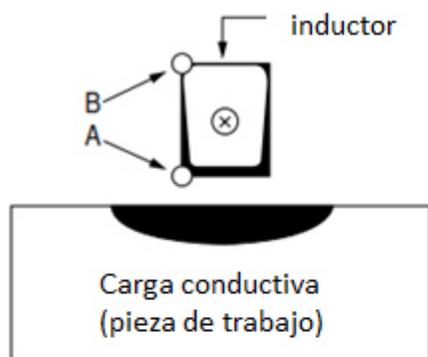


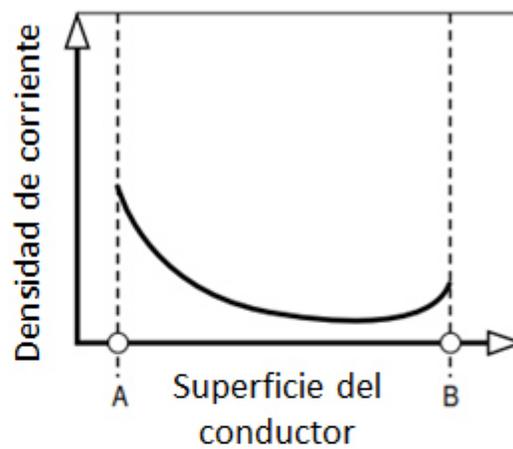
Figura 17. Efecto de concentración de un núcleo permeable en un campo magnético.

Cuando una pieza de trabajo se coloca bajo el conductor, la corriente se redistribuye como se muestra en la figura 18 (a). Debido a que el efecto de proximidad, una parte significativa de los flujos actuales del conductor cerca de la superficie del conductor que da a la pieza de trabajo. El resto de la corriente se concentra en los lados del conductor con una corriente inducida en un área general en la pieza de trabajo cerca del conductor. Después de un concentrador de flujo se coloca alrededor de este conductor, como se muestra en la Figura 18 (b), prácticamente la totalidad de la corriente del conductor se concentra en la superficie orientada hacia la pieza de trabajo. Una corriente significativamente más grande es inducida en la pieza de trabajo

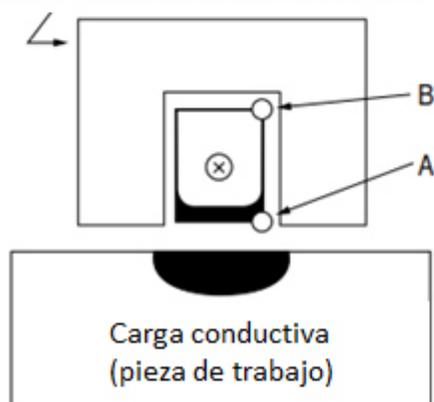
directamente al lado del conductor. Algunas aplicaciones como la calefacción muestran un aumento sustancial de la eficiencia.



(b)



Concentrador de flujo magnético



(c)

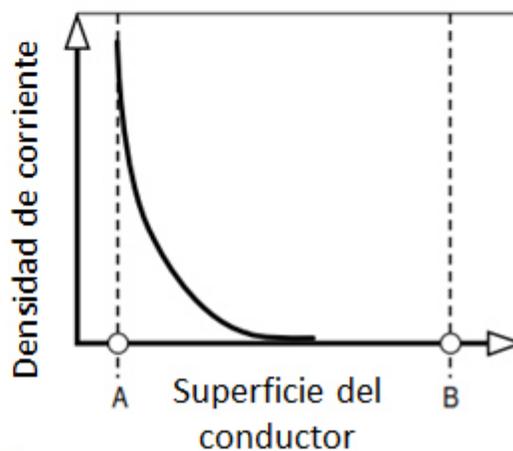


Figura 18. Distribución de corriente con el uso de concentradores de flujo magnético.

CAPÍTULO 2

MODELACION Y SIMULACION DEL PROCESO

2.1. Introducción

La modelación se interpreta como la construcción de algún sistema de interés tomando en cuenta todas las condiciones naturales que actúan sobre este sistema y busca resolverlo mediante métodos matemáticos. Un modelo es similar pero más simple que el sistema que representa (21). Uno de los propósitos de un modelo es permitir que el analista pueda predecir el efecto de cambios en el sistema. Por un lado, un modelo debe ser una aproximación lo más cercana al sistema real e incorporar la mayoría de sus características más destacadas. Por otro parte, no debería ser tan complejo que llegue a ser imposible de entender y experimentar con él. Un buen modelo es un equilibrio

razonable entre el realismo y la sencillez. Practicantes de simulación recomiendan aumentar la complejidad de un modelo de manera iterativa. Una cuestión importante en el modelado es la validez del modelo. Técnicas de validación de modelos incluir simulando el modelo bajo de entrada conocida condiciones y comparando la salida del modelo con el sistema real.

Es común confundir las palabras modelación y simulación. Sin embargo no es posible realizar una simulación de un proceso si no se realiza una modelación adecuada. La modelación es el proceso de extraer toda la información científica y tecnología sobre un sistema físico, organizar la información e interpretarla para lograr reproducir este fenómeno a través de técnicas analíticas o numéricas y predecir el comportamiento que tendrá el sistema. En general, un modelo diseñado para un estudio de simulación es un modelo matemático desarrollado con la ayuda de software de simulación (22). Para comprender plenamente el papel de la metodología del modelado, una pregunta debe ser dirigida, ¿Qué es una simulación? Cualquier número de definiciones se puede extraer de una variedad de distinguidos textos. Para los propósitos de esta discusión puede considerarse simplemente como:

El uso de un modelo matemático / lógico como un vehículo experimental para responder preguntas acerca de un sistema referente. Esta definición parece ser eficiente en el uso de las palabras y con cuidado de no suponer ciertas condiciones o propósitos implícitos. Por ejemplo, la simulación por computadora no es mandatorio; los modelos podrían seguir eventos discretos o formularios continuos y las respuestas pueden no ser correctas; y el sistema podría existir o ser imaginario

En esencia, una simulación proporciona la base para la toma de alguna decisión, esta decisión es basada en las respuestas proporcionadas por la importancia relativa de la simulación.

Las consecuencias de tomar una decisión basada en la simulación incorrecta pueden ir desde una simple molestia, a la pérdida de la inversión, a más consecuencias catastróficas.

Por lo tanto, tomar una decisión correcta es el objetivo primordial de la simulación. Si las relaciones que componen al modelo son relativamente simples, es posible utilizar métodos matemáticos para obtener una solución exacta del problema de interés; a este proceso se le llama método analítico. Sin embargo, la mayoría de los sistemas en la vida real son complejos y no es posible resolverlos por métodos analíticos, por lo tanto, se recurre a los métodos numéricos.

En los métodos analíticos el problema puede ser resuelto mediante un conjunto de ecuaciones que pueden ser reducidas a una sola solución a través de herramientas como álgebra, cálculo, ecuaciones diferenciales o ecuaciones diferenciales parciales. En los métodos numéricos se busca resolver el mismo tipo de problema pero ahora el procedimiento consistirá en utilizar sumas, restas, multiplicaciones, divisiones y comparaciones (23).

Existen computadoras que pueden resolver estas operaciones aritméticas muy rápidamente y de una manera eficiente; por lo tanto, este análisis está íntimamente relacionado a las computadoras y el resultado final será una aproximación a la solución real.

Al obtener resultados a través de la simulación se debe realizar una validación de nivel experimental o industrial. Si en esta etapa los resultados son satisfactorios podemos realizar predicciones con nuestra simulación modificando la información de entrada o incluso el modelo matemático.

2.2. Modelación matemática

La modelación matemática es uno de los mayores factores en el diseño satisfactorio de sistemas de calentamiento por inducción. Los modelos teóricos pueden variar de un simple cálculo a mano hasta un análisis numérico muy complicado el cual

puede requerir severas horas de trabajo computacional usando equipos de cómputo modernos (24). El seleccionar un modelo teórico en partículas depende de varios factores, incluyendo la complejidad del problema de ingeniería, exactitud requerida, limitación de tiempo y costo.

Antes que un ingeniero inicie con a proporcionar una simulación matemática de algún proceso es necesario tener un entendimiento de la naturaleza y física que envuelve el proceso a simular. Los ingenieros deben tener en cuenta las limitaciones de aplicar un modelo matemático, suposiciones, y un posible error deberán considerar las correcciones y sensibilidad de la selección del modelo para definir parámetros frontera como las propiedades del material o la temperatura inicial. Un modelo matemático puede trabajar bien en ciertas aplicaciones y dar resultados inciertos en otras. Bajo la estimación de parámetros del proceso o asunciones demasiado simples pueden llevar a un modelo matemático incorrecto que puede no proveer la exactitud deseada.

Es importante recordar que un análisis computacional puede en el mejor de los casos producir resultados que son derivados de ecuaciones gobernantes. De cualquier manera el primero y más importante de los pasos es la selección de un modelo matemático apropiado para el proceso a simular que describa correctamente el fenómeno físico que sucede en el proceso.

La modelación por computadora provee la habilidad de predecir como diferentes factores pueden influir durante el transcurso y el final de un tratamiento térmico y las condiciones de las piezas que pueden ser modificadas en el diseño de un proceso de calentamiento por inducción y garantizar los resultados deseados (25).

Como anteriormente lo hemos mencionado el calentamiento por inducción es una combinación de fenómenos compleja de electromagnetismo, transferencia de calor y fenómenos metalúrgicos (transformación de fase). Estas áreas están ampliamente ligadas ya que el fenómeno de calentamiento depende de la intensidad del campo magnético generado y la temperatura ligada a las propiedades del material las cuales son generadas dependiendo de la composición química del material.

2.3. Modelación matemática de campo electromagnético

El cálculo de campos electromagnéticos depende de las ecuaciones de Maxwell. Generalmente los campos electromagnéticos varían en función del tiempo, las ecuaciones de Maxwell se escriben de la siguiente manera:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\nabla \cdot D = \rho_{\text{carga}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde E es intensidad de campo eléctrico, D es densidad de flujo eléctrico, H es intensidad de campo magnético, B es densidad de flujo magnético, J es densidad de corriente y ρ es la densidad de carga eléctrica.

El símbolo ∇ es popular en algebra vectorial y es usado para la abreviación de una expresión de operación particular diferencial sin tener que entrar en detalles.

Las ecuaciones de Maxwell no solo tienen un significado puramente matemático, también tienen una interpretación física concreta.

En aplicaciones de calentamiento por inducción y tratamientos térmicos, un ingeniero debe poner particular atención a una relación simple entre la ecuación (Ec.3) y (Ec.4). La notación corta de (Ec.3) tiene un real significado en calentamiento por inducción y tratamientos térmicos de cuerpos con la propiedad de conductividad eléctrica. Para decir que la divergencia de la densidad del flujo magnético es equivalente

a cero decimos que las líneas de B no tienen una fuente de puntos la cual sea el origen o terminación, en otras palabras las líneas de B siempre forman una curva continua.

Las ecuaciones de Maxwell descritas anteriormente son en indefinidas formas, debido a que el número de ecuaciones es menor que el número de incógnitas. Estas ecuaciones llegan a definir cuando la relación entre la cantidad de los campos es especificada. La siguiente relación constitutiva es adicional y mantienen lo real para un medio isotrópico lineal.

$$D = \epsilon \epsilon E \quad (\text{Ec. 5})$$

$$B = \mu r \mu_0 H \quad (\text{Ec. 6})$$

$$J = \sigma E \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde los parámetros ϵ , μr y σ denotan respectivamente, la permitividad relativa, la permeabilidad magnética relativa y conductividad eléctrica del material; donde $\sigma = 1/\rho$, y ρ es la resistividad eléctrica del material.

La constante $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m es llamada la permeabilidad libre del espacio o del vacío, y similarmente la constante $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m es llamada la permitividad del espacio libre. Ambas son parámetros no dimensionales y tienen un significado similar. La permeabilidad magnética relativa indica la habilidad de un material a conducir el flujo magnético mejor que el vacío. Este parámetro es muy importante en la selección de materiales para concentradores de campo magnético. La Permitividad relativa indica la habilidad de un material para conducir el campo eléctrico mejor que el vacío o aire.

Durante la modelación en tres dimensiones algunos problemas interesantes tienden a ser manejados con suposiciones en dos dimensiones. Algunos factores que desfavorecen el campo de uso de modelación en tres dimensiones son los siguientes:

- El costo de computación es mucho mayor en tres dimensiones debido a las propiedades del material, cálculo electromagnético y el fenómeno de transferencia de calor en calentamiento por inducción.
- El usuario debe tener un conocimiento especial en algunos puntos teóricos y deben tener experiencia trabajando con modelaciones en tres dimensiones.
- La representación de resultados y geometrías de entrada deberá crear un buen conocimiento del problema de trabajo con imágenes en tres dimensiones.

Estos puntos deben ser tomados en cuenta al generar la modelación del problema, si es posible generar la modelación en dos dimensiones los tiempos y la complejidad del problema será menor por lo cual puede ser más factible obtener un resultado.

2.4. Modelación matemática del proceso térmico

2.4.1. Análisis térmico mediante el método de residuos ponderados

Se requiere expresar la ecuación 8 en la forma simplificada aplicando el método de residuos ponderados:

$$\int_{\Omega} w_i \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + Q - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad (\text{Ec. 8})$$

Es posible aproximar la temperatura utilizando las funciones de interpolación (26):

$$T(x_i, t) = N_i(x_i)T_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde n es el número de nodos para el elemento. Aplicando el método de Galerkin, $w_i=N_i$ se sustituye en la ecuación 8:

$$\int_{\Omega} N_i \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + Q - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad (\text{Ec. 10})$$

El coeficiente de conductividad térmica así como el calor específico y la densidad pueden depender de la temperatura. De acuerdo con el teorema de Green (27):

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} d\Omega = - \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial x_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} d\Omega + \int_{\Gamma} N_i \frac{\partial T}{\partial x_1} \hat{n}_1 d\Gamma \quad (\text{Ec. 11})$$

El teorema puede ser aplicado sobre la ecuación 10 para obtener la ecuación 12:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \left[k \frac{\partial N_i}{\partial x_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} + k \frac{\partial N_i}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_2} + k \frac{\partial N_i}{\partial x_3} \frac{\partial T}{\partial x_3} - Q N_i + \rho c_p N_i \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega \\ & + \int_{\Gamma} N_i \left[k \frac{\partial T}{\partial x_1} \hat{n}_1 + k \frac{\partial T}{\partial x_2} \hat{n}_2 + k \frac{\partial T}{\partial x_3} \hat{n}_3 \right] d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 12})$$

En la ecuación 12 se sustituyen las condiciones frontera, ecuaciones iniciales para las zonas de análisis sobre la integral de superficie:

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} \left[k N_i \frac{\partial T}{\partial x_1} \hat{n}_1 + k N_i \frac{\partial T}{\partial x_2} \hat{n}_2 + k N_i \frac{\partial T}{\partial x_3} \hat{n}_3 \right] d\Gamma = \\ & \int_{\Gamma} N_i h (T_s - T_{\infty}) d\Gamma_c + \int_{\Gamma_r} \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) d\Gamma_r \end{aligned} \quad (\text{Ec. 13})$$

De la ecuación 8 se determina la derivada parcial de T con respecto a cada una de las coordenadas x_1 , x_2 y x_3 y se obtiene la ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial N_i}{\partial x_j} T_i(t) \quad (\text{Ec. 14})$$

Sustituyendo ahora la ecuación 14 en la ecuación 15 se obtiene la siguiente ecuación:

$$-\int_{\Omega} \left(\mathbf{k} \frac{\partial N_i}{\partial x_1} \frac{\partial N_j}{\partial x_1} T_j(t) + \mathbf{k} \frac{\partial N_i}{\partial x_2} \frac{\partial N_j}{\partial x_2} T_j(t) + N_i \rho c_p \frac{\partial T_j}{\partial t} N_j - Q N_i \right) d\Omega \quad (\text{Ec. 15})$$

$$+ \int_{\Gamma} N_i \left[\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial x_1} \hat{n}_1 + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial x_2} \hat{n}_2 + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial x_3} \hat{n}_3 \right] d\Gamma = 0$$

Finalmente, sustituyendo la ecuación 15 en la ecuación 17 y ordenando términos se puede obtener la siguiente forma matricial:

$$[\mathbf{C}] \left\{ \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \right\} + [\mathbf{K}][\mathbf{T}] = [\mathbf{f}] \quad (\text{Ec. 16})$$

En la cual:

$$[\mathbf{C}] = \mathbf{c}_{ij} = - \int_{\Omega} \rho c_p N_i N_j d\Omega \quad (\text{Ec. 17})$$

$$[\mathbf{K}] = \mathbf{k}_{ij} = - \int_{\Omega} \left\{ \mathbf{k} \frac{\partial N_i}{\partial x_1} \frac{\partial N_j}{\partial x_1} + \mathbf{k} \frac{\partial N_i}{\partial x_2} \frac{\partial N_j}{\partial x_2} + \mathbf{k} \frac{\partial N_i}{\partial x_3} \frac{\partial N_j}{\partial x_3} \right\} d\Omega + \int_{\Gamma_c} h N_i N_j d\Gamma_c \quad (\text{Ec. 18})$$

$$[\mathbf{f}] = \mathbf{f}_i = - \int_{\Omega} Q N_i d\Omega + \int_{\Gamma_c} N_i h T_{\infty} d\Gamma_c - \int_{\Gamma_r} N_i \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) d\Gamma_r \quad (\text{Ec. 19})$$

Al suponer condiciones de estado estable la ecuación 18 tomaría exactamente la misma forma que la ecuación 8 dado que el término $[\mathbf{C}] [\partial \mathbf{T} / \partial t]$ sería cero. La matriz \mathbf{C} es conocida como matriz de capacitancia y a la matriz \mathbf{K} se le sigue llamando matriz de rigidez (28). Cabe resaltar que al considerar el fenómeno de radiación la ecuación 19 es no lineal por lo que se utilizan técnicas iterativas para la solución de este tipo de ecuaciones. Algunos paquetes comerciales utilizan esta formulación para resolver los problemas térmicos. Entre estos paquetes destacan ABAQUS y DEFORM los cuales utilizan el método Newton-Raphson.

La ecuación 20 puede considerarse como una ecuación semidiscreta debido al primer término $[C] [\partial T/\partial t]$. $\partial T/\partial t$ se puede aproximar mediante una ecuación de diferencias:

$$\left. \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \right|^{t+\Delta t} = \frac{\mathbf{T}^{t+\Delta t} - \mathbf{T}^t}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 20})$$

La ecuación 19 sugiere evaluar la ecuación 18 utilizando un esquema de solución para cada intervalo de tiempo Δt durante el análisis. Si se introduce un parámetro θ tal que:

$$\mathbf{T}^{t+\theta} = \theta \mathbf{T}^{t+\Delta t} + (1-\theta) \mathbf{T}^t \quad (\text{Ec. 21})$$

Sustituyendo la ecuación 19 en la ecuación 18 se obtiene:

$$[C] \left\{ \frac{\mathbf{T}^{t+\Delta t} - \mathbf{T}^t}{\Delta t} \right\} + [K] [\mathbf{T}]^{t+\theta} = [\mathbf{f}]^{t+\theta} \quad (\text{Ec. 22})$$

Y sustituyendo la ecuación 20 en la ecuación 21 se obtiene la siguiente ecuación:

$$[C] \left\{ \frac{\mathbf{T}^{t+\Delta t} - \mathbf{T}^t}{\Delta t} \right\} + [K] [\theta \mathbf{T}^{t+\Delta t} + (1-\theta) \mathbf{T}^t] = [\theta \mathbf{f}^{t+\Delta t} + (1-\theta) \mathbf{f}^t] \quad (\text{Ec. 23})$$

Re ordenando términos se obtiene finalmente la ecuación 23:

$$([C] + \theta \Delta t [K]) [\mathbf{T}]^{t+\Delta t} = ([C] + (1-\theta) \Delta t [K]) [\mathbf{T}]^t + \Delta t (\theta [\mathbf{f}]^{t+\Delta t} + (1-\theta) [\mathbf{f}]^t) \quad (\text{Ec. 24})$$

La ecuación 23 proporcionará los valores nodales de temperatura para un tiempo $t+\Delta t$.

