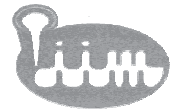




**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLAS DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS**

DEPARTAMENTO DE METALURGIA FISICA

**DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE ENERGIA MAGNETICA
UTILIZADO EN TEMPLES SUPERFICIALES POR INDUCCION**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES**

PRESENTA:

ING. MIGUEL EQUIHUA LEON

ASESOR: Dr. RAFAEL GARCIA HERNANDEZ

CO ASESOR: M. I. JAIME GARCIA VARGAS

Morelia, Michoacán de Ocampo. Febrero 2011

Agradecimientos

Gracias Señor porque me creaste como un ser afortunado.

Afortunado por la familia en que nací, donde admiré de mi padre su **esfuerzo** de superación, quien ganó muchas batallas a la ignorancia, de mi madre su **nobleza** y de mis hermanos su **tenacidad**.

Afortunado por el hogar que con Oliva hemos construido quien ha estado a mi lado en las grandes decisiones de mi vida y con su valioso estímulo aligera los momentos más sombríos, y que Dios nos dió la oportunidad de tener y encaminar en la vida a nuestros tesoros J. Miguel y O. Rebeca. Afortunado por los profesores, discípulos y amigos quienes me enseñaron que en la vida hay que afrontar las tempestades con **temple** y ¿por qué no? Por tener el orgullo de haber nacido y crecido bajo las sombras del tepámo, encino y madroño del pueblo purhépecha llamado Nuevo Parangaricutiro.

Agradezco y admiro la obra de Vasco de Quiroga, nuestro “Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo”, así también la del Dr. Santiago Cendejas Huerta, nuestro “Instituto”, quienes me formaron con el signo característico de la “Inconformidad”, comprometiéndome con el desarrollo de mi país, inculcándome la creatividad generada por la investigación científica, tecnológica y humanística. De manera muy especial agradezco al M.I. Jaime García Vargas, por su asesoramiento durante mis estudios de maestría y en la realización de esta tesis, quien con su crítica exigente, ha hecho que dé lo mejor de mí mismo.

Finalmente le doy gracias a mi amigo el Dr. Rafael García Hernández por aceptar su anuencia en la continuidad de este trabajo.

Resumen

Con el avance de la ciencia y la tecnología en los últimos años, es necesaria la investigación y desarrollo de nuevos materiales con propiedades adecuadas para cada necesidad. En el área de la metalurgia se han desarrollado diversos tratamientos térmicos para lograr tal propósito y los métodos de calentamiento han evolucionado rápidamente siendo más eficientes, controlables, precisos y productivos.

Uno de estos métodos es el calentamiento por inducción y a pesar de que tiene grandes ventajas con respecto a otras formas de calentamiento, tiene la desventaja principal de que se pierden grandes cantidades de energía térmica y magnética durante el proceso.

La presente tesis tiene como objetivo principal el estudio y diseño de un material que permita direccionar el flujo magnético hacia la pieza a calentar para lograr un mayor aprovechamiento del mismo y evitar pérdidas de energía.

Estos materiales llamados “concentradores de energía magnética” existen en el mercado extranjero pero son muy costosos y difíciles de adquirir, por lo tanto es una de las preocupaciones de la industria mexicana, el desarrollo de este tipo de materiales en el país partiendo de materias primas nacionales.

El concentrador de energía magnética diseñado y fabricado, es del tipo magnetodieléctrico formado a partir de polvos de Fe y Si compactados y sometidos a un proceso de sinterizado. Se elaboraron probetas con diferentes porcentajes de Fe y Si. Se varió el contenido de Si en 1, 3 y 5 % en peso, el resto fue de Fe. Se compactaron empleando 10 toneladas de presión para posteriormente someterlas a un proceso de sinterizado y finalmente medir sus propiedades y realizar las pruebas de eficiencia magnética respectivas.

Para medir la eficiencia magnética del concentrador, se diseñó y fabricó un inductor para que en éste fueran instaladas las probetas maquinadas al perfil requerido.

Posteriormente se realizaron pruebas de operación y eficiencia en una máquina de inducción industrial, como pieza de trabajo se empleó un árbol de levas en material de hierro gris.