Si $\theta=0$ la ecuación 24 se reduce a:

$$[C] [\mathbf{T}]^{t+\Delta t} = ([C] + \Delta t [K]) [\mathbf{T}]^t + \Delta t [\mathbf{f}]^t \quad (\text{Ec. 25})$$

Esta ecuación representa un esquema explícito, es decir, que los valores nodales de temperatura a ser calculados para un tiempo $t+\Delta t$ pueden ser obtenidos directamente a partir de los valores nodales conocidos de un tiempo anterior t . Para evitar el cálculo de la matriz inversa de $[C]$ se utiliza un proceso de diagonalización para la matriz permitiendo de esta manera realizar el cálculo directamente para cada valor nodal de temperatura.

Si $\theta=1$ la ecuación 23 se reduce a:

$$([C] + \Delta t [K])[T]^{t+\Delta t} = [C][T]^t + \Delta t [f]^{t+\Delta t} \quad (\text{Ec. 26})$$

Esta ecuación representa un esquema implícito. En este esquema siempre se recurrirá al cálculo de una matriz inversa para poder obtener los valores nodales de temperatura para cada periodo Δt en que sea dividido el análisis.

Haciendo una pequeña comparación de ambos esquemas el método explícito se caracteriza por presentar una rápida solución de la ecuación discretizada. Sin embargo, este esquema es condicionalmente estable, es decir, el valor Δt debe ser menor a un valor Δt crítico. De lo contrario el comportamiento de la solución del sistema presentará oscilaciones que no permitirán la convergencia hacia la solución del problema.

Los esquemas implícitos por el caso contrario no presentan este problema de estabilidad proporcionando una mayor libertad de elección para el valor Δt . Sin embargo, los tiempos de solución pueden ser considerablemente mayores debido al cálculo de la matriz inversa para cada Δt , aunado a que requiere de una mayor cantidad de espacio en el disco de la computadora para almacenar la información, aunque este método también tiene sus ventajas dado que en el caso particular de procesos de larga duración en un esquema explícito el valor Δt crítico podría ser exageradamente pequeño y su tiempo de solución podría ser considerablemente mayor al del esquema implícito.

2.5. Modelación matemática de la transformación de fase

El estudio de las transformaciones de fase en los metales resulta imprescindible, dado que la totalidad de las piezas metálicas utilizadas en la industria, sufren cambios microestructurales al ser procesadas. Estas transformaciones producen cambios en las propiedades mecánicas y térmicas del material.

Transformaciones de fase de estado sólido son medios importantes para el ajuste de la microestructura y por lo tanto la puesta a punto de las propiedades de los materiales. Para aprovechar esta herramienta para toda su extensión, mucho esfuerzo se gasta en la modelación de las transformaciones de fase.

La descomposición de la austenita en las diferentes fases no se inicia inmediatamente al bajar la temperatura por debajo de su zona de estabilidad ad, es necesario un tiempo para que empiecen a formarse los núcleos de la nueva fase y empiecen a crecer; este periodo es la llamada etapa de incubación.

En el momento en que éstos núcleos se han formado y han crecido lo suficiente para ser observados, que por convenio se ha tomado como el momento en que el volumen de la nueva fase alcanza el valor del 1 %, termina la etapa de incubación y empieza la transformación, la llamada etapa de crecimiento. El tiempo transcurrido en la etapa de incubación viene descrito por las curvas TTT en los procesos isotérmicos, y por las curvas CCT en los no isotérmicos (29).

En aceros hipoeutectoides, la austenita puede transformarse mediante difusión en ferrita, perlita y bainita, y por transformación no difusiva en martensita. Para las transformaciones difusivas se ha utilizado el modelo Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) y para la transformación martensítica se ha aplicado el modelo Koistinen-Marburger (30).

La ecuación JMAK, aplicable a las transformaciones difusivas isotermas, describe la evolución del volumen de fase transformada $[V(t)]$ en función del tiempo:

$$X = 1 - \exp(-kt^n) \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde X es la fracción de volumen transformada, k y n son parámetros que deben determinarse empíricamente a través de la curva TTT del material.

Como puede verse en la figura 19 el crecimiento de la fracción volumétrica transformada es función del tiempo, y para cada temperatura existe una curva diferente.

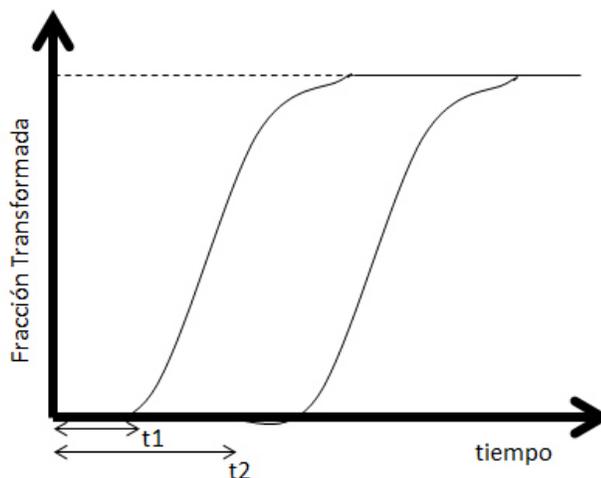


Figura 19. Representación de la ecuación JMAK en función del tiempo para dos temperaturas.

La curva TTT de un acero muestra con precisión el tiempo de inicio (tiempo para el cual la transformación ha alcanzado el 1%) y de fin de la transformación (momento en que la transformación ha alcanzado el 99%) en los procesos isotérmicos (figura 20).

Conociendo la curva TTT del acero y utilizando la ecuación JMAK se puede obtener los valores de k y n en función de la temperatura.

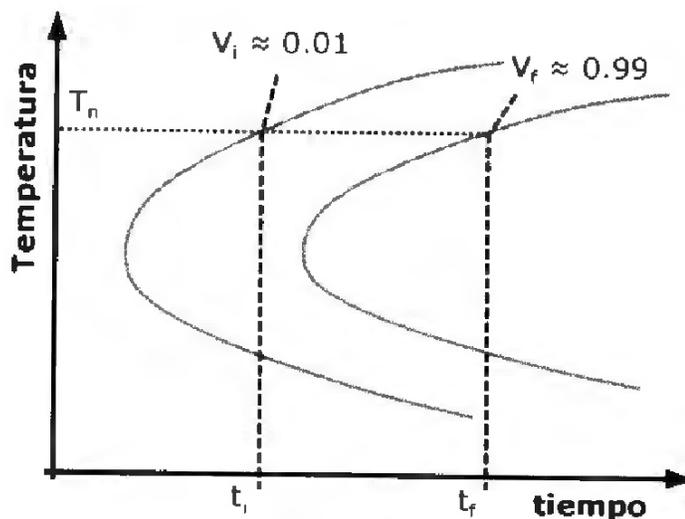


Figura 20. Curva TTT de un acero. Se indica los tiempos de inicio y final de transformación a una temperatura T_n .

En 1958 Koistinen y Marburger dedujeron la relación entre el grado de transformación y el subenfriamiento mediante el ajuste de datos experimentales obteniendo la ecuación:

$$X = 1 - \exp[-0.011 \cdot Ms - T] \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde X es la fracción volumétrica de martensita y la temperatura de inicio de la transformación austenita-martensita. Se ve en la ecuación, que la única dependencia del volumen transformado con el tipo de acero u otras variables se da en el valor de la Ms .

2.6. Modelación matemática del sistema

2.6.1. Propiedades del material

Tomando como referencia la composición química del material de la pieza de trabajo (Acero AISI 1043), se obtuvo la base de datos del material de las propiedades mecánicas, térmicas y electromagnéticas las cuales serán introducidas en el programa DEFORM en el cual se llevara a cabo el análisis. Esta base de datos se obtuvo mediante el programa computacional JMATpro el cual en base a la composición química y ecuaciones termodinámicas obtiene las propiedades del material en función de la temperatura (figura 21, 22, 23, 24).

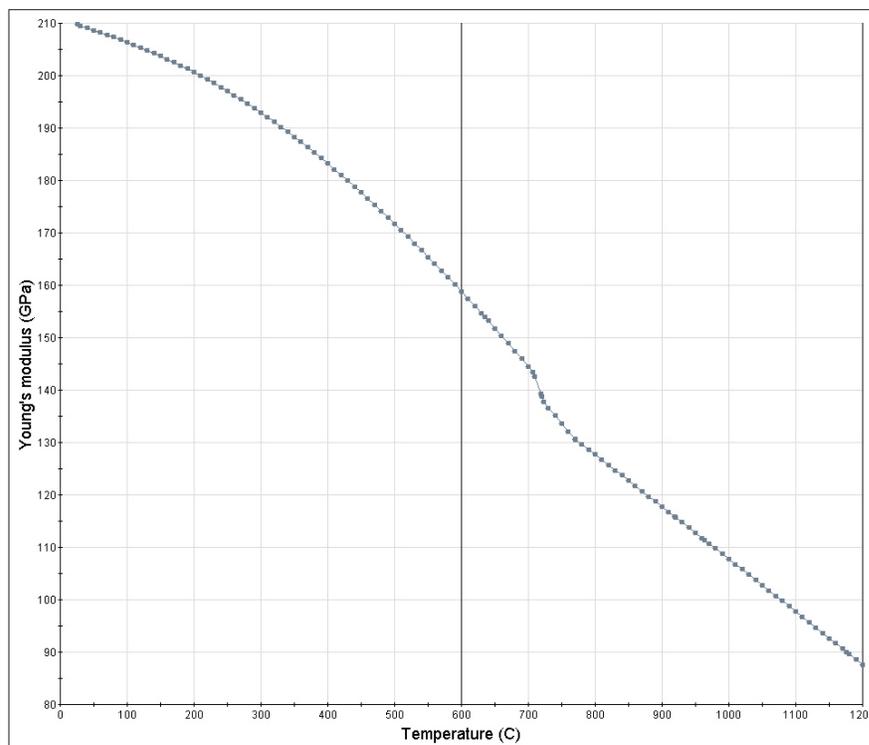


Figura 21. Módulo de Young calculado mediante JMATpro del acero AISI 1043.

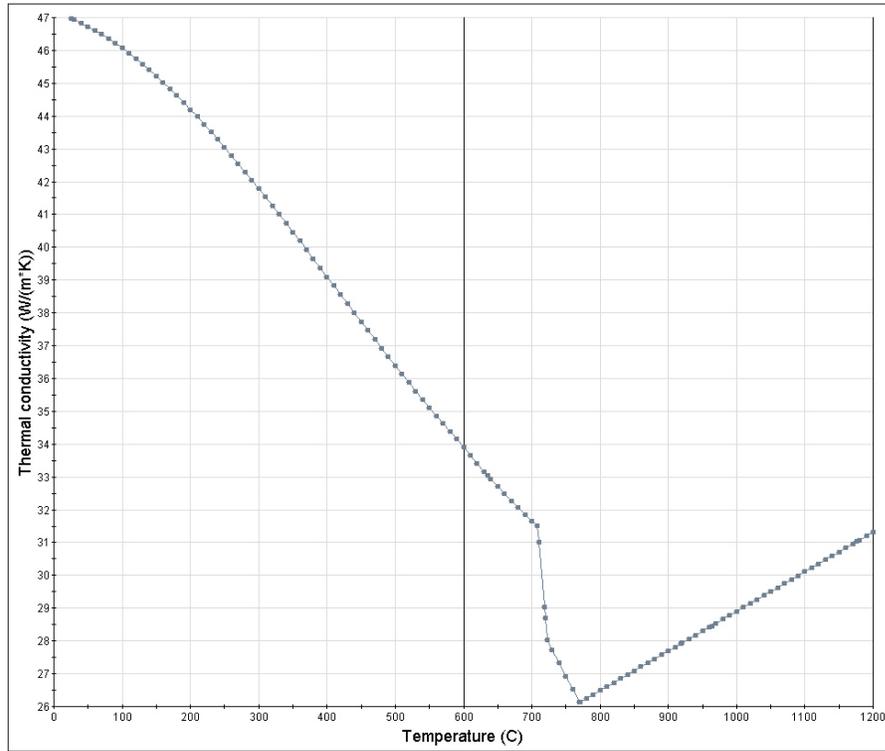


Figura 22. Conductividad térmica calculada mediante JMATpro del acero AISI 1043.

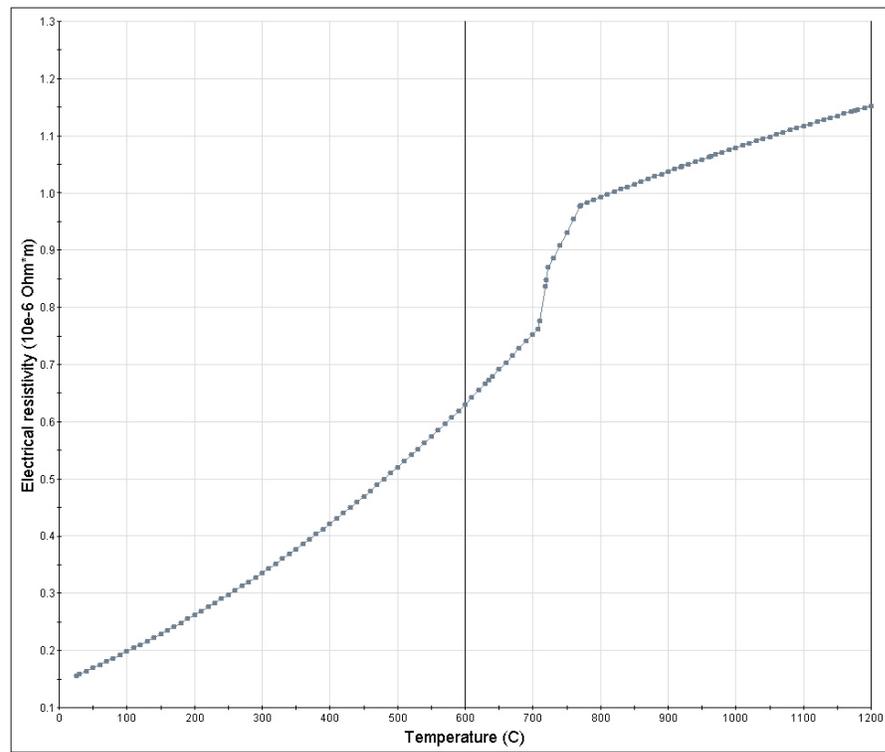


Figura 23. Resistividad eléctrica calculada mediante JMATpro del acero AISI 1043.

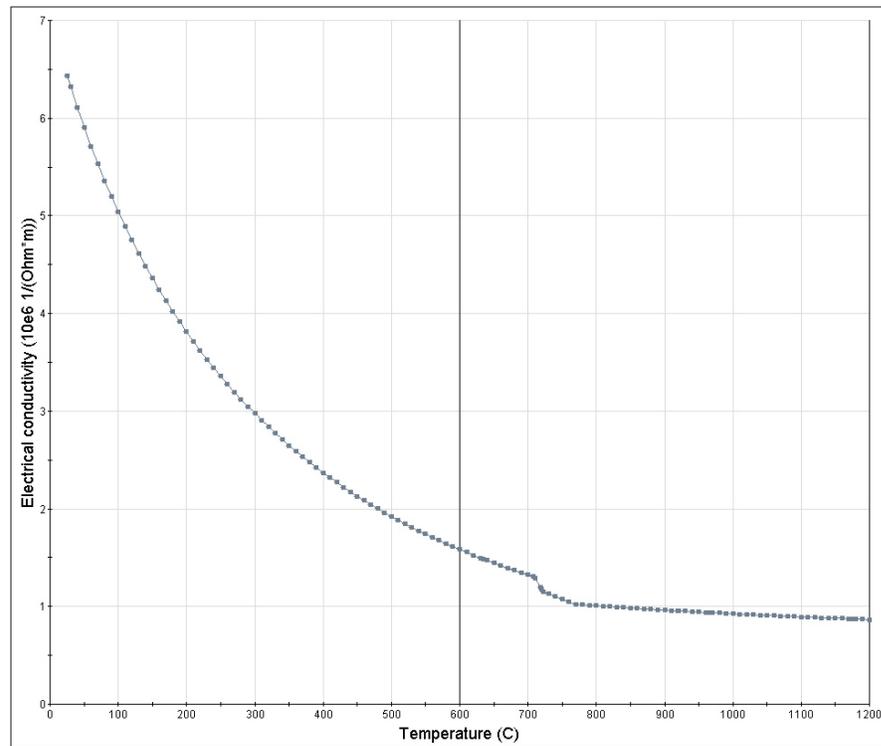


Figura 24. Conductividad eléctrica calculada mediante JMATpro del acero AISI 1043.

2.6.2. Propiedades del material

El sistema a analizar es el proceso de temple por inducción de husillo. Este trabajo comprende desde el calentamiento por inducción hasta la transformación de fase durante el proceso, con los respectivos movimientos de la bobina.

El sistema puede ser modelado en dos dimensiones y considerarse axisimetrico debido a las geometrías tanto de la pieza de trabajo como de la bobina (figura 25).

El sistema está dividido en etapas:

Etapas 1: Calentamiento diámetro interno de balero.

Etapas 2: Movimiento a segundo calentamiento con enfriamiento.

Etapas 3: Calentamiento diámetro externo de balero.

Etapa 4: Movimiento a segundo enfriamiento.

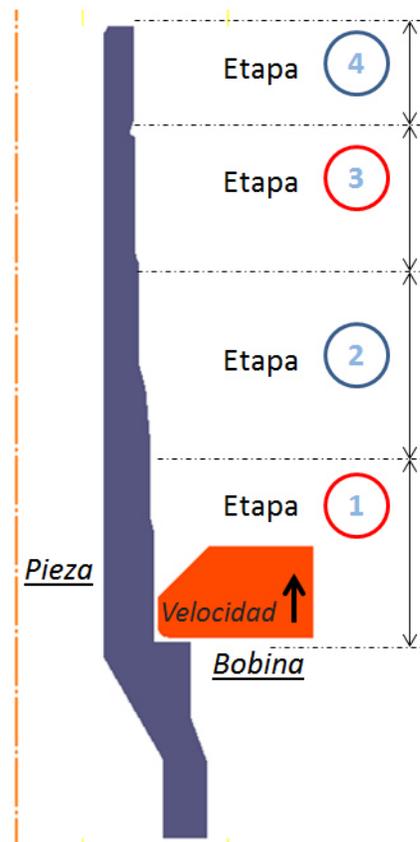


Figura 25. Modelo 2D con 4 etapas del sistema.

CAPÍTULO 3

METODO DE ELEMENTO FRONTERA Y METODO DE ELEMENTO FINITO

3.1. Modelación matemática del sistema

Quienes suelen estar familiarizados con los elementos finitos muy a menudo preguntan por qué es necesario el desarrollo de otra técnica computacional. La respuesta principal es que los elementos finitos han demostrado ser inadecuados en algunas aplicaciones de ingeniería y lo que es quizás más importante es que en muchos casos

difíciles de. El análisis de elementos finitos (FEM) es todavía un proceso relativamente lento debido a la necesidad de reducir la malla y redefinir en la pieza de trabajo o dominio de estudio.

El Método de Elementos Frontera (BEM) ha surgido como una alternativa a los elementos finitos todo en los casos en que se requiere una mayor precisión debido a problemas tales como la concentración de tensión o cuando el dominio se extiende a infinito. Por lo tanto, sólo requiere discretización de la superficie en lugar de el volumen, es decir, la dimensión de los problemas se reduce en uno. En consecuencia, el esfuerzo necesario para la discretización es sobre todo mucho más pequeño y, por otra parte, las mallas se puede generar fácilmente y los cambios de diseño no requieren un remallado completo.

En el Método de Elemento Finito (FEM) la región de la solución es considerada una construcción de muchas pequeñas subregiones interconectadas llamadas elementos finitos (31). La idea principal de los elementos finitos es encontrar la solución a un problema complejo reduciéndolo a uno pequeño.

La ventaja de dividir un gran elemento en los pequeños es que permite que cada elemento pequeño tenga una forma más simple, lo que conduce a una buena aproximación para el análisis. Otra ventaja es que en cada nodo (la intersección de los límites) surge un polinomio interpolador, que permite un resultado preciso en un punto específico. Antes de que el método de elementos finitos, ingenieros y médicos utilizaban un método que implicaba el uso de ecuaciones diferenciales, que se conoce como el método de diferencias finitas.

El análisis de elementos finitos se puede hacer por uno, dos y tres dimensiones los problemas. Pero en general, los problemas más fáciles son las que incluyen una y dos dimensiones, y los que se pueden resolverse sin la ayuda de un sistema de cómputo, ya que incluso si se escriben una gran cantidad de ecuaciones, si se manejan con cuidado, un resultado exacto o muy aproximado se puede lograr. Pero si el análisis requiere de herramientas tridimensionales, entonces sería mucho más complicado, porque va a

implicar una gran cantidad de ecuaciones que son muy difíciles de resolver sin tener un error.

3.2. Definición del método de elemento frontera (BEM)

Una definición del método de elemento frontera es un método de cálculo numérico para resolver ecuaciones diferenciales parciales lineales que se han formulado en forma de ecuaciones integrales (32). Este método aplica elementos de superficie a los dominios 3D y elementos lineales a los 2D. Los elementos frontera son buenos para la solución de problemas con geometrías complicadas, problemas de concentración de esfuerzos, dominios infinitos, propagación de ondas entre otros tipos.

Las principales ventajas del Elemento Frontera se enlistan a continuación:

- Menos tiempo de preparación de datos: Este es un resultado directo de la modelización 'únicamente de superficie'. Así, el tiempo del analista al requerido para la comprobación de los datos para un problema dado debe ser reducido en gran medida. Por otra parte, los cambios posteriores en mallas se hacen más fáciles.
- Alta resolución de la tensión: Las tensiones son correctas, porque no se impone una mayor aproximación de la solución en los puntos interiores, es decir, la solución es exacta y totalmente continuo dentro del dominio.
- Menos tiempo y almacenamiento informático: Para el mismo nivel de precisión, el método BEM utiliza un menor número de nodos y elementos, es decir, de una fiabilidad comparable en los valores del esfuerzo, las mallas FEM necesitarían más divisiones límites que el equivalente de mallas BEM. Por lo tanto, el modelado de un cuerpo tridimensional con FEM y calcular la tensión (o cualquier otra) en cada punto nodal es muy ineficiente porque sólo unos pocos de estos valores serán incorporados en el análisis del diseño. Por lo tanto, el uso de

BEM es uso de los recursos informáticos, y, además, dado que los puntos internos en soluciones de BEM son opcionales, el usuario puede centrarse en una región interior particular en lugar de todo el interior.

Algunas desventajas del Elemento Frontera se enlistan a continuación:

- Las matemáticas no familiares: Las matemáticas utilizadas en formulaciones de BEM puede parecer poco familiar para los ingenieros (pero no difícil de aprender). Sin embargo, muchos de los procedimientos numéricos FEM son directamente aplicables a soluciones BEM (como la integración numérica, aproximación superficial, el tratamiento de las condiciones frontera).
- En problemas no lineales, el interior debe ser modelado: El modelado de interiores es inevitable en los problemas con materiales no lineales. Sin embargo, en muchos casos no lineales (tales como elastoplasticidad) de modelado interior puede restringirse a zonas seleccionadas, tales como la región alrededor de un comienzo de grieta, entre otros.
- Matriz de solución completa y asimétrica: La matriz de solución resultante de la formulación de BEM es asimétrico y totalmente poblada, sin coeficientes cero, mientras que las matrices de solución FEM son generalmente mucho más grande pero poco poblada. Esto significa que toda la matriz solución BEM se debe guardar en la memoria del núcleo de la computadora. Sin embargo, esto no es una desventaja grave porque para obtener el mismo nivel de precisión como la solución FEM, el método BEM necesita sólo un número relativamente modesto de nodos y elementos.
- Malo para estructuras delgadas (shell) análisis en tres dimensiones: Esto es debido a la gran relación superficie / volumen y la estrecha proximidad de los puntos nodales en cada lado de la estructura de espesor. Esto provoca inexactitudes en las integraciones numéricas.

3.2.1. Desarrollo histórico del Método de Elemento Frontera

Hasta principios de los años 80's, el BEM se conocía como Método Integral de Ecuación Frontera (BIEM). Como un método para resolver los problemas de la física y matemática tiene su origen en el trabajo de G. Green (33). Él formuló, en 1828, la representación integral de la solución para los problemas de Dirichlet y Neumann de la ecuación de Laplace, introduciendo la llamada función de Green para estos problemas. En 1872, Betti presenta un método general para la integración de las ecuaciones de elasticidad y que derivan su solución en forma integral. Básicamente, esto puede ser representado como un acoplamiento del trabajo de Green a las ecuaciones de Navier de elasticidad. En 1885, Somigliana (34), utiliza el teorema de reciprocidad de Betti para derivar la representación integral de la solución para el problema de la elasticidad, incluyendo las fuerzas en un cuerpo, los desplazamientos de límites y las tracciones.

Sin embargo, se podría atribuir a Fredholm como el creador del BEM. A principios del siglo XX, fue el primero en utilizar las ecuaciones integrales de frontera con el fin de encontrar la cantidad de límites desconocidos para los problemas de la teoría potencial (35). De hecho, el método fue empleado como una herramienta matemática para determinar las condiciones de frontera necesarias para un problema bien planteado de la física-matemática, y no como un método para resolver el problema. Esto es bastante razonable, ya que era, y sigue siendo imposible encontrar la solución analítica de las ecuaciones integrales singulares derivadas.

En los métodos antes mencionados, las cantidades de límites desconocidos tienen un significado físico o geométrico directo y por esta razón se les conoce como BEM directo. Además de estos métodos, también hubo otras formulaciones BEM desarrollados, en los que las cantidades de fronteras consolidadas desconocidas no tienen significado físico o geométrico directo, y, posteriormente, se les da el nombre BEM indirecto (36).

Algunas formas de solución de las ecuaciones integrales sólo se han obtenido para algunos dominios con geometrías muy simples. Por desgracia, el trabajo de Fredholm precedió a los sistemas de cómputo, lo que podría hacer que sus ideas prácticas. Por esta razón, BIEM fue olvidado a finales de los 50's. Con la llegada de las computadoras, el método volvió a los escenarios como un método numérico atractivo para la solución de problemas de ingeniería.

Métodos numéricos fueron desarrollados para la solución de las ecuaciones integrales de frontera y problemas físicos difíciles de la geometría de contorno complejo, que no pudieron ser abordados por otros métodos, se solucionaron por primera vez por el BIEM. Las primeras obras que sentaron las bases de BEM como una técnica computacional aparecieron a principios de los años sesenta. Jaswon y Symm utilizaron las ecuaciones de Fredholm para resolver algunos problemas bidimensionales de teoría de potencia (37).

3.2.2. Formulación matemática para el Método de Elemento Frontera

En el método de elemento frontera solo se requiere la discretización de los componentes del sistema de inducción. El procedimiento computacional establece la calidad de las superficies desconocidas (por ejemplo la densidad de corriente equivalente a lo largo de la superficie) que debe satisfacer la solución global.

Acorde a una de las muchas formas de BEM, este asume que la impedancia de la superficie es inicialmente conocida y puede ser determinada de la siguiente manera:

$$Z_0 = E_t/H_t \quad (\text{Ec. 29})$$

Esta suposición fue propuesta por Leontovich para problemas que exhibían un efecto piel muy pronunciado. Obviamente Z_0 no es constante a lo largo de la pieza y está en función del campo electromagnético. Para muchas aplicaciones de calentamiento por inducción, la impedancia de la superficie de la pieza de trabajo puede ser definida

como un nodo particular ξ , similar a la impedancia superficial de un plano conductor infinito como se muestra en la ecuación 30:

$$Z_0^\xi = \rho_\xi(U + jV)/\delta_\xi \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde U y V son coeficientes, U, V \leq 1 dependiendo de la aplicación, ρ_ξ es resistividad eléctrica y δ_ξ es la penetración de corriente en el nodo Q.

3.3. Definición del Método de Elemento Finito (FEM)

Antes de proveer una definición completa del método de elemento finito será conveniente ver algunos aspectos importantes que servirán como base para su mejor entendimiento. El método de elemento finito (MEF) puede ser definido como una técnica numérica utilizada para obtener una solución aproximada de un problema de ingeniería (38). El procedimiento de discretización consiste en dividir el sistema continuo en m elementos que se encuentran conectados por nodos. A diferencia del MDF y MVF el MEF permite utilizar elementos de diversas geometrías tales como triángulos, rectángulos o cuadriláteros en 2 dimensiones o elementos hexaédricos o tetraédricos en 3 dimensiones sobre los que se aplica la formulación.

El método de elemento finito no ofrece restricción al trabajar con una geometría compleja dado que los elementos pueden ser elegidos de cualquier tamaño, forma y cualquier orientación para ajustarse a la geometría dada, situación que hace el análisis de diferencias finitas no sea eficiente en este tipo de casos. En la figura 26 se muestra un ejemplo de mallado utilizando diferencias finitas (caso a) y elemento finito (caso b).

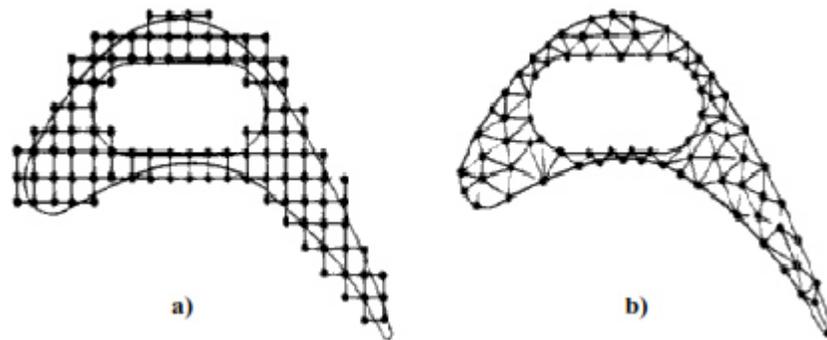


Figura 26. Discretización por diferencias finitas (a) y por elemento finito (b).

El MEF se enfoca más a problemas con condición frontera de Neumann mientras que los métodos de diferencias finitas y de volumen finito son más aplicados a problemas con condición frontera Dirichlet.

Otra diferencia importante es la forma en que se manipulan las ecuaciones gobernantes; en el método de elemento finito las ecuaciones son definidas en forma independiente para cada elemento y se tienen como herramienta los siguientes métodos:

- Método variacional: Los métodos basados en energía, como por ejemplo el principio de Hamilton o el principio de energía potencial mínima son considerados como una forma especial del principio variacional.
- Métodos de residuos ponderados.
- Métodos basados en la serie de Taylor (MDF).
- Métodos basados en las leyes de conservación sobre volúmenes de control (MVF).
- Representación integral (métodos libres de malla).

Posteriormente se hace una interconexión de todas las relaciones obtenidas para llegar a obtener un conjunto matricial (global) de ecuaciones con un cierto número de incógnitas de la forma $Ku=F$ que deberá ser resuelto para obtener la solución final aproximada.

3.3.1. Desarrollo histórico del Método de Elemento Finito (FEM)

El método de elemento finito surge a partir de 2 ramas: la ingeniería, y las matemáticas. Desde el punto de vista matemático se diseñaron técnicas que se aplicaban directamente sobre las ecuaciones diferenciales, tales como los métodos de diferencias finitas, métodos de residuos ponderados y los métodos variacionales (39).

Rayleigh en 1870 así como Ritz y Galerkin entre 1909 y 1915 utilizaron funciones de prueba (también llamadas funciones de interpolación) para aproximar las soluciones de las ecuaciones diferenciales. Sin embargo ellos aplicaban el método sobre todo el dominio del problema analizado (40).

En 1943 Courant realizó un ensamble de elementos triangulares y aplicó el principio de energía potencial mínima para resolver problemas de torsión (41). En 1959 Greenstadt presentó un método de discretización el cual involucraba celdas en lugar de puntos y para cada celda la función desconocida era representada mediante una serie de funciones, cada una asociada con cada celda para después aplicar un método variacional apropiado a cada celda y finalmente acoplar las ecuaciones obtenidas para todas las celdas. Muchas de sus ideas junto con las de Galerkin sirvieron como base matemática para el método de elemento finito y prácticamente se han mantenido hasta hoy en día.

Desde el punto de vista de la ingeniería se atacaba al problema creando una analogía entre elementos discretos y porciones finitas de un dominio continuo. Las aplicaciones iniciales eran para resolver problemas estructurales. En los años 40 McHenry, Hrenikoff, Newmark y Southwell demostraron que se podían obtener buenas soluciones a problemas de elasticidad reemplazando pequeñas porciones del sistema continuo a un arreglo de barras elásticas simples. En 1956 Turner y Clough publicaron una solución para problemas que presentaban condiciones de esfuerzo plano utilizando elementos triangulares cuyas propiedades se determinaron a partir de las ecuaciones de la teoría de elasticidad. Desde el punto de vista ingenieril nace el término “elemento

finito” utilizado por primera vez por Clough en 1960 (42). Igualmente en este año surge una publicación de Argyris en la cual se establece en forma detallada una formulación matricial para la teoría estructural en la cual se demostraba que ésta podía ser generalizada para cualquier tipo de aplicación que involucrara elementos estructurales diferentes a vigas, barras, etc.

Desde el punto de vista computacional Argyris publicó en 1954 una serie de artículos que cubrían análisis lineales estructurales y técnicas eficientes de solución para ser resueltos mediante una computadora. Trabajos similares fueron realizados por Clough durante ese periodo (43). A partir de 1960 comenzaron a crearse paquetes computacionales de elemento finito, entre los primeros surgió NASTRAN el cual fue un punto de partida para la generación de paquetes computacionales como ANSYS, ALGOR, COSMOS (44), ABAQUS, DEFORM, entre otros.

3.3.2. Formulación matemática para el Método de Elemento Finito (FEM)

- Método de aproximación directa

Con este método es posible resolver problemas aplicando un razonamiento físico directo; es decir, las ecuaciones que rigen el modelo son relativamente sencillas y no exigen un análisis matemático riguroso. Los elementos discretos pueden ser sencillamente identificados y las propiedades de cada elemento son obtenidas para hacer un ensamble del sistema entero. En la figura 27 se muestran varios ejemplos en los que se puede aplicar este método. En el caso a) cada resorte con constante elástica k puede representarse como un elemento y la relación que existe entre fuerza y desplazamiento es la ley de Hooke ($F=kx$). El caso b) es un problema térmico y la constante k ahora es llamada conductividad térmica y en este caso el sistema se representa por un solo elemento y los flujos de calor se obtienen aplicando la ley de Fourier. Nótese que para ambos sistemas se llega a un sistema matricial de la forma $Ku=F$, además se puede observar que dentro de la matriz K están contenidas las propiedades de los elementos; a

esta matriz se le conoce como matriz de rigidez.

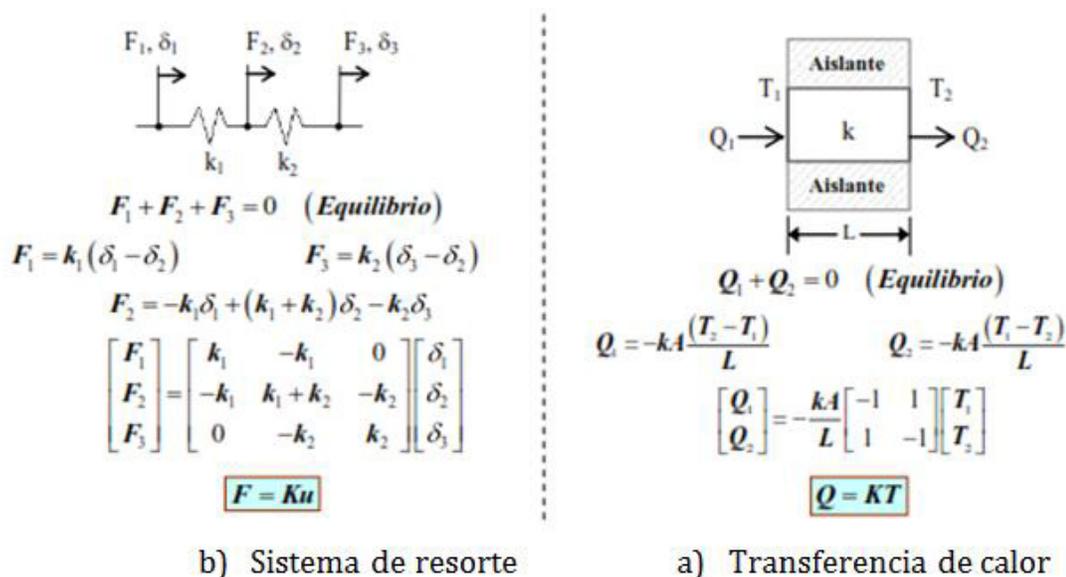


Figura 27. Aplicaciones del método de aproximación directa.

- Método de Ritz

El método de Ritz es un método variacional en el cual se busca obtener una solución aproximada para el problema en cuestión utilizando una combinación lineal de funciones de prueba ψ_i con parámetros indeterminados c_i . Para poder aplicar este método así como todos los métodos variacionales se requiere contar con un funcional el cual es extremizado diferenciándolo con respecto a cada variable desconocida c_i . De este procedimiento se obtiene un sistema de n ecuaciones simultáneas de las cuales se obtendrá cada valor c_i . En el método de Ritz las funciones de prueba definen completamente al dominio que se está analizando y deben de satisfacer las condiciones fronteras presentes en éste. El funcional I puede ser representado en 2D por la ecuación:

$$I(\Phi) = \int \int F(\Phi, \Phi_x, \Phi_{xx}, \Phi_{xy}, \dots) dx dy \quad (\text{Ec. 31})$$

En la ecuación 31, F puede depender de una función Φ así como de sus derivadas parciales (Φ , Φ_x , Φ_{xx} , Φ_{xy}). Por ejemplo en una dimensión la solución original Φ puede ser aproximada a una función en un intervalo $[x_1, x_2]$ utilizando una combinación lineal de las funciones de prueba:

$$\phi(x) \approx \tilde{\phi}(x) = \psi_0 + \psi_i c_i \quad (\text{Ec. 32})$$

En esta ecuación ψ_i representa a las funciones de prueba. Existe n coeficientes c_i a ser determinados. Una vez que estas funciones son elegidas de tal forma que cumplan las condiciones frontera, son introducidas en el funcional el cual es posteriormente extremizado con respecto a cada coeficiente c_i :

$$\frac{\partial}{\partial c_i} [I(\phi)] = 0 \quad (\text{Ec. 33})$$

El grado de aproximación para la solución del problema dependerá del número de términos elegidos para la función prueba.