Se comparó su eficiencia con un concentrador magnético de importación y se obtuvieron resultados similares en cuanto a dureza superficial, tiempo de calentamiento y kilowatts-segundos consumidos en el proceso. Por lo que podemos decir que las probetas con 5% de silicio nos reflejan mayor penetración (9.1 mm) de temple con respecto al producto de importación (8.25 mm).

Indice

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Indice	iv
Objetivos	vii
Introducción	viii

Capítulo 1 REVISION BIBLIOGRAFICA

1.1 Metalurgia de polvos	1
1.1.1 Caracterización de los polvos en ingeniería	2
1.1.2 Producción de polvos metálicos	6
1.1.3 Herramientas de compactación	7
1.1.4 Prensado convencional y sinterizado	7
1.1.5 Alternativas de prensado y técnicas de sinterizado	12
1.1.6 Materiales y productos para metalurgia de polvos	14
1.1.7 Diseño de piezas de metalurgia de polvos	15
1.1.8 Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos	16
1.2 Teoría electrónica del magnetismo	18
1.2.1 Dominios magnéticos y curva de histéresis	22
1.2.2 Clasificación de materiales magnéticos	24
1.2.3 Pérdidas de energía en materiales magnéticos blandos	25
1.2.4 Tipos de magnetismo	26
1.2.5 Inducción magnética en una bobina	29
1.3 Concentradores de energía magnética	31
1.3.1 Antecedentes	31
1.3.2 Características magnéticas	34
1.3.3 Ventajas	36
1.3.4 Tipos de concentradores	38
1.3.5 Aleaciones y concentradores de energía magnética de Fe y Si	42
1.4 Tratamientos térmicos	45
1.4.1 Tratamientos térmicos y su importancia en la industria metal-mecánica	46
1.4.2 Clasificación de los tratamientos térmicos clásicos	47
1.4.3 Calentamiento por inducción	52
1.4.4 Mecanismo de eliminación de calor durante el temple	53
1.4.5 Medio de temple	55

1.5 Diseño de bobinas de inducción	56
1.5.1 Consideraciones en el diseño de bobinas	56
1.5.2 Materiales para la fabricación de bobinas	63
1.5.3 Selección de la tubería	63
1.5.4 Enfriamiento interno de las bobinas	64

Capítulo 2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Introducción	65
2.2 Experimentación	67
2.2.1 Materiales empleados	67
2.2.2 Caracterización de los polvos	69
2.2.3 Diseño de troquel	69
2.2.4 Diseño de la bobina de inducción	70
2.2.5 Elaboración de muestras	74
2.2.6 Sinterizado	76
2.2.7 Medición de las propiedades mecánicas eléctricas y magnéticas	77
2.2.7.1 Permeabilidad magnética	77
2.2.7.2 Magnetometría	78
2.2.7.3 Resistividad eléctrica	79
2.2.7.4 Ensayo de dureza	80
2.2.8 Microscopía	81
2.2.9 Prueba operacional del concentrador de energía magnética	81

Capítulo 3 RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Introducción	83
3.2 Caracterización de los polvos de hierro y silicio	83
3.3 Resultados de las aleaciones obtenidas	91
3.3.1 Microscopía y Difracción de Rayos X	91
3.3.2 Magnetometría	101
3.3.3 Resistividad eléctrica	104
3.3.4 Permeabilidad magnética	104
3.3.5 Dureza Rockwell B	105
3.4 Resultados de aplicabilidad en máquinas de inducción	105
3.5 Resultados obtenidos en las levas templadas	106

Capítulo 4 CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones	113
4.2 Recomendaciones	114

Bibliografía	116
--------------	-----

Anexo A: Planos de construcción de la bobina para temple de levas

Anexo B: Planos de construcción del troquel

Objetivos

Objetivos Generales:

- 1.- Diseñar un material concentrador de energía magnética para utilizarlo en procesos de tratamiento térmico de temple, empleando calentamientos por inducción magnética.
- 2.- Evaluar el comportamiento magnético del concentrador de energía en una bobina de inducción.
- 3.- Generar información acerca de las variables que intervienen en el proceso de fabricación.