Como se mencionó previamente el método de elemento finito consiste en subdividir el dominio en entidades conocidas como elementos unidos por nodos. Aplicando el concepto del método de Ritz a esta técnica numérica, el funcional ahora será minimizado para cada elemento en forma independiente y posteriormente se sumarán todas las contribuciones de cada uno de los funcionales extremizados para cada elemento y de esta forma se obtendrá el sistema global de ecuaciones. En este caso las funciones de prueba ahora serán conocidas con el nombre de funciones de interpolación o funciones de forma (N). Ahora para cada elemento existirán n variables desconocidas donde n ahora será el número de nodos por elemento (el número de elementos es m):

$$u^e = N_i u_i \quad (\text{Ec. 34})$$

$$\frac{\partial}{\partial u_j} [I^{(e)}] = 0 \quad j = 1, 2 \dots n \quad (\text{Ec. 35})$$

En el caso de que exista un funcional cuadrático, es decir, que la función u y sus derivadas tienen como grado máximo 2 la ecuación 35 tendrá la siguiente forma como se demostrará más adelante:

$$\frac{\partial}{\partial u_j} [I^e] = Ku - f = 0 \quad (\text{Ec. 36})$$

- Método de residuos ponderados

El método de residuos ponderados representa otra forma de obtener una formulación para el método de elemento finito. Esta técnica es apropiada cuando no se dispone del funcional en el método variacional. Esto es debido a que aún y cuando todos los problemas físicos pueden ser representados mediante un funcional la obtención de éste puede ser relativamente complicada. El procedimiento puede explicarse de la siguiente manera:

Se supone que se tiene una ecuación diferencial de la siguiente forma:

$$f(\phi(x_1, x_2)) = D_{x1} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + D_{x2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} - g\phi + Q = 0 \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde D_{x1} y D_{x2} , g y Q son constantes físicas. Inicialmente se aplica el concepto del método de Ritz utilizando las funciones de aproximación de la ecuación 19. Sustituyendo la ecuación 34 en la ecuación 37 origina un valor llamado residuo (R) o error el cual será diferente de cero debido a que la función de prueba está siendo utilizada para aproximar a la solución original:

$$R = f(\tilde{\phi}(x_1, x_2)) \neq 0 \quad (\text{Ec. 38})$$

R también estará en función de los valores desconocidos u_i . Ahora los valores u_i serán determinados de tal forma que R desaparezca en un sentido promedio sobre el dominio completo, es decir:

$$\int_{\Omega} w_i R d\Omega = 0 \quad (\text{Ec. 39})$$

Los w_i son llamados funciones de ponderación. Según la elección de estas funciones es el nombre que se le da al método:

1. Método de Galerkin
2. Método de Petrov-Galerkin
3. Método de subdominio
4. Método de mínimos cuadrados
4. Método de colocación

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACION

4.1. Introducción

La experimentación realizada durante este trabajo de tesis fue dividida en 2 etapas:

- Proceso de temple por inducción actual (Técnica de escaneo).
- Proceso de temple por inducción propuesto (Técnica calentamiento estático).

Durante la etapa de experimentación del proceso de temple por inducción actual se llevó a cabo la validación de los resultados de temperatura superficial mediante la toma de video de una cámara termografía realizando un comparativo con los resultados de la simulación de calentamiento. Posteriormente se realizó la simulación del proceso de temple y transformación de fase martensita con su respectiva validación mediante corte y evaluación metalúrgica de muestra, además de la comparación de resultados de durezas obtenidos durante el proceso de temple y los resultados obtenidos en la simulación.

La segunda etapa del proceso de temple por inducción fue llevada a cabo con la colaboración del personal del laboratorio de aplicaciones de GH Induction. Durante esta etapa se realizaron 2 propuestas de diseño de bobinas y se realizaron las pruebas de simulación así como las validaciones físicas y metalúrgicas. Previo a las pruebas se realizaron cálculos teóricos para establecer los parámetros iniciales del proceso mediante las gráficas de Lozinski.

4.2. Proceso de temple por inducción método escaneo (actual)

4.2.1. Pruebas Físicas

Previo a las pruebas físicas del proceso actual se realizaron una serie de tomas termografías para la validación de las temperaturas. Durante estas pruebas se deshabilitó el medio temple para lograr captar las temperaturas superficiales como se muestra en la figura 28.

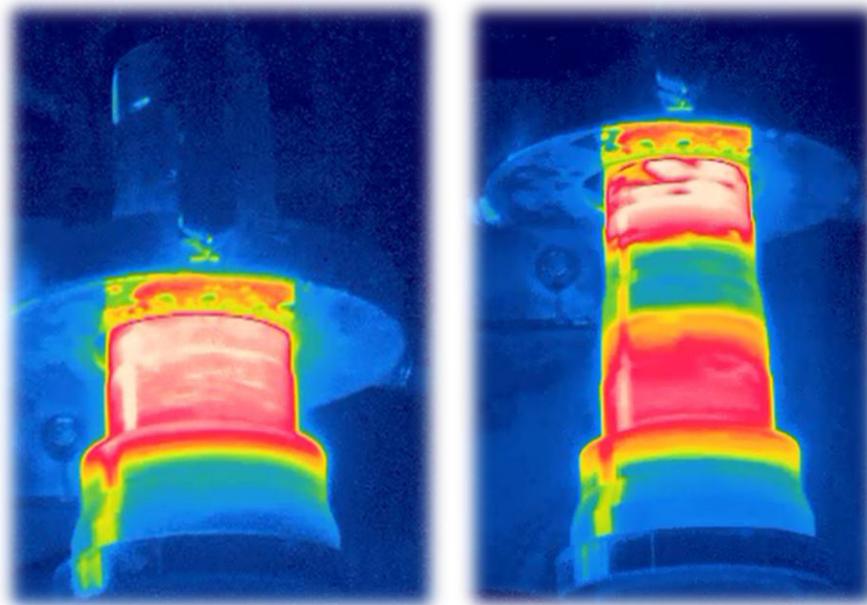


Figura 28. Temperatura superficial obtenida durante el calentamiento del diámetro interior (izq.), temperatura superficial obtenida durante el calentamiento del diámetro exterior (der).

Para la validación de cambios de fase y dureza se realizaron cortes transversales de la pieza en las zonas tratadas térmicamente, posteriormente fueron atacados químicamente con ácido nítrico (HNO_3) con una concentración de 25% para revelar la fase transformada a martensita y realizar la medición de los patrones de temple y realizar la medición de dureza en el equipo Instron ATA (Figura 29, 30)

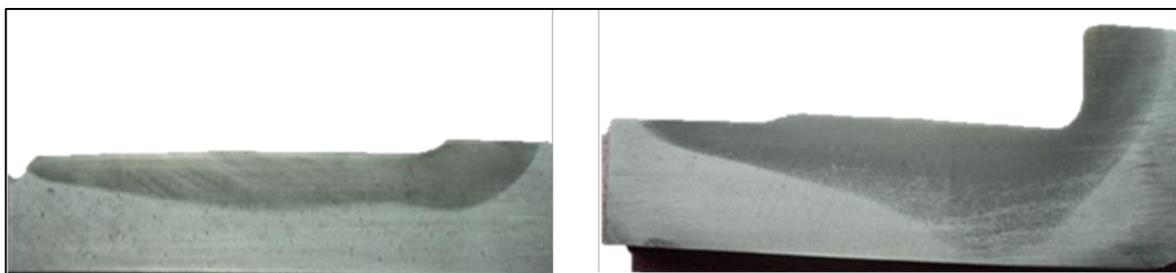


Figura 29. Patrones de temple (fase martensita) revelados mediante ataque químico de HNO₃ al 25%, lado izquierdo diámetro externo, lado derecho diámetro interno.

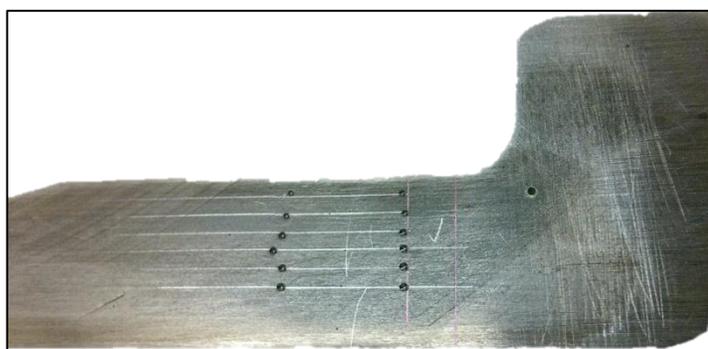


Figura 30. Corte transversal de diámetro interno para medición de dureza.

4.2.2. Modelo numérico

Como se mencionó en la sección 4.1 se dividió el trabajo en 2 etapas. Para el desarrollo computacional se utilizó el paquete comercial DEFORM HT. Se diseñó un modelo electromagnético-térmico 2D, para la simulación del proceso actual, la tabla 3 muestra los parámetros utilizados durante la simulación.

Tabla 3. Parámetros de proceso propuesto utilizados en la simulación proceso actual.

| Paso | Potencia (kW) | Tiempo (s) | Velocidad (in/seg) | Frecuencia (kHz) |
|------|---------------|------------|--------------------|------------------|
| 1 | 120 | 33 | 0.13 | 3 |
| 4 | 105 | 7 | 0.13 | 3 |

Para la segunda etapa del proyecto se diseñó un modelo electromagnético-térmico 3D. La principal razón de realizar la simulación en 3D fue el diseño propuesto de las bobinas, los cuales tienen una geometría con mayor complejidad las cuales no pudieron ser modeladas en 2D. Para esta etapa se diseñaron 2 bobinas diferentes y se realizó la simulación con los parámetros mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de proceso propuesto utilizados en la simulación proceso propuesto.

| paso | Potencia (kW) | Tiempo (s) | Velocidad (in/seg) | Frecuencia (kHz) |
|------|---------------|------------|--------------------|------------------|
| 1 | 200 | 14 | 0 | 10 |
| 2 | 190 | 5 | 0 | 10 |

La metodología utilizada para la modelar el trabajo en esta tesis puede ser utilizada en general para cualquier problema y tipo de análisis.

1. Modelación de la geometría

Existen varias formas de crear las geometrías necesarias para la simulación, puede ser en el mismo paquete de simulación o realizarlas en algún paquete de diseño CAD y posteriormente importarla al programa donde se trabajara la simulación. En nuestro caso se creó la geometría del husillo y de la bobina en un paquete de diseño posteriormente importándolo al programa DEFORM HT. Ambas geometrías fueron dibujadas en base a los planos que se tienen en la empresa SISAMEX considerando en ambos simetría (figura 31).

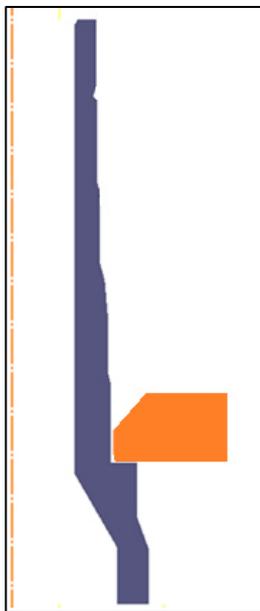


Figura 31. Geometrías de husillo (gris) y bobina (naranja).

2. propiedades físicas

Una vez que se tengan las geometrías definidas se deben asignar las propiedades físicas de cada material. Dependiendo del tipo de fenómeno que se esté analizando serán las propiedades requeridas para la simulación.

3. Mallado

El mallado, llamado de forma más precisa discretización, es la operación que convierte un modelo matemático en un modelo de elementos finitos listo para solucionar. Este procedimiento consiste en crear una malla gruesa inicial, realizar el análisis y comparar los resultados obtenidos con los datos reales. Si la distribución de la variable de interés no es la adecuada se procede a un procedimiento de remallado o refinamiento de malla. La solución debe ser independiente del tipo de mallado, es decir, la malla con menor refinamiento que obtengamos una solución lo más aproximada a la solución real es la óptima.

En nuestro caso de estudio se realizó una malla la cual tuviera un refinamiento en la superficie del husillo en específico en las zonas que serán afectadas durante el calentamiento por inducción.

4. Tipo de análisis

Teniendo establecidas las propiedades físicas se debe definir el tipo de análisis a realizar. En nuestro caso de estudio el análisis es electromagnético-térmico y posteriormente de transformación de fase. La simulación correspondiente al proceso actual está dividida en 4 pasos principales:

En el paso 1 se realiza un análisis electromagnético-térmico imponiendo las condiciones frontera en el husillo las cuales son la superficie que será afectada por la inducción magnética y la radiación de calor teniendo en consideración el coeficiente de emisividad para la superficie del acero. En este paso la bobina realiza 2 operaciones, la primera es realizar un calentamiento al inicio del proceso para lograr una penetración adecuada en la zona del radio del husillo. Posteriormente realiza un movimiento de escaneo de cierta longitud calentando el diámetro interno (figura 32).

En el paso 2 continua con movimiento la bobina sin realizar un calentamiento. Al llegar a una distancia específica se detiene por un tiempo de 10 segundos durante los cuales se realiza el proceso de enfriamiento activando una ventana con un coeficiente de convección dado para lograr la transformación de fase martensita.

Durante el paso 3 realizamos dos operaciones de la misma manera que en el paso 1. La primera operación es un estático de la bobina activando el calentamiento para realizar el diámetro externo del husillo. La siguiente operación es el escaneo de la longitud del diámetro. Al estar a cierta distancia se activa de nuevo la ventana de enfriamiento para realizar el proceso de temple (figura 33).

El paso 4 consta de un escaneo sin calentamiento, se mantiene activa la ventana de enfriamiento hasta realizar un estático de 10 segundos y terminar el proceso.

Durante toda la simulación esta actividad la condición frontera de radiación térmica ya que la parte interior de la pieza es hueca por lo cual en la modelación se determinó transferencia de calor por radiación en esta zona.

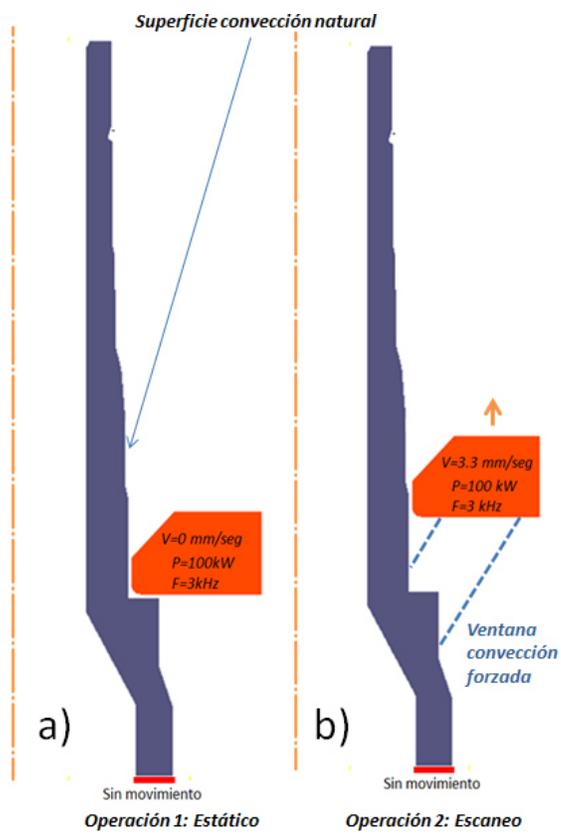


Figura 32. Paso 1 del proceso, la figura a) muestra la operación 1, calentamiento estático en la zona del radio. La figura b) muestra la operación 2 en la cual la bobina escanea la pieza calentando.

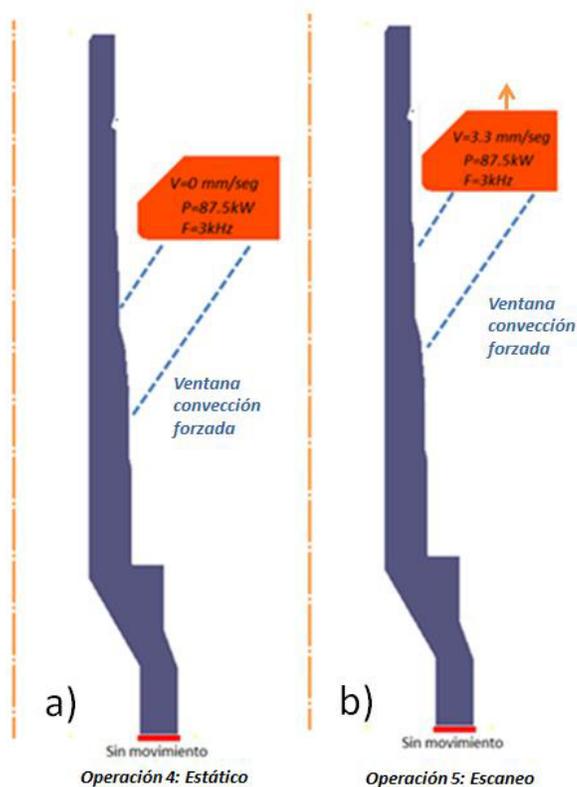


Figura 33. Paso 3 del proceso, la figura a) muestra la operación 4, calentamiento estático en la zona del diámetro externo. La figura b) muestra la operación 5 en la cual la bobina escanea la longitud del diámetro externo.

4.3. Diseño de bobinas

En general el diseño de bobinas de inducción está basado en datos empíricos los cuales se derivan de los resultados de estudios de formas geométricas muy simples. Por lo tanto, el diseño será basado en la experiencia con los cuales se realizaran las validaciones mediante simulación numérica (32).

Como lo mencionamos en el capítulo 1, existen características importantes a considerar durante el diseño de la bobina como lo son el acoplamiento, obtener la máxima transferencia de energía, el tiempo en el que se desea calentar la pieza y la técnica a emplear, entre otras. La geometría de la bobina toma un papel muy importante dentro del diseño, ya que depende de ello el campo y las líneas de flujo magnético que afectaran la zona a calentar. Generalmente se trabaja con diseños de bobinas de

múltiples vueltas o espiral, lo cual simplifica el trabajo de diseño y fabricación ya que este tipo de geometrías su mayor preocupación tiende a ser el acoplamiento con la pieza a calentar. Sin embargo la pieza de trabajo utilizada durante nuestra investigación es quien nos determinara la geometría requerida para el diseño del inductor.

En la búsqueda de mejorar el diseño de la bobina se puede tener complicaciones, ya que no solo se debe contemplar el hecho de calentar una zona deseada , sino también que nuestro diseño propuesto sea posible su fabricación y además no sea de un costo elevado ya que estas características afectarían como tal la implementación del proceso propuesto.

En el diseño de bobinas de este trabajo de investigación se realizaron 2 diseños basados en la zona localizada que se deseaba calentar para realizar el tratamiento térmico, estos diseños fueron simulados mediante FEM en 3D ya que las geometrías propuestas lo requerían para obtener resultados de campos magnéticos en diferentes planos.

La figura 34 muestra el primer diseño utilizado en nuestro trabajo de investigación, el cual fue validado mediante simulación.

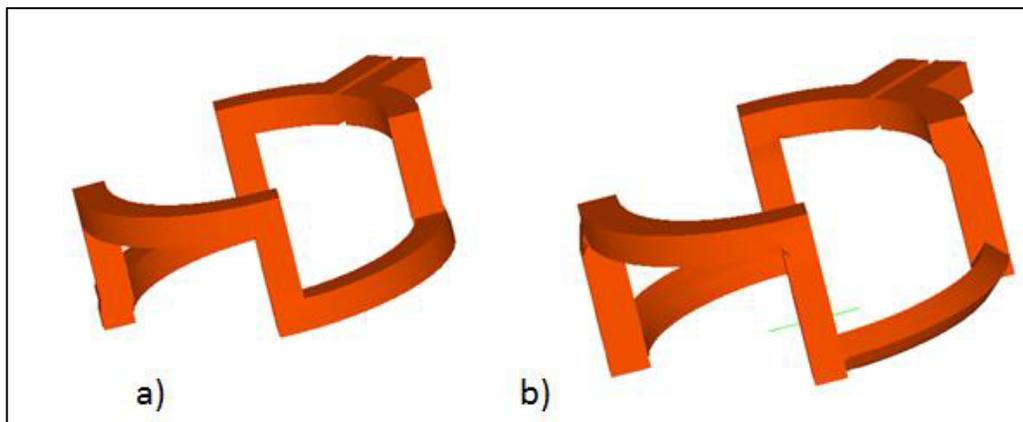


Figura 34. Diseño 1 de bobinas propuesto para técnica de estático, a) bobina para diámetro externo de husillo, b) bobina para diámetro interno de husillo.

El diseño 1 de las bobinas está basado en la longitud que se desea tratar térmicamente y un acoplamiento bobina- pieza de trabajo de 1 mm. Ambos inductores tienen el mismo concepto a diferencia de los diámetros.

La figura 35 muestra el segundo diseño de bobinas, el cual está basado en la propuesta 1 con modificaciones necesarias basadas en los resultados obtenidos durante la validación.

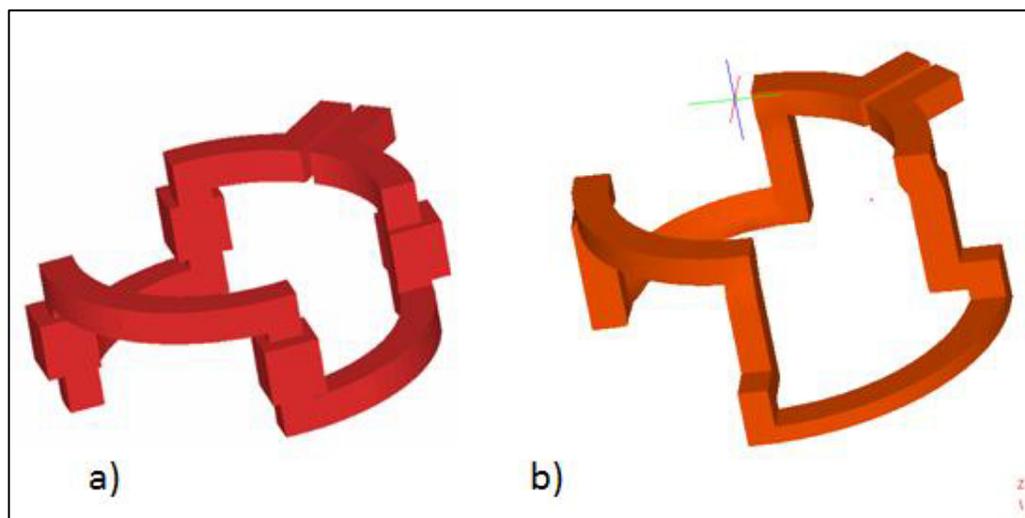


Figura 35. Diseño 2 de bobinas propuesto para técnica de estático con modificaciones basadas en resultados de la propuesta 1, a) bobina para diámetro externo de husillo, b) bobina para diámetro interno de husillo.

4.4. Proceso de temple por inducción método estático (propuesta)

4.4.2. Modelo numérico

Para el desarrollo computacional se utilizó el paquete comercial DEFORM HT. Se diseñó un modelo electromagnético-térmico 3D, para la simulación del proceso propuesto el cual consiste en el método estático. La principal complejidad de este método se atribuye a la geometría de la bobina, ya que debe realizar el calentamiento de la zona deseada sin movimiento. La tabla 5 muestra los parámetros de proceso utilizados durante la simulación y posteriormente en las pruebas físicas.

Tabla 5. Parámetros de proceso propuesto utilizados en la simulación método estático.

| paso | Potencia (kW) | Tiempo (s) | Velocidad (in/seg) | Frecuencia (kHz) |
|------|---------------|------------|--------------------|------------------|
| 1 | 200 | 14 | 0 | 10 |
| 2 | 190 | 5 | 0 | 10 |

4.4.3. Tipo de análisis

La simulación correspondiente al proceso propuesto está dividida en 4 pasos principales:

En el paso 1 se realiza un análisis electromagnético-térmico imponiendo las condiciones frontera en el husillo las cuales son la superficie que será afectada por la inducción magnética y la radiación de calor teniendo en consideración el coeficiente de emisividad para la superficie del acero. En este paso la bobina realiza un calentamiento durante un tiempo determinado y realizando un movimiento de rotación, en el proceso real este movimiento es realizado por la pieza de trabajo en este caso para la simplificación durante la simulación será asignado a la bobina como se muestra en la figura 36.

En el paso 2 al igual que en la simulación de la fase 1, se genera una ventana de enfriamiento forzado con un coeficiente de convección dado. En este caso se coloca en toda la zona del diámetro interno como se muestra en la figura 37, para lograr la transformación de fase a martensita.

En el paso 3 se realiza el calentamiento del diámetro externo bajo las mismas condiciones fronteras utilizadas en el diámetro interno (figura 38). Para la simulación de la etapa 3 y 4 del proceso propuesto se generó una base de datos independiente a la etapa 1 y 2 para acelerar el proceso de solución.

Durante la etapa 4 se genera una ventana de enfriamiento forzado en toda la zona del diámetro externo como se muestra en la figura 39.

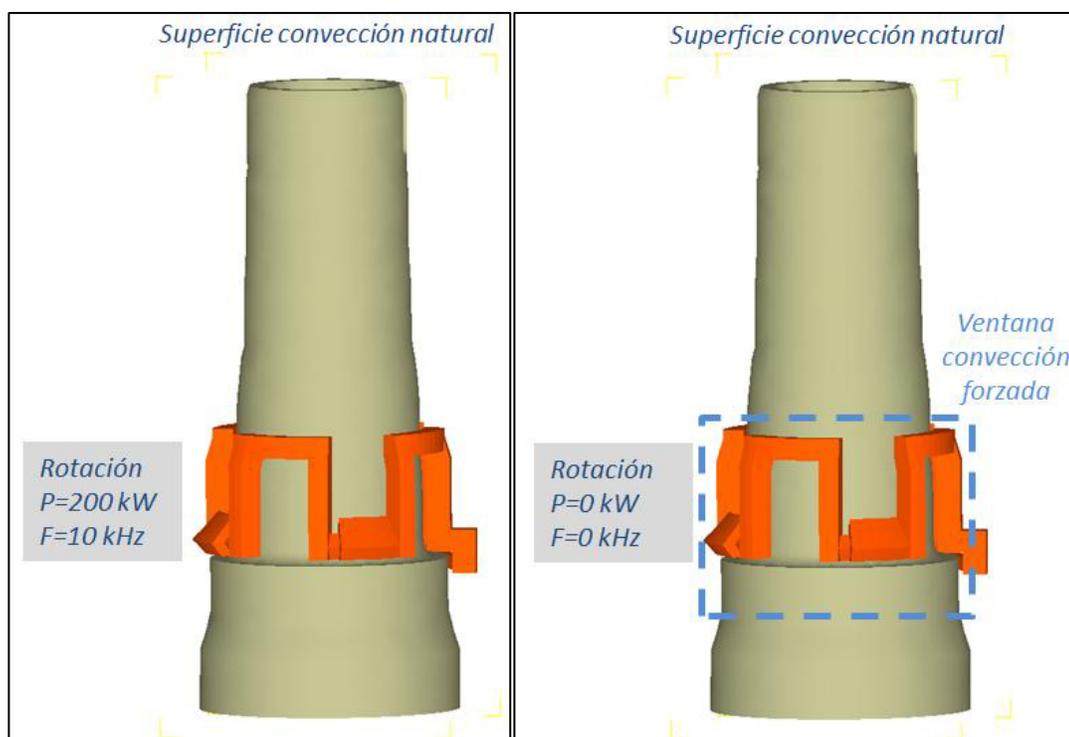


Figura 36. Paso 1 calentamiento estático diámetro interno. Figura 37. Paso 2 enfriamiento estático diámetro interno ventana de convección forzada.

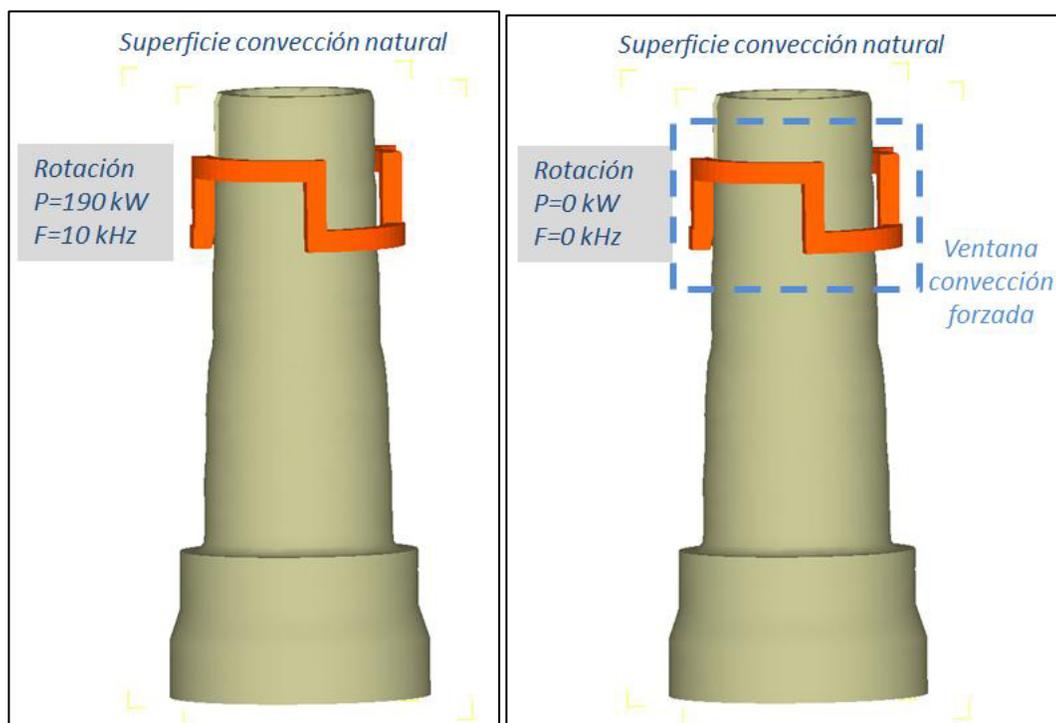


Figura 38. Paso 3 calentamiento estático diámetro externo. Figura 39. Paso 4 enfriamiento estático diámetro externo ventana de convección forzada.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos durante la simulación del proceso actual, la validación de la modelación con comparativos entre temperaturas obtenidas durante las pruebas físicas y la evaluación de microestructura.

Los resultados obtenidos durante la simulación de la fase 2 con las propuestas de diseños de bobinas para el método estático y los resultados obtenidos durante la validación físicas de los mismos.

5.2. Resultados proceso de temple por inducción método escaneo (actual)

5.2.1. Resultados pruebas físicas

En la figura 40 se muestra la temperatura superficial medida mediante la cámara termo gráfica durante el paso 1 del proceso el cual es el estático de calentamiento en la zona del hombro del husillo durante 32 segundos. La temperatura máxima alcanzada es cercana a los 1000°C provocada por el efecto borde en la zona del hombro, esto puede tener problemas de crecimiento de grano en esta zona lo cual no es deseado ya que puede ser una zona de inicio de falla.

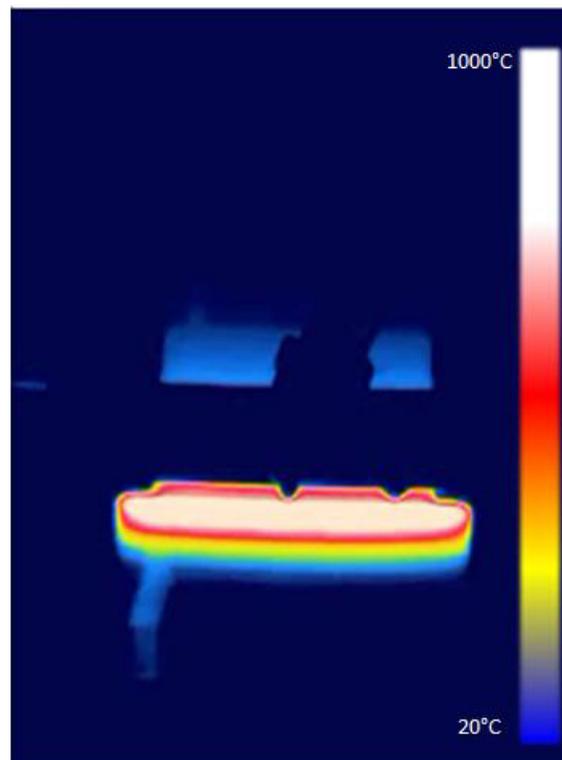


Figura 40. Temperatura superficial en zona del hombro durante el paso 1 del proceso actual.

La figura 41 muestra la temperatura superficial durante la evolución del paso 1 del proceso actual lo cual corresponde al escaneo de calentamiento del diámetro interno del husillo. La temperatura se muestra más homogénea en toda la zona del diámetro

interno estando dentro de la temperatura de transformación austenítica (AC3), previo a la activación de las duchas de temple.

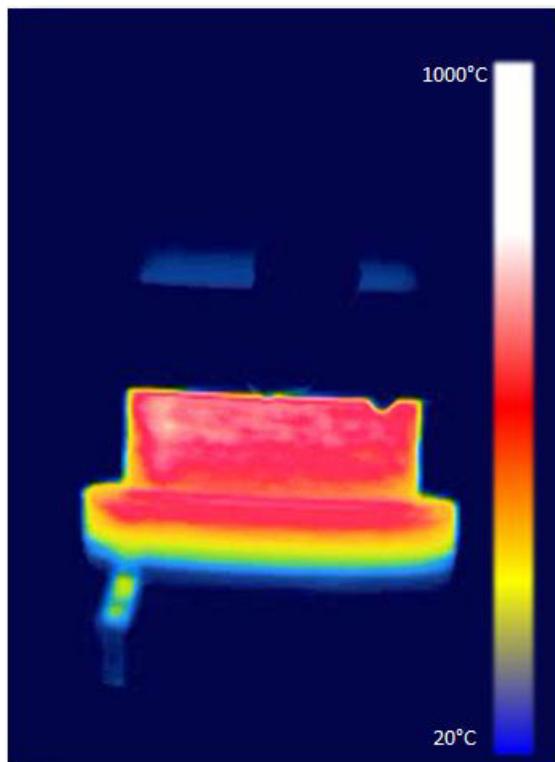


Figura 41. Temperatura superficial obtenida durante el escaneo en el diámetro interior del husillo.

Las figuras 42 y 43 muestran las temperaturas medidas mediante el proceso de calentamiento del diámetro externo del husillo. En la figura 42 se puede observar la temperatura alcanzada durante el estático de 4 segundos que realiza la bobina al iniciar el escaneo del diámetro externo. En la figura 43 podemos observar la temperatura superficial más homogénea durante el desarrollo del escaneo, recordando que las duchas de temple fueron desactivadas para lograr medir las temperaturas superficiales. En ambas figuras se puede observar como disminuye la temperatura del diámetro interno

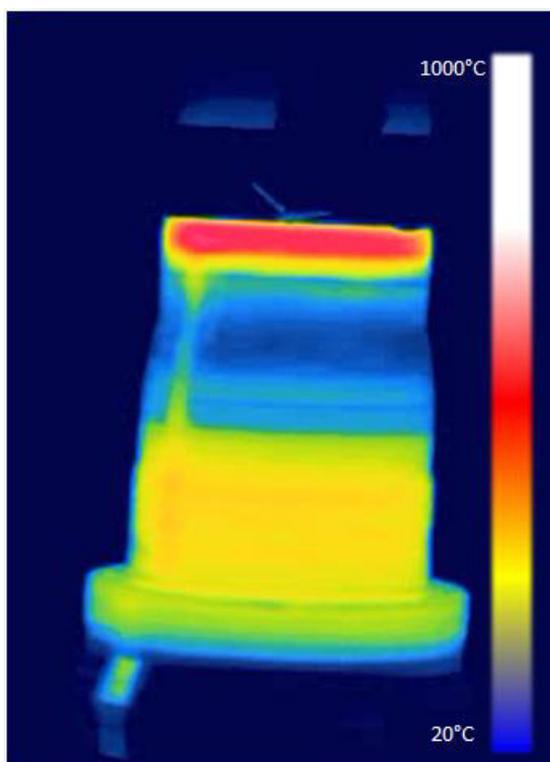


Figura 42. Temperatura superficial obtenida durante el estático de 4 segundos realizado en el diámetro externo del husillo.

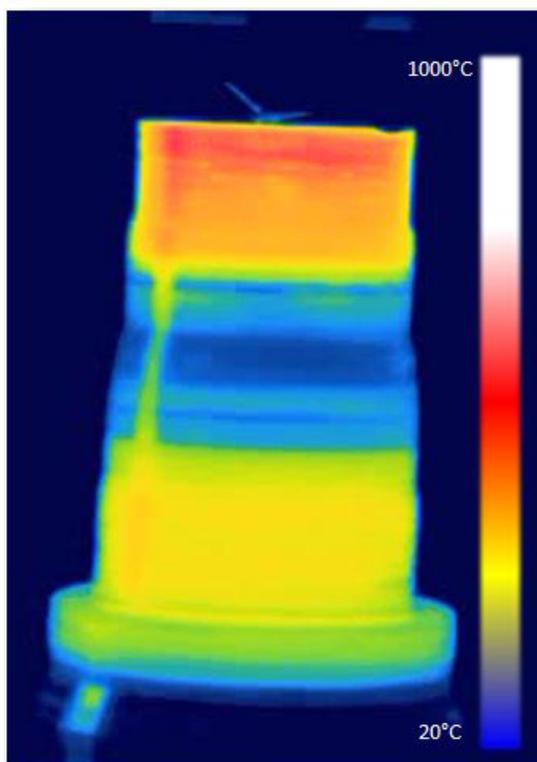


Figura 43. Temperatura superficial obtenida durante el desarrollo del escaneo del diámetro externo del husillo.

Los resultados obtenidos durante la evaluación de patrones de temple se muestran en la tabla 6, estos valores están determinados por una especificación de proceso correspondiente a la ingeniería del componente. La figura 44 muestra las zonas evaluadas. Los resultados cumplen con lo especificado en los datos del proceso. Las longitudes obtenidas en ambos diámetros son el resultado del método de escaneo en el cual refleja el barrido de calentamiento que realiza la bobina durante el proceso actual.

Tabla 6. Resultados de medición de patrones de temple obtenidos durante pruebas físicas.

| Zona | Dimensión |
|---------------------------------|-----------|
| a) Longitud en hombro | 11.6 mm |
| b) Longitud diámetro interno | 58.4 mm |
| c) Penetración en radio a 45° | 6.2 mm |
| d) longitud en diámetro externo | 53.3 mm |

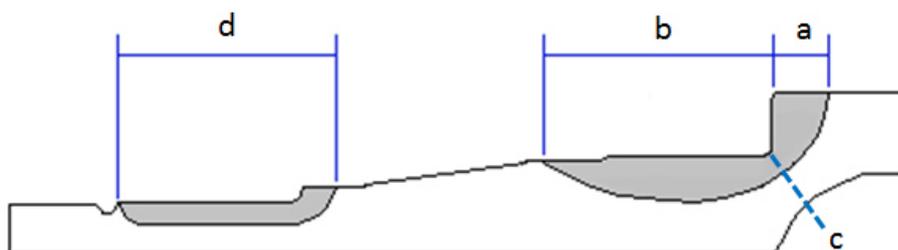


Figura 44. Diagrama para medición de patrones de temple en el husillo.

Para la obtención de resultados de dureza se realizó una medición de profundidad de temple en la zona del diámetro interno, esto con la finalidad de realizar una simulación de la dureza y comparar resultados. La figura 45 muestra la profundidad de temple medida en la zona del diámetro interno. Esta fue realizada con microdureza escala Knoop y posteriormente se realizó una conversión a la escala Rockwell C.