Objetivos Específicos.

- 1.- Estudio de los materiales empleados en la fabricación de un concentrador de energía magnética.
- 2.- Diseñar y fabricar un troquel para elaborar las probetas.
- 3.- Fabricar el material concentrador de energía magnética utilizando productos mexicanos.
- 4.- Medir y evaluar la resistividad, permeabilidad magnética, curva de histéresis y dureza del concentrador.
- 5.- Comparar los resultados de las propiedades eléctricas y magnéticas del concentrador con las de los materiales concentradores existentes en el mercado.
- 6.- Determinar el incremento de eficiencia del proceso de temple por inducción, al emplear el concentrador de energía.
- 7.- Diseñar y fabricar un inductor para probar el concentrador obtenido.

Introducción

Desde la aparición del hombre en la tierra, una de sus principales preocupaciones fue el mejoramiento de los materiales que le eran útiles en la fabricación de sus implementos de trabajo, en sus armas y en la construcción de sus viviendas.

Los métodos empleados eran sencillos y rudimentarios como fueron la construcción del arado, el uso de la rueda y la utilización del adobe.

El grado precario de la evolución industrial se manifestaba con la baja productividad, pues en muy pocas actividades se aprovechaba la fuerza de las bestias de carga, los saltos de agua o del viento para mover máquinas rudimentarias.

Con la llegada de la revolución industrial en las últimas décadas del siglo XVIII se manifestaron muchos cambios tecnológicos, como la utilización de nuevas materias primas sobre todo el hierro y el aprovechamiento de nuevas fuentes de energía como el carbón, la electricidad y el petróleo. Por consiguiente, se desarrolló la creación de nuevas maquinarias como fue la máquina de hilar y la máquina de vapor.

La obtención del hierro de gran pureza se alcanzó hacia el año 1910, tras más de un siglo de incesantes avances técnicos en la industria, trajo como consecuencia la aparición del acero que es una aleación de hierro y pequeñas cantidades de carbono (2%)_[1].

Con la invención de la máquina de combustión interna, la fabricación de piezas estuvo orientada a que las propiedades mecánicas fueran uniformes. Sin embargo, en algunas aplicaciones es necesario que algunas piezas tengan superficies muy duras, resistentes al desgaste pero con un núcleo central muy tenaz para soportar las cargas a que estarán sometidas. Los procedimientos más usados en la actualidad para lograr estas características son los tratamientos térmicos, los cuales por medio de la temperatura, la estructura del metal varía especialmente en las proximidades de las temperaturas críticas.

Así tras un proceso de calentamiento superficial controlado, el metal se somete a la acción de sustancias refrigerantes como el agua, aceite, baño de sales fundidas, etc. Este tratamiento es el temple y aumenta la dureza superficial del acero. Este tratamiento normalmente es acompañado de un revenido posterior, para eliminar esfuerzos residuales.

Originalmente, el temple se realizaba a la flama. En el año de 1920, la compañía norteamericana “Mid Vale” utilizó el fenómeno de calentamiento superficial de alta frecuencia. Esta empresa calentó y endureció superficialmente rodillos de molino. Históricamente, ésta fue la primera aplicación exitosa del calentamiento por inducción. Para este proceso, una de las herramientas fundamentales es la bobina (o inductor), la cual tiene la característica de proporcionar la energía magnética en una parte específica de la pieza de trabajo.

Un circuito de una máquina de inducción consiste fundamentalmente en un transformador al cual se acopla un inductor por el que circula una corriente alterna. La pieza que se va a calentar se coloca en el centro del inductor.

Entre el inductor y la pieza no existe ningún tipo de contacto o conexión. El flujo de la corriente eléctrica a lo largo del inductor origina líneas de fuerza electromagnética, que se propagan en la pieza de trabajo, induciendo una corriente alterna que provoca un calentamiento por el efecto de las corrientes de Eddy.