La figura 46 muestra la geometría de una huella obtenida durante la medición de dureza observada con el microscopio óptico a 200 X.

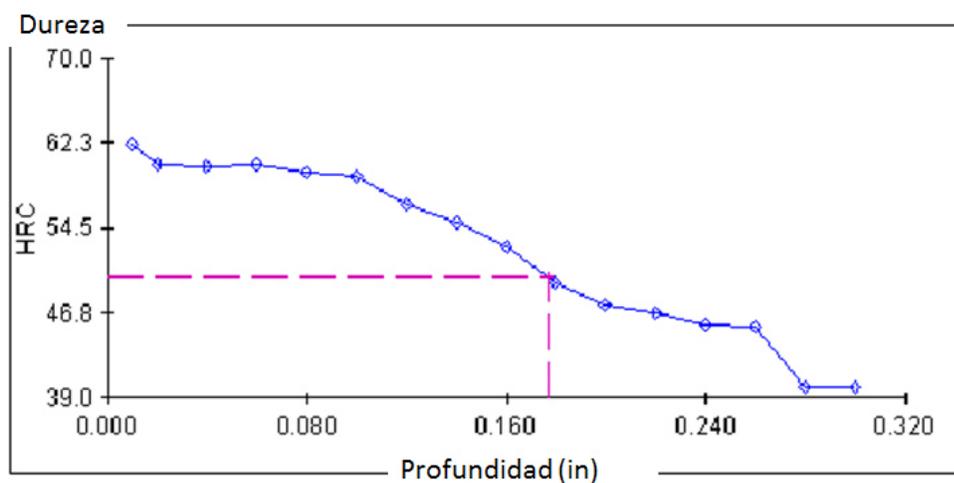


Figura 45. Profundidad de temple medida en el diámetro interno del husillo.

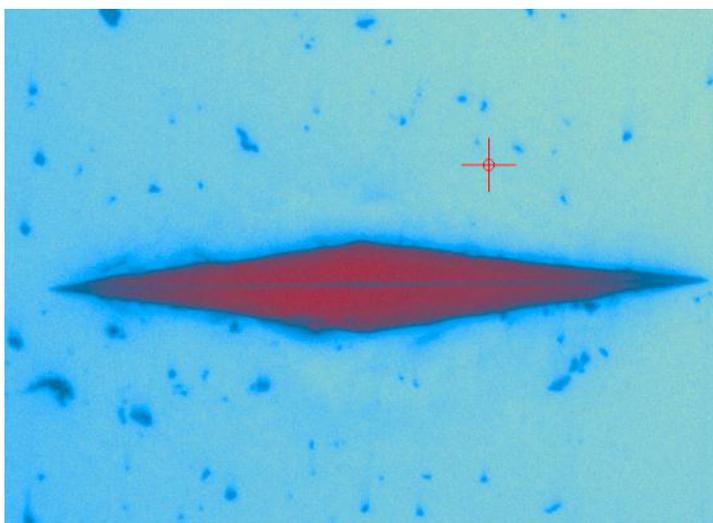


Figura 46. Huella obtenida durante la medición de dureza observada con el microscopio óptico a 200 X.

La evaluación de transformación de fase martensita se llevo a cabo con el microscopio optico a 100 X. se evaluaron ambas zonas como lo muestran las figuras 47 y 48 en las cuales podemos validar una transformación del 95 % de martensita en la superficie de ambos diametros del husillo. La fase martensita fue revelada mediante el ataque quimico con Nital al 4% de concentración y en un tiempo de 5 segundos mediante el metodo de inmersión.

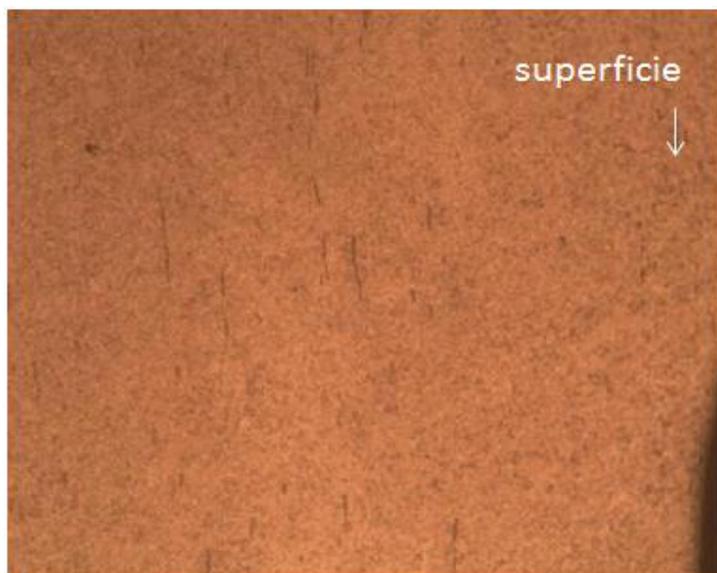


Figura 47. Microestructura diámetro interno obtenida durante el proceso actual de escaneo con 95% de martensita.



Figura 48. Microestructura diámetro externo obtenida durante el proceso actual de escaneo con 95% de martensita.

5.2.2. Resultados simulación numérica

Como mencionamos anteriormente la validación de nuestro modelo termico es a traves de la simulación. La figura 49 muestra la temperatura obtenida en el calentamineto del paso 1 en el diametro interno, en el cual podemos observar la maxima temperaura en el hombro del husillo. Esta diferencia de temperatura en el hombro con respecto al diametro interno es debido al fenomeno fisico llamada efecto borde como se meciona en el capitulo 1. Los resultados mostrados superficiales fueron obtenidos al realizar la operación de revolución al modelo 2D.

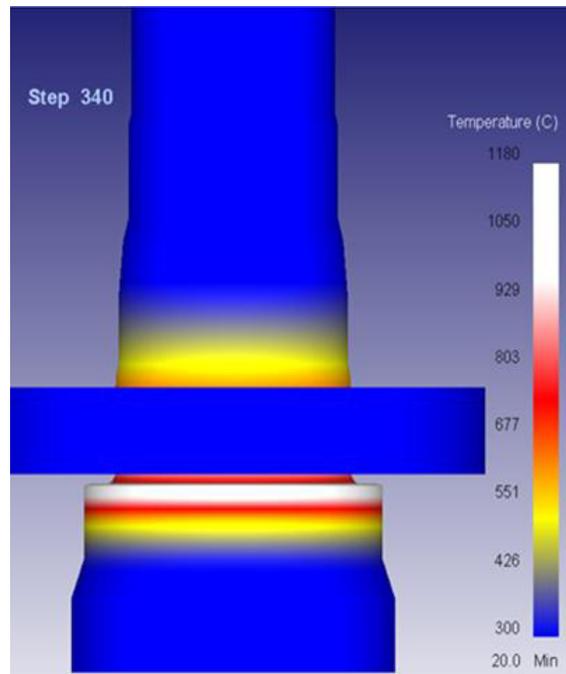


Figura 49. Temperatura obtenida durante el calentamiento del diámetro interno, mostrando la temperatura máxima en el hombro del husillo.

La figura 50 muestra la evolución de la temperatura en funcion del tiempo medida en la zona del hombro del husillo. La caída ligera de temperatura en el diametro interno durante el analisis es debido a que la simulación no se contempló el enfriamiento forzado. Temperaturas elevadas pueden provocar micro fusiones y ser causa raiz de falla.

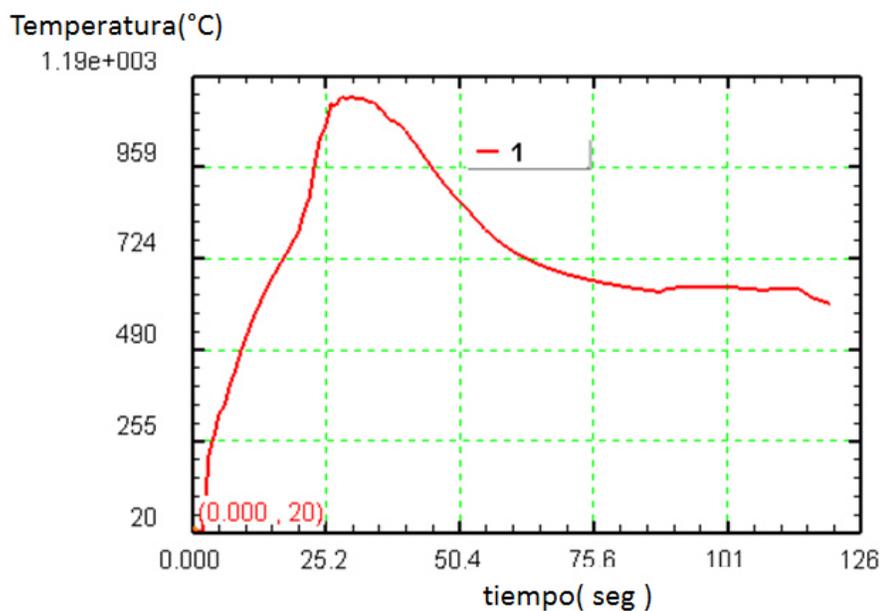


Figura 50. Evolución de la temperatura en función del tiempo en la zona del hombro del husillo.

En la figura 51 se muestra la temperatura superficial durante la evolución del paso 1 del proceso actual lo cual corresponde al escaneo de calentamiento del diámetro interno del husillo durante la simulación.

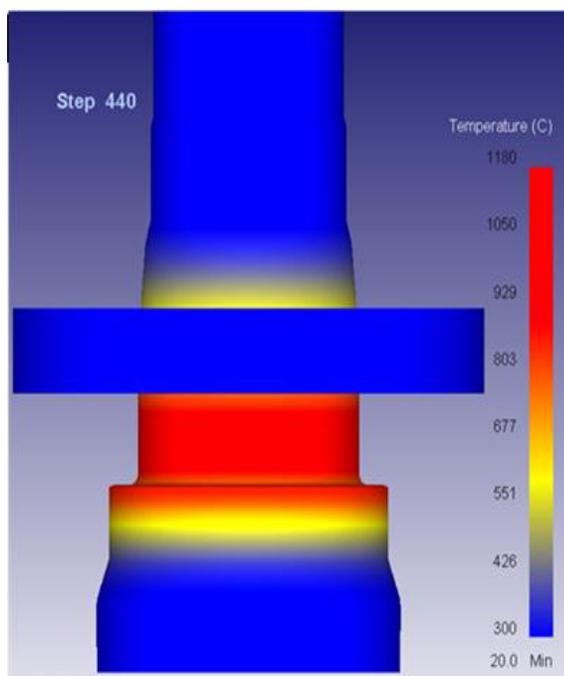


Figura 51. Temperatura superficial en función del tiempo en la zona del diámetro interno.

Se puede observar en las figuras 52 y 53 los resultados de la temperatura superficial de la simulación durante el calentamiento del diametro interno. Durante este paso del proceso se realiza un estatico al inicial el calentamiento como se muestra en la figura 5.13 y posteriormente se realiza un escaneo con longitud de 50 mm para obtener el calentamiento del diametro total.

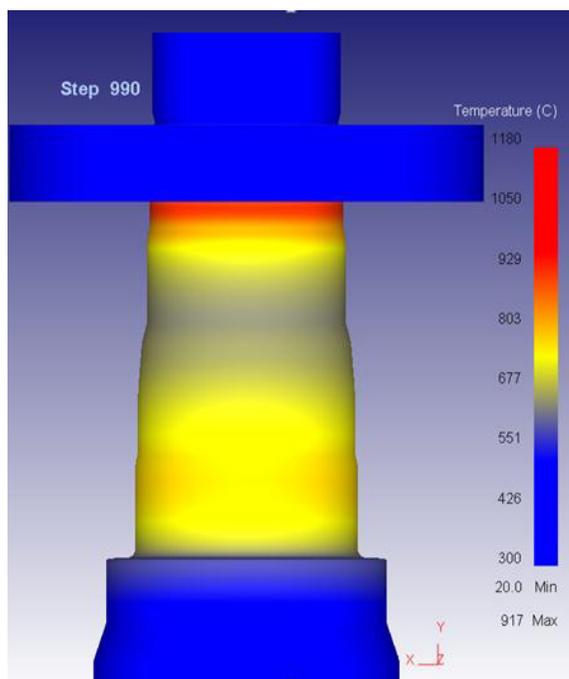


Figura 52. Temperatura superficial obtenida durante el estático de 4 segundos realizado en el diámetro externo del husillo.

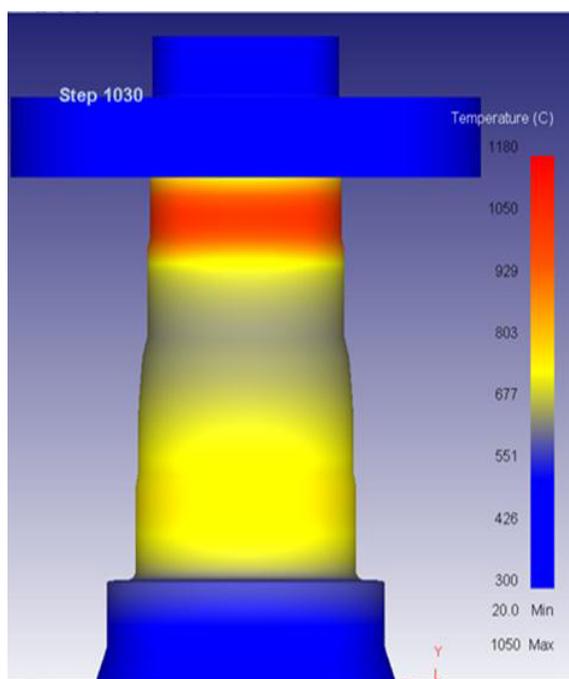


Figura 53. Temperatura superficial obtenida durante el escaneo de una longitud de 50 mm.

Los resultados de transformación de fase fueron evaluados como se muestra en la figura 54 . La transformación a fase a martensita se debe al enfriamiento forzado provocado por la ventana modelada en el proceso de simulación con un coeficiente de convección dado. Las longitudes de los patrones de temple fueron medidas como se muestra en la tabla 7 obteniendo resultados con un 90% de aproximación a los valores obtenidos durante las pruebas físicas.

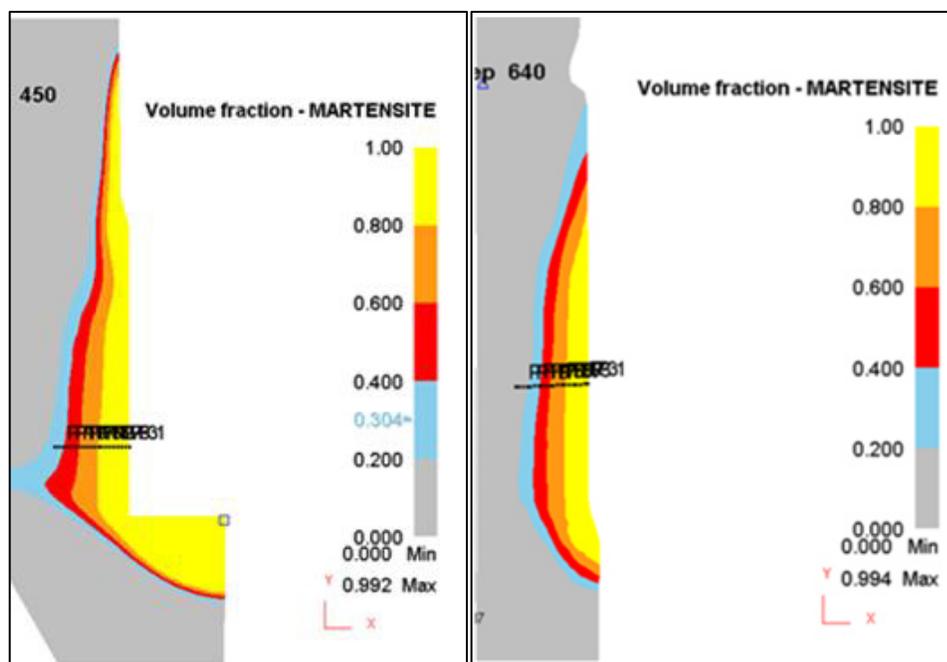


Figura 54. Transformación a fase martensita de diámetro interno (lado izq.) y diámetro externo (lado der).

Tabla 7. Resultados de medición de patrones de temple obtenidos durante la simulación

| Zona | Dimensión |
|---------------------------------|-----------|
| a) Longitud en hombro | 10.7 mm |
| b) Longitud diámetro interno | 60 mm |
| c) Penetración en radio a 45° | 5.6 mm |
| d) longitud en diámetro externo | 51 mm |

Los resultados obtenidos de dureza durante la simulación fueron obtenidos mediante el método de fracción de volumen de fase, es decir se calcula en base al % de la fracción predominante durante acorde al valor de dureza previamente determinada para cada una de las fases presentes en el material. La figura 55 muestra el gradiente de profundidad de temple obtenido en la zona del diámetro interno para la validación de resultados, esta medición fue realizada a 10 mm del hombro para tener la misma referencia que la medición física. Se obtuvo un error de 8% comparado con la medición física.

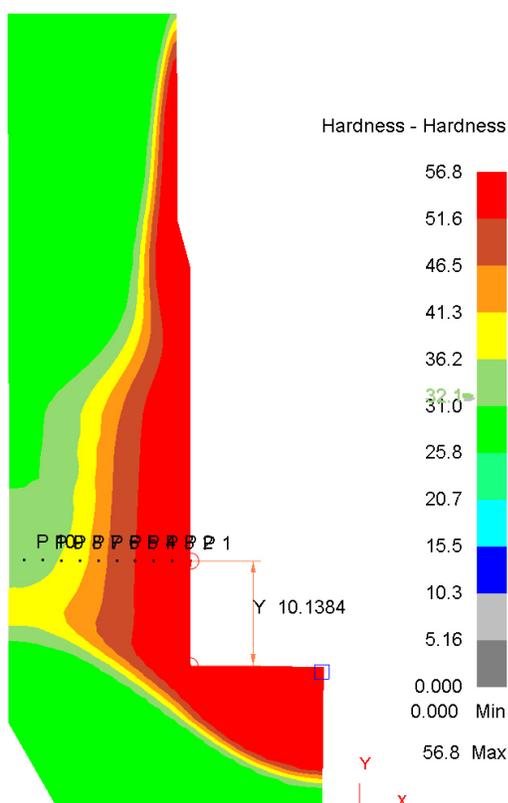


Figura 55. Simulación de dureza mediante fracción de volumen de fase.

La figura 56 muestra la grafica de profundidad de temple obtenida durante la simulación.

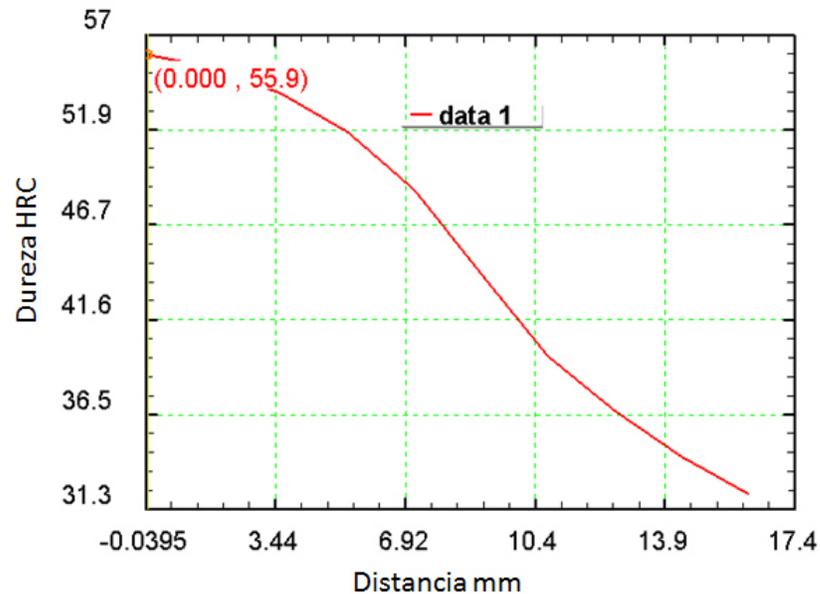


Figura 56. Grafica de profundidad de temple obtenida durante la simulación.

5.3. Resultados proceso de temple por inducción método estático (propuesta)

5.3.1. Resultados simulación numérica

Los resultados obtenidos durante la simulación con el diseño 1 para la simulación 3D en método estático se muestran en las figuras 57 y 58. Se observan las temperaturas superficiales obtenidas en la zona de ambos diámetros de balero. La figura 57 muestra el calentamiento del diámetro interno de balero en cual podemos observar la falta de calentamiento en la zona del hombro. Esta falta de calentamiento se debe al diseño de la bobina, la cual con su geometría no tiene el alcance de generar un campo magnético que afecte la zona del hombro. La figura 58 muestra las temperaturas superficiales del diámetro externo, en las cuales se puede observar una homogeneidad en toda el área deseada.

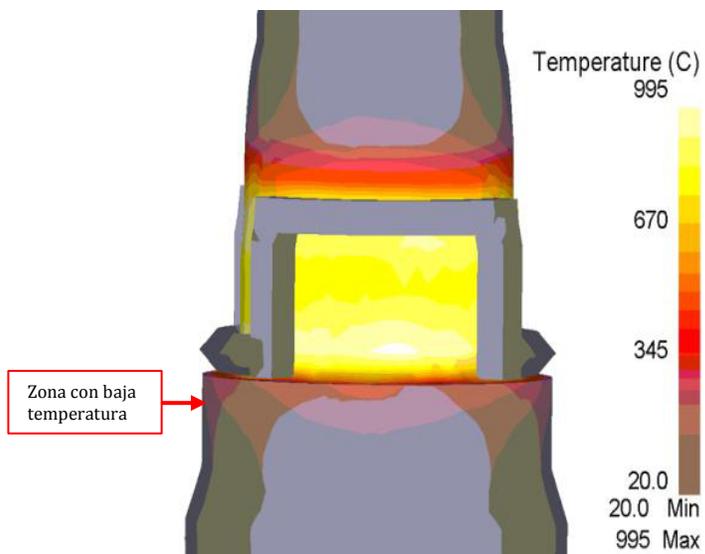


Figura 57. Temperatura superficial del diámetro interno de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático.

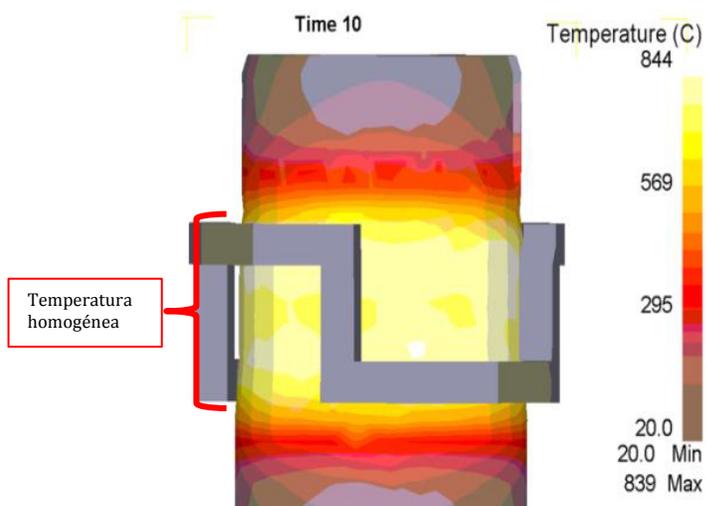


Figura 58. Temperatura superficial del diámetro externo de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático.

Continuando con el análisis de los resultados obtenidos con el diseño 1 de bobinas, se realizó un corte transversal en el programa de simulación mediante la herramienta “slice”, esto con el fin de observar las temperaturas al interior del husillo y poder predecir la profundidad de temple que se puede obtener con los parámetros utilizados en la simulación. Las figuras 59 y 60 muestran los resultados obtenidas de dicho análisis.

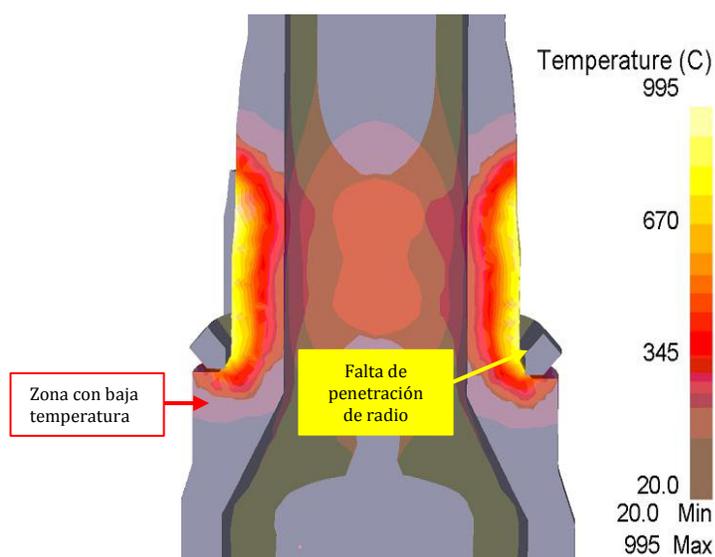


Figura 59. Temperatura interior vista con corte transversal del diámetro interno de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático.

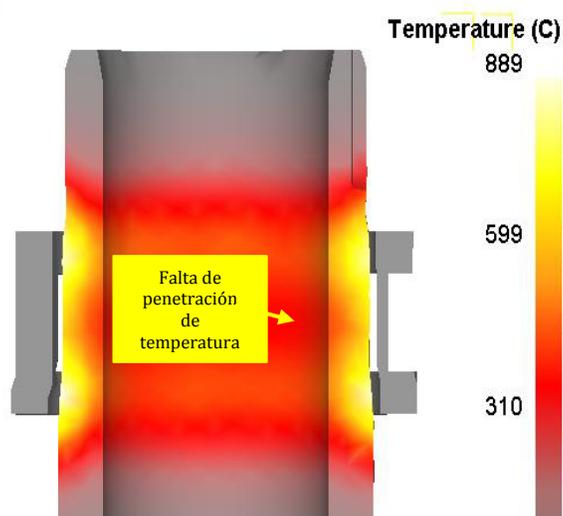


Figura 60. Temperatura interior vista con corte transversal del diámetro externo de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático.

En la figura 59 podemos observar la baja temperatura en la zona del hombro además de la falta de calentamiento en la zona del radio del husillo, en geometrías con presencia de radios es complicado inducir el campo magnético directamente en estas zonas por lo cual generalmente se logran las temperaturas deseadas por el fenómeno de conducción térmica.

En la figura 60 se observa que la temperatura a lo largo del diámetro externo no presenta una homogeneidad, la zona del centro del diámetro externo muestra una menor penetración de la temperatura con respecto a las zona superior e inferior, lo cual es debido a que la mayor geometría de la bobina está diseñada en forma de anillo, generando una mayor cantidad de inducción magnética en la zona superior e inferior dando como resultado una diferencia de penetración de temperatura.

Los resultados obtenidos con el diseño 1 de bobinas no son satisfactorios con respecto al objetivo que se busca, además de implementar el método de estático se debe cumplir con ciertas características como lo es la penetración de temple, geometría de patrones, durezas, etc. Dado que este diseño no satisface las características se tomó la decisión de modificar las geometrías de las bobinas y obtener mejores resultados.

En la figura 61 y 62 se especifican las modificaciones realizadas al diseño 2 de las bobinas basados en los resultados obtenidos en el diseño anterior. La figura 61 muestra las 2 modificaciones realizadas a la bobina del diámetro interno. Para aumentar el calentamiento en la zona del hombro se realizó la modificación en la geometría y para aumentar la penetración en el radio se agregó 10 mm de concentrador de flujo laminado. En el caso del diámetro externo se agregaron 40 mm de concentrador de flujo magnético laminado repartido en las 4 secciones paralelas a la pared del husillo como se muestra en la imagen. El uso de los concentradores de flujo magnético como se mencionó en el capítulo 1.6.1 nos ayudara a dirigir el flujo magnético a zonas específicas incrementado la temperatura de la pieza en dicha zona.

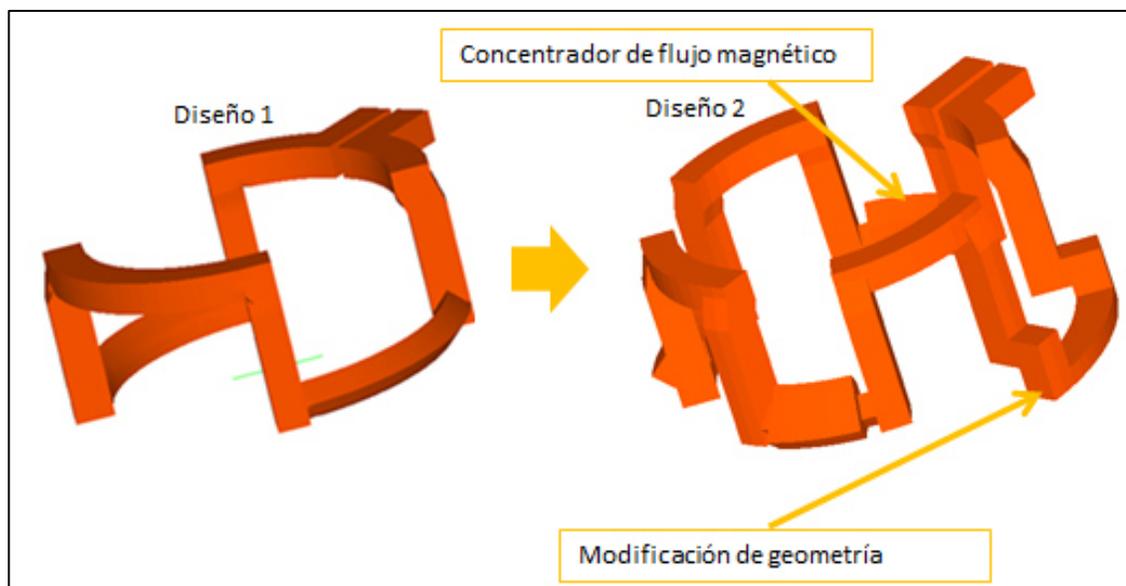


Figura 61. Modificaciones realizadas al diseño de bobina para el calentamiento del diámetro interno del husillo.

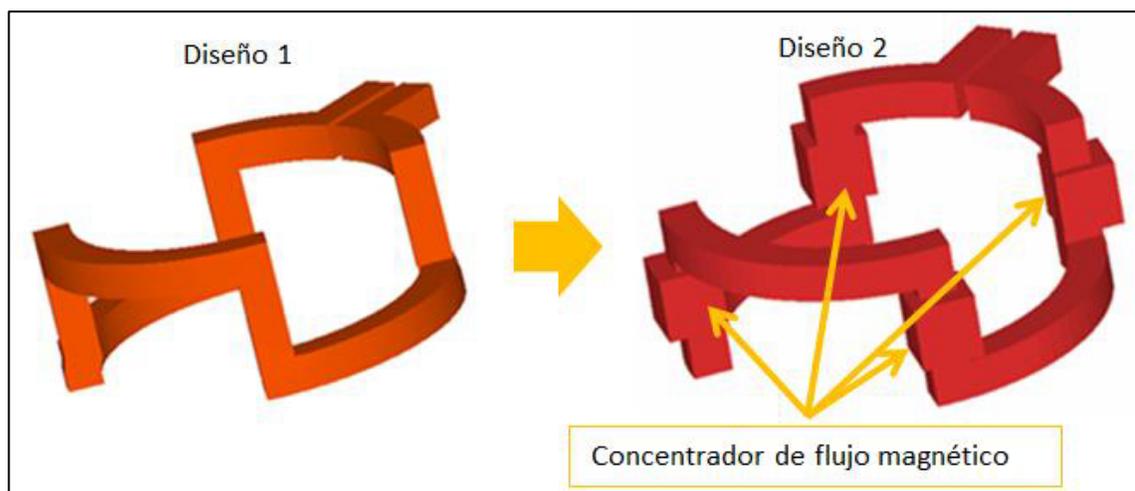


Figura 62. Modificaciones realizadas al diseño de bobina para el calentamiento del diámetro externo del husillo.

Los resultados obtenidos de temperaturas superficiales con el diseño de bobinas 2 se muestran en las figuras 63 y 64. En el calentamiento del diámetro interno mostrado en la figura 63 se observa una mejora a comparación del diseño 1 en cuanto al calentamiento de la zona del hombro. La figura 64 muestra el calentamiento del diámetro externo con la presencia de concentradores de flujo en la bobina mejorando notablemente la homogeneidad de la temperatura.

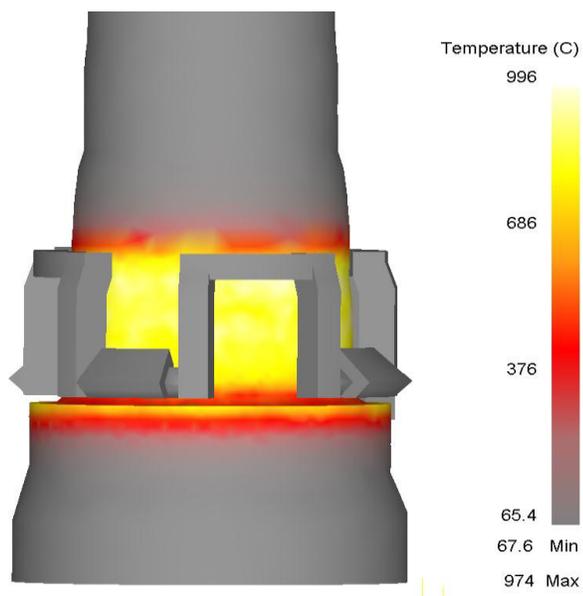


Figura 63. Temperatura superficial del diámetro interno de balero obtenida con el diseño 2 de bobina para el método estático.

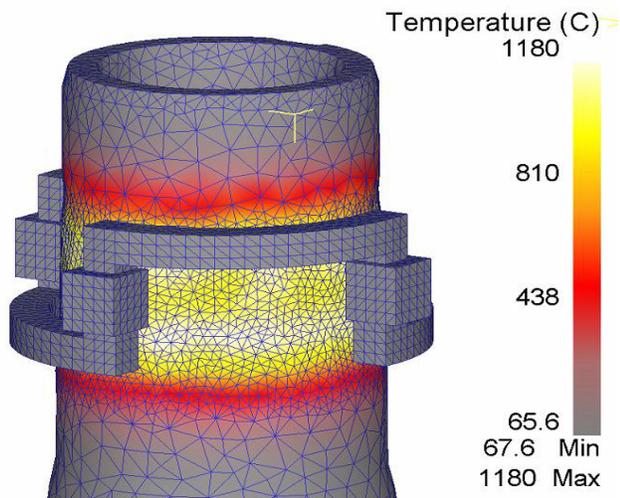


Figura 64. Temperatura superficial del diámetro externo de balero obtenida con el diseño 2 de bobina para el método estático.

La figura 65 y 66 muestran los resultados obtenidos durante la simulación de la transformación de fase martensita. El porcentaje de aproximación comparándolo con la parte física es de 90%.

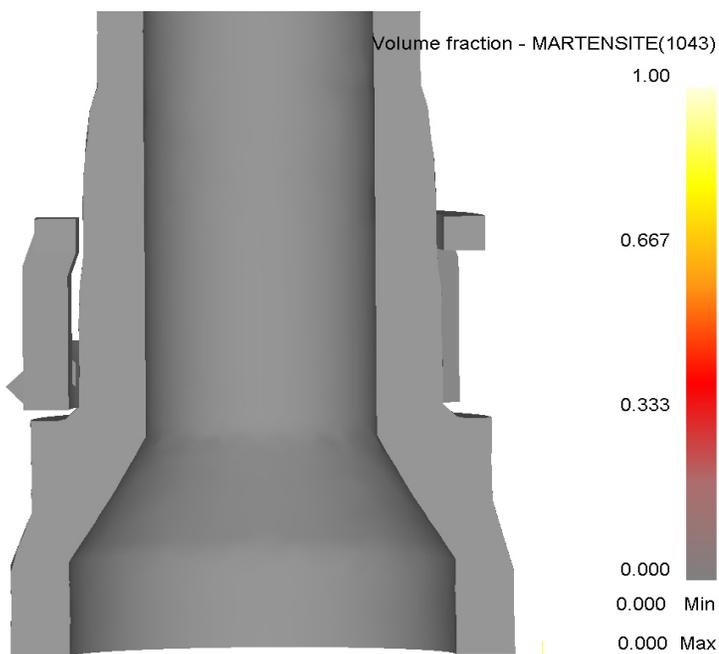


Figura 65. Resultados de transformación de fase martensita en diámetro interno.

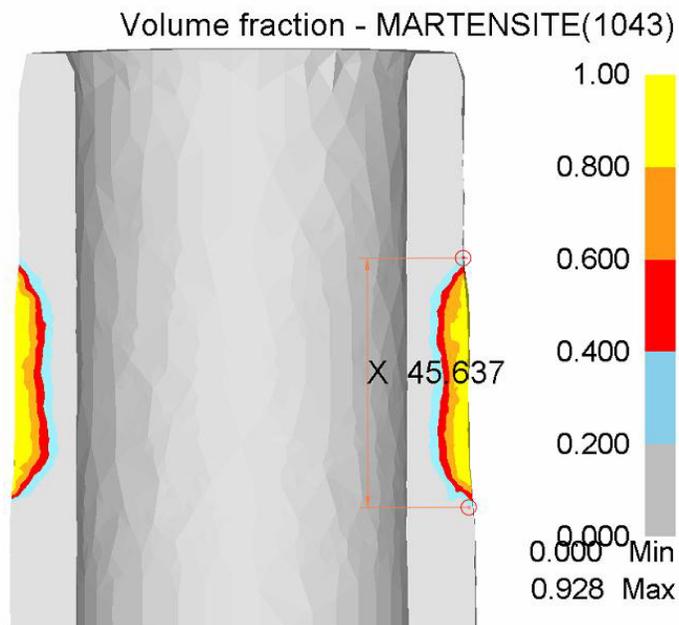


Figura 66. Resultados de transformación de fase martensita en diámetro externo.

En base a los resultados obtenidos mediante la simulación utilizando el diseño de bobinas 2 y la experiencia en el campo de diseño y desarrollo de procesos de calentamiento mediante inducción de GH Induction, se decidió fabricar las bobinas para realizar las pruebas físicas y validar los resultados de nuestros modelos.

5.3.2. Resultados pruebas físicas diseño de bobinas 2

Para la realización de las pruebas físicas la figura 67 muestra el diseño del área de temple, para el cual se utilizaron 4 duchas de geometría cuadrada distribuidas a 90° alrededor del husillo.

Se utilizó un equipo de inducción de laboratorio, una fuente de poder de 250 kW y 10 kHz. Este equipo es adaptable a las necesidades de la prueba requerida. Durante las pruebas no se contó con cámara termografía con rangos tan altos de temperatura por lo cual la validación será basada en los patrones de temple y la transformación a martensita.