La pieza a calentar que recibe la corriente inducida actúa como resistencia al paso del flujo. Las líneas electromagnéticas de fuerza que inducen el flujo de la energía están más concentradas en el punto medio del espesor del inductor y cerca de su cara interior, siendo la característica del calentamiento con alta frecuencia la tendencia a concentrarse, en la superficie del conductor a través de la cual fluye este calor.

La energía electromagnética generada se pierde al vacío en un 75% por las caras del inductor por lo que solamente se aprovecha el 25%. A partir del año 1950 han aparecido en el mercado mundial, diferentes tipos de concentradores magnéticos que tienen como

finalidad aprovechar al máximo la energía magnética generada. Estos son materiales de alta permeabilidad magnética y alta resistividad^[2], que disminuyen la reluctancia del entrehierro al paso de la corriente eléctrica a través de un inductor instalado en un equipo de calentamiento por inducción.

Siendo el inductor la parte que define el perfil de calentamiento en la pieza de trabajo es importante mencionar que si en su periferia se instala un concentrador de energía se reducirá considerablemente la resistencia magnética (reluctancia), causada por la alta permeabilidad del concentrador.

Esto significa que el aire teniendo una permeabilidad relativa de 1.0 ofrece una gran resistencia al paso de la corriente electromagnética que genera el inductor, por lo que el concentrador de energía magnética optimiza el paso de las líneas de fuerza magnética trayendo como consecuencia una mayor eficiencia en la operación del calentamiento por inducción^[2].

La utilización de los concentradores de flujo magnético en los tratamientos térmicos por inducción son benéficos porque:^[3]

- a) Disminuyen el nivel de potencia requerido para calentar la pieza de trabajo.
- b) El proceso es más eficiente ya que se reduce la cantidad de energía consumida.
- c) Aumenta la productividad del equipo del tratamiento térmico.
- d) Su eficacia se demuestra en calentar áreas específicas de la pieza de trabajo.
- e) Los patrones de calentamiento son más homogéneos, lo que origina una dureza más consistente mejorándose las propiedades mecánicas y microestructurales.

Capítulo 1

REVISION BIBLIOGRAFICA

1.1 Metalurgia de polvos

Un polvo se puede definir como un sólido dividido en partículas finas^[4].

Metalurgia de polvos es el nombre con el que se conoce el proceso por el cual materiales en forma de polvo son mezclados, compactados en una forma deseada y posteriormente calentados en una atmósfera controlada con el fin de unir las superficies en contacto de las partículas (sinterizar) y establecer las propiedades deseadas. El proceso comúnmente conocido como metalurgia de polvos se utiliza en la producción masiva de partes pequeñas y de gran precisión, a menudo eliminando el posterior maquinado o terminado. En este proceso se pueden utilizar materiales o mezclas inusuales. Las áreas de aplicación para los materiales elaborados mediante este proceso en las que éste presenta grandes ventajas económicas o donde las propiedades y características deseadas serían difíciles de obtener por otro método de manufactura son: carburos cementados, materiales compuestos, materiales forjados, materiales para herramientas, imanes permanentes, etc^[5].

La elaboración de materiales mediante las técnicas de metalurgia de polvos es conveniente cuando se trabaja con metales con un elevado punto de fusión, en los sistemas metal no metal, en los que la aleación por técnicas de fusión es imposible y en la preparación de estructura especial, como en cuerpos porosos. Por lo tanto, en la metalurgia de polvos se puede utilizar metales puros, aleaciones o mezclas de materiales metálicos y no metálicos^[6].

1.1.1 Caracterización de los polvos en ingeniería

Características geométricas

La geometría de los polvos individuales se puede definir mediante los siguientes atributos:

- 1) Tamaño y distribución
- 2) Forma y estructura interna
- 3) Área superficial

Tamaño y distribución. El tamaño de las partículas se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Se dispone de varios métodos para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común utiliza cribas de diferentes tamaños de malla. Se usa el término “número de malla” para referirse al número de aberturas por pulgada lineal de la criba.

La figura 1.1 muestra cómo pasarían las partículas pequeñas a través de las aberturas, mientras que las grandes se quedarían retenidas.