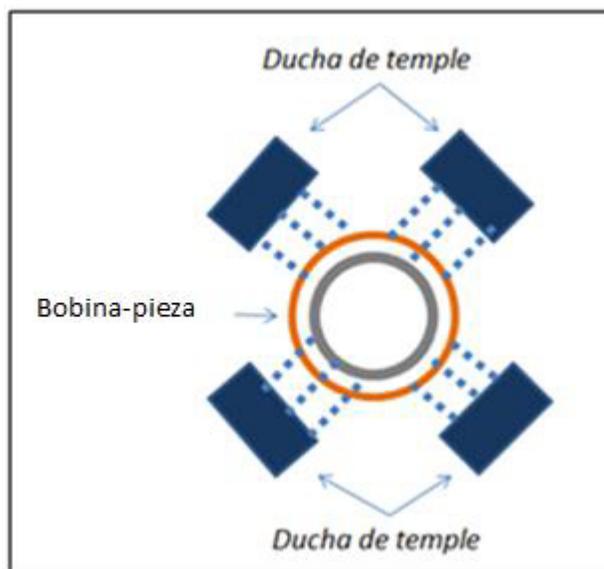


Figura 67. Vista superior del diseño del área de temple con 4 duchas y en el centro la bobina con el husillo.

Las figuras 68 y 69 muestran el proceso de calentamiento en tiempo real durante las pruebas físicas. La figura 68 muestra el calentamiento del diámetro interno después de 14 segundos. La figura 69 muestra el calentamiento del diámetro externo después de 5 segundos.



Figura 68. Calentamiento del diámetro interno después de 14 segundos.



Figura 69. Calentamiento del diámetro externo después de 5 segundos.

Los resultados obtenidos durante la evaluación de patrones de temple se muestran en la tabla 8, estos patrones se obtuvieron durante las pruebas físicas con el diseño de bobinas 2.

Tabla 8. Resultados de medición de patrones de temple obtenidos durante las pruebas físicas.

| Zona | Dimensión |
|-------------------------------|-----------|
| a) Longitud en hombro | 9.2 mm |
| b) Longitud diámetro interno | 56.7 mm |
| c) Penetración en radio a 45° | 4.6 mm |
| d) Longitud diámetro externo | 46.6 mm |

La figura 70 muestra los patrones revelados con Nital con 4% de concentración. La modificación del diseño de bobinas obtuvo como resultado un cambio en la geometría de los patrones, los resultados cumple con la especificación de proceso.

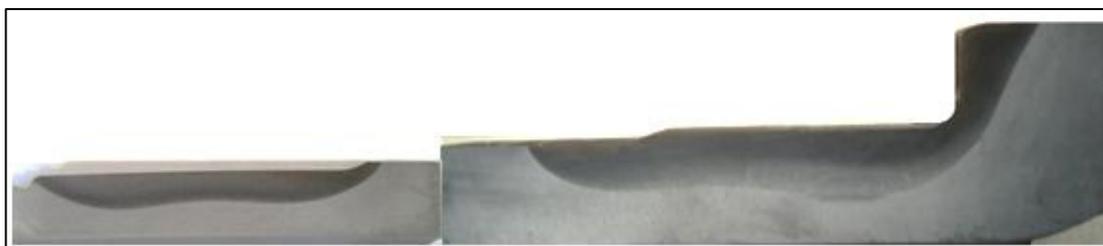


Figura 70. Patrones de temple obtenidos con el diseño de bobinas 2.

Los patrones de temple obtenidos con el diseño de bobinas 2 demuestran que las modificaciones realizadas arrojaron resultados satisfactorios. En el caso del diámetro interno al incluir los concentradores de flujo en el radio y el cambio de geometría en la zona del hombro se obtuvo un incremento en las temperaturas en ambas zonas y se alcanzaron temperaturas de austenizado.

5.4. Conclusiones

Fue posible el desarrollo de un modelo para la simulación del proceso de calentamiento por inducción para componentes automotrices con geometría compleja.

La diferencia de temperatura entre la zona del hombro y la pared del husillo durante el calentamiento del diámetro interno es debido al efecto borde el cual genera una mayor densidad de flujo magnético en la zona del hombro provocando una temperatura mayor. Este fenómeno trajo como consecuencia el crecimiento de grano en la zona del hombro ASTM #3.

El análisis comparativo de las temperaturas medidas durante la fase 1 del proyecto comparado con las obtenidas durante el proceso de simulación arroja un 6% de error al comparar la temperatura máxima superficial en la zona del hombro, lo cual da una confiabilidad mayor al 90% de aproximación a nuestro modelo de simulación.

Los patrones de temple obtenidos durante la fase 1 cumplen con lo especificado en el requerimiento de propiedades del husillo. Al comparar las dimensiones obtenidas durante la simulación contra lo medido físicamente obtuvimos un 8% de error. En la simulación de penetración de temple se obtuvieron resultados de dureza en el rango de 2-3 % de error comparando los resultados obtenidos en la muestra analizada con el equipo de Microdureza.

Los patrones de temple obtenidos con el diseño de bobina estático presentan una geometría más semejante a la especificada para el proceso debido a la presencia de concentradores de flujo se consiguió eliminar el exceso de calentamiento en la zona de

la pared del diámetro interno homogenizando la penetración de temple por toda la longitud del mismo.

Los tiempos de cómputo en modelos de simulación 3D con movimiento son muy prolongados debido a la cantidad de ecuaciones a resolver tanto electromagnéticas como térmicas, por lo cual lo ideal sería modelar los problemas en 2D si las geometrías de la bobina y la pieza lo permiten

Este desarrollo computacional permite la modificación de los parámetros claves del modelo con el fin de estudiar el comportamiento de las temperaturas superficiales con en piezas de trabajo con geometrías complejas. Es posible modificar la potencia, frecuencia y velocidades de escaneo sin modificar las propiedades del material.

El uso de concentradores de flujo magnético en el diseño de bobinas aumenta de manera significativa la eficiencia de la bobina ya que se concentra una mayor densidad de flujo magnético sobre la pieza alcanzando las temperaturas de austenizado en tiempos más reducidos.

Como contribución principal esta modelación validó el diseño de bobinas con las cuales se logró obtener una disminución en el tiempo ciclo del proceso del husillo de 36.4% y un ahorro en la energía consumida de 22.3% medida en la unidad de kW-segundo.

LISTADO DE SÍMBOLO

B

b Vector de Burgers.

B Inducción magnética

B Densidad flujo magnético

C

c_p Calor específico a presión constante

C Matriz de capacitancia

D

D Densidad flujo eléctrico

E

E Intensidad campo eléctrico

F

f Frecuencia de trabajo (Hz)

H

H Intensidad de campo magnético

I

I Corriente eléctrica

J

J Densidad de corriente

K

k Conductividad térmica

k Constante en el modelo JMAK

K Matriz de rigidez

N

n Exponente de JMAK

M

M_s Inicio transformación Martensita

P

P Potencia de trabajo

P_h Pérdida por histéresis

Q

Q Energía de activación

Q Flujo de calor

R

R Resistencia eléctrica

T

T Temperatura

t Tiempo

V

V Voltaje

X

X Fracción recristalizada

Símbolos griegos

ρ resistividad eléctrica

ρ_c Densidad de carga eléctrica

ε Permitividad relativa

σ_{ij} Tensor de esfuerzos

σ Conductividad eléctrica

μ Permeabilidad magnética relativa

μ_0 Permeabilidad del vacío

BIBLIOGRAFIA

1. INEGI. *La industria automotriz en México 2014. Serie estadísticas sectoriales. 2014. (2014), Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA).*
2. **S. Zinn, S. L. Semiatin.** *Elements of Induction Heating: Design Control and Applications.* pág. 2.
3. **DAVIES, J. SIMPSON, P.** “*Induction Heating Handbook*”.
4. *Teaching Faraday’s law of electromagnetic induction in an introductory.* **Igal Galili, Dov Kaplan, and Yaron Lehav.**
5. **Julio Astigarraga Urquiza, José Luis Aguirre Ormaza.** *Hornos industriales de inducción: teoría, cálculo y aplicaciones.*
6. **Rudnev, Valery, Loveless, Don y Cook, Raymond.** *Hadnbook of Induction Heating.*
7. **Haimbaugh, Richard E.** *Practical Induction Heat Treating.*
8. **Gonzalez, Winder.** Diseño y construcción de bobina de calentamiento por inducción para fundición de titanio.
9. **Alba Cuenca, Mariano.** *Preestudio para el desarrollo de un equipo de calentamiento por inducción.*
10. **Zinn, S. y L. Semiatin, S.** *Elements of induction heating design, control and applications.*
11. **Cheng, K.W.E.** Thermal Impacts of Electromagnetic Proximity Effects in Induction Cooking System With Distributed Planar Multicoils. [En línea]
12. *Little Secrets for a Lasting Impression on Coil Life – Part 5: Other factors affecting coil turn edge effects.* **Rudnev, vALERY.**
13. **Rudnev, V. y Loveless, D.** *Handbook of Induction Heating , 2003.*
14. **Reference, ASM Ready.** *Electrical and magnetic properties of metals.*
15. —. *Electrical and Magnetic Properties of Metals.*
16. **Comercial, GH GROUP Departamentos de Formación y.** Calentamiento por Inducción Aspectos Técnicos y Comerciales.
17. *Induction Heating System Topology Review.* **Semiconductor, FAIRCHILD.**
18. **Haimbaugh, Richard E.** *Practical Induction Heat Treating.*

19. *Coil design and fabrication: basic design and modifications.* **Stanley, Zinn y L., Semiatin.**
20. *An objective assessment of magnetic flux concentrators.* **Rudnev, Valery.**
21. **Semiatin, D.U. Ferrer and S.L.** *Fundamentals of Modelling for Metals Processing.*
22. **F.E. Cellier, E. Kofman.** *Continuous system simulation.*
23. **A.M Law, W. D. Kelton.** *Simulation modeling and analysis.* s.l. : McGraw Hill.
24. **C.F. Gerald, P.O Wheatley.** *Applied numerical analysis.*
25. **Chung, C.A.** *Simulation modelling handbook.*
26. **K.H. Huebner, E.A Thornton y T.G. Byrom.** *The finite element method for engineers.*
27. **R.W. Lewis, P. Nithiasaru, K.N. Seetharamu.** *Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow.*
28. **K.H. Huebner, EA. Thornton y T.G. Byrom " The finite element method for engineers".**
29. *Simulación de un tratamiento térmico mediante elementos finitos.* **Maria Gimenez, Albert Llobet, Maria Dolors Riera.** s.l. : TRATERMAT, 2013.
30. *Process design for inductive surface hardening using an inverse numerical approach.* **Dirk Schlesselmann, Zhuo Yu, Christian Krause, Vyacheslav Boyarkin, Bernard Nacke.**
31. **D. Henwood, Javier Bonet.** *Finite elements: A gentle introduction.*
32. **Katsikadelis, J. T.** *Boundary elements theory and applications.* s.l. : ELSEVIER.
33. **Sokolnikoff, I.** *Mathematical theory of elasticity.* s.l. : Mc. GrawHill.
34. **Brebbia, C.A.** *Boundary element techniques, computational mechanics publications, southampton.*
35. **C.A. Brebbia, Telles, J.C.F. y Wrobel.** *Boundary element techniques, computational mechanichs publications, southampton.*
36. **Becker, A.A.** *The boundary element method in engineering.* s.l. : Mc Graw Hill, 1992.
37. **Zhou, G. Chen y J.** *Boundary Element Methods, Academic Press.*
38. **Quek, G.R. Liu y S.S.** *The finite element method. A practical approach.*
39. **Taylor, O.C. Zienkiewicz y R.L.** *The finite element method, Vol. 1: The basis.*

40. **David, H.** *Fundamentals of finite element analysis.*
41. **Reddy, J.N.** *An introduction to the finite element method.*
42. **Damian, Petrila T. y T.** *Basics of fluid mechanics and introduction to.* s.l. : Springer, 2005.
43. *The finite element method after twenty-five years: A personal.* **Clough, R.W.** Vol. Computers and Structures Vol. 12 .
44. **David, H.** *Fundamentals of finite element analysis.* s.l. : McGraw Hill, 2004.

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Modelo de husillo..... | 4 |
| Figura 2. Sistema básico de calentamiento por inducción. | 8 |
| Figura 3. Sistema básico de un transformador. | 9 |
| Figura 4. Grados de efecto piel en función de la permeabilidad magnética. | 13 |
| Figura 5. Efecto de proximidad y distribución de corriente en una bobina. | 15 |
| Figura 6. Efecto de proximidad en una bobina no asimétrica..... | 15 |
| Figura 7. Densidad de campo magnético en un anillo rectangular (a) y redondo (b). | 17 |
| Figura 8. Efecto negativo del efecto anillo en el calentamiento de paredes internas. | 18 |
| Figura 9. Eliminación del efecto anillo mediante el uso de concentradores de flujo magnético. | 18 |
| Figura 10. Sistema de tratamiento térmico por inducción..... | 21 |
| Figura 11. Diagrama de bloques de las fuentes de alimentación modernas de alta frecuencia. | 23 |
| Figura 12. Patrón de calentamiento producido en una barra colocada fuera del centro de la bobina..... | 28 |
| Figura 13. Bobina con cancelación de campo magnético por falta de bucle (izquierdo), bobina con bucle para evitar cancelación. | 29 |
| Figura 14. Flujos de corriente inducida en la pieza..... | 30 |
| Figura 15. Bobina de flujo transversal. | 31 |
| Figura 16. Configuraciones típicas de bobinas a) multi espiras, b) anillo, c) anillo multi puestos, d) multi espiras multi puestos. | 32 |
| Figura 17. Efecto de concentración de un núcleo permeable en un campo magnético. | 34 |
| Figura 18. Distribución de corriente con el uso de concentradores de flujo magnético. | 35 |
| Figura 19. Representación de la ecuación JMAK en función del tiempo para dos temperaturas..... | 48 |
| Figura 20. Curva TTT de un acero. Se indica los tiempos de inicio y final de transformación a una temperatura T_n | 49 |
| Figura 21. Módulo de Young calculado mediante JMATpro del acero AISI 1043. | 50 |
| Figura 22. Conductividad térmica calculada mediante JMATpro del acero AISI 1043. | 51 |
| Figura 23. Resistividad eléctrica calculada mediante JMATpro del acero AISI 1043. | 51 |
| Figura 24. Conductividad eléctrica calculada mediante JMATpro del acero AISI 1043..... | 52 |
| Figura 25. Modelo 2D con 4 etapas del sistema..... | 53 |
| Figura 26. Discretización por diferencias finitas (a) y por elemento finito (b. | 61 |
| Figura 27. Aplicaciones del método de aproximación directa. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 28. Temperatura superficial obtenida durante el calentamiento del diámetro interior (izq.), temperatura superficial obtenida durante el calentamiento del diámetro exterior (der)..... | 70 |
| Figura 29. Patrones de temple (fase martensita) revelados mediante ataque químico de HNO ₃ al 25%, lado izquierdo diámetro externo, lado derecho diámetro interno. | 71 |
| Figura 30. Corte transversal de diámetro interno para medición de dureza..... | 71 |
| Figura 31. Geometrías de husillo (gris) y bobina (naranja)..... | 73 |
| Figura 32. Paso 1 del proceso, la figura a) muestra la operación 1, calentamiento estático en la zona del radio. La figura b) muestra la operación 2 en la cual la bobina escanea la pieza calentando. | 75 |
| Figura 33. Paso 3 del proceso, la figura a) muestra la operación 4, calentamiento estático en la zona del diámetro externo. La figura b) muestra la operación 5 en la cual la bobina escanea la longitud del diámetro externo..... | 76 |
| Figura 34. Diseño 1 de bobinas propuesto para técnica de estático, a) bobina para diámetro externo de husillo, b) bobina para diámetro interno de husillo..... | 77 |
| Figura 35. Diseño 2 de bobinas propuesto para técnica de estático con modificaciones basadas en resultados de la propuesta 1, a) bobina para diámetro externo de husillo, b) bobina para diámetro interno de husillo..... | 78 |
| Figura 36. Paso 1 calentamiento estático diámetro interno. Figura 37. Paso 2 enfriamiento estático diámetro interno ventana de convección forzada..... | 80 |
| Figura 38. Paso 3 calentamiento estático diámetro externo. Figura 39. Paso 4 enfriamiento estático diámetro externo ventana de convección forzada. | 80 |
| Figura 40. Temperatura superficial en zona del hombro durante el paso 1 del proceso actual. | 82 |
| Figura 41. Temperatura superficial obtenida durante el escaneo en el diámetro interior del husillo..... | 83 |
| Figura 42. Temperatura superficial obtenida durante el estático de 4 segundos realizado en el diámetro externo del husillo. | 84 |
| Figura 43. Temperatura superficial obtenida durante el desarrollo del escaneo del diámetro externo del husillo. | 84 |
| Figura 44. Diagrama para medición de patrones de temple en el husillo. | 85 |
| Figura 45. Profundidad de temple medida en el diámetro interno del husillo. | 86 |
| Figura 46. Huella obtenida durante la medición de dureza observada con el microscopio óptico a 200 X..... | 86 |
| Figura 47. Microestructura diámetro interno obtenida durante el proceso actual de escaneo con 95% de martensita. | 87 |
| Figura 48. Microestructura diámetro externo obtenida durante el proceso actual de escaneo con 95% de martensita. | 87 |
| Figura 49. Temperatura obtenida durante el calentamiento del diámetro interno, mostrando la temperatura máxima en el hombro del husillo..... | 88 |
| Figura 50. Evolución de la temperatura en función del tiempo en la zona del hombro del husillo. | 89 |
| Figura 51. Temperatura superficial en función del tiempo en la zona del diámetro interno. | 89 |

| | |
|---|-----|
| Figura 52. Temperatura superficial obtenida durante el estático de 4 segundos realizado en el diámetro externo del husillo. | 90 |
| Figura 53. Temperatura superficial obtenida durante el escaneo de una longitud de 50 mm. | 90 |
| Figura 54. Transformación a fase martensita de diámetro interno (lado izq.) y diámetro externo (lado der). | 91 |
| Figura 55. Simulación de dureza mediante fracción de volumen de fase. | 92 |
| Figura 56. Grafica de profundidad de temple obtenida durante la simulación. | 93 |
| Figura 57. Temperatura superficial del diámetro interno de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático. | 94 |
| Figura 58. Temperatura superficial del diámetro externo de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático. | 94 |
| Figura 59. Temperatura interior vista con corte transversal del diámetro interno de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático. | 95 |
| Figura 60. Temperatura interior vista con corte transversal del diámetro externo de balero obtenida con el diseño 1 de bobina para el método estático. | 95 |
| Figura 61. Modificaciones realizadas al diseño de bobina para el calentamiento del diámetro interno del husillo. | 97 |
| Figura 62. Modificaciones realizadas al diseño de bobina para el calentamiento del diámetro externo del husillo. | 97 |
| Figura 63. Temperatura superficial del diámetro interno de balero obtenida con el diseño 2 de bobina para el método estático. | 98 |
| Figura 64. Temperatura superficial del diámetro externo de balero obtenida con el diseño 2 de bobina para el método estático. | 99 |
| Figura 65. Resultados de transformación de fase martensita en diámetro interno. | 99 |
| Figura 66. Resultados de transformación de fase martensita en diámetro externo. | 100 |
| Figura 67. Vista superior del diseño del área de temple con 4 duchas y en el centro la bobina con el husillo. | 101 |
| Figura 68. Calentamiento del diámetro interno después de 14 segundos. | 102 |
| Figura 69. Calentamiento del diámetro externo después de 5 segundos. | 102 |
| Figura 70. Patrones de temple obtenidos con el diseño de bobinas 2. | 103 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Aplicaciones del calentamiento por inducción. | 7 |
| Tabla 2. Resistividad eléctrica de materiales comunes. | 20 |
| Tabla 3. Parámetros de proceso propuesto utilizados en la simulación proceso actual. | 71 |
| Tabla 4. Parámetros de proceso propuesto utilizados en la simulación proceso propuesto. | 72 |
| Tabla 5. Parámetros de proceso propuesto utilizados en la simulación método estático. | 79 |