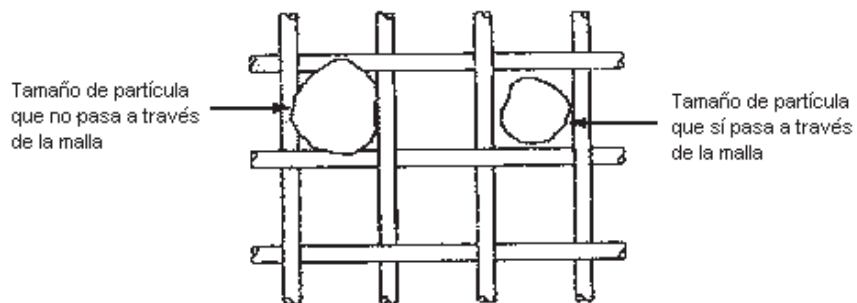


Figura 1.1 Malla de criba para seleccionar partículas.

Forma y estructura interna. La forma de los polvos metálicos puede catalogarse en varios tipos como: esférica, redonda, cilíndrica, esponjosa, acicular, hojuela, cúbica y agregada. La figura 1.2 muestra algunos tipos de partículas.

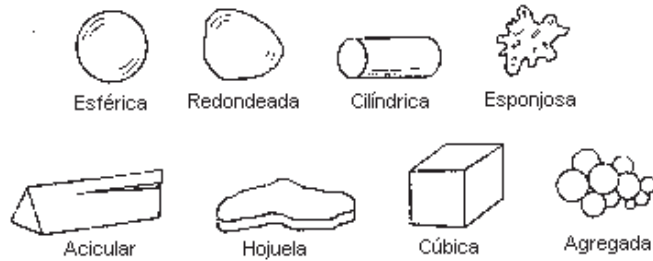


Figura 1.2 Formas posibles de partículas en metalurgia de polvos

Area superficial. Suponiendo que la forma de la partícula sea una esfera perfecta, su área (**A**) y su volumen (**V**) están dados por:

$$A=4\pi r^2 \quad \text{Ec. 1.1}$$

$$V=4/3\pi r^3 \quad \text{Ec. 1.2}$$

donde (**r**) es el radio de la partícula esférica. La relación área/volumen (**A/V**) para una esfera se determina entonces por:

$$A/V=6/D \quad \text{Ec. 1.3}$$

En general, la relación de área a volumen puede expresarse para cualquier forma de partícula, esférica como:

$$A/V=K_s/D \quad \text{o} \quad K_s=AD/V \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde (**K_s**)= factor de forma; y (**D**) en el caso general es igual al diámetro de una esfera o volumen equivalente al de una partícula no esférica. Entonces (**K_s**)=6.0 para una esfera. Para formas de partícula diferentes a la esférica, (**K_s**>6). De estas ecuaciones se puede inferir lo siguiente. A tamaños menores de partícula y factores de forma más altos (**K_s**) el área superficial será más alta para el mismo peso total de polvo metálico. Esto significa una mayor área donde puede ocurrir la oxidación. El tamaño más pequeño del polvo también conduce a una mayor aglomeración de las partículas, lo cual es una

desventaja para la alimentación automática de los polvos. La razón para usar tamaños más pequeños de partículas es que se suministra una contracción más uniforme y mejores propiedades mecánicas en los productos finales de la metalurgia de polvos.

Otras características de los polvos incluyen: fricción interparticular, características de flujo, compactado, densidad, porosidad, composición química y películas superficiales^[4].

Fricción interparticular y características de flujo. La fricción entre las partículas afecta la disposición del polvo a fluir fácilmente y a compactarse firmemente. Una medida común de la fricción interparticular es el “ángulo de reposo” el cual es el ángulo formado por un montón de polvo cuando éste se vacía a través de un embudo angosto tal como se muestra en la figura 1.3. Los ángulos más grandes indican mayor fricción entre partículas. Los tamaños de partícula más pequeños generalmente muestran mayor fricción y un aumento en el ángulo de reposo. Las formas esféricas producen la menor fricción interparticular, porque al desviarse de la forma esférica, se incrementa la fricción entre las partículas.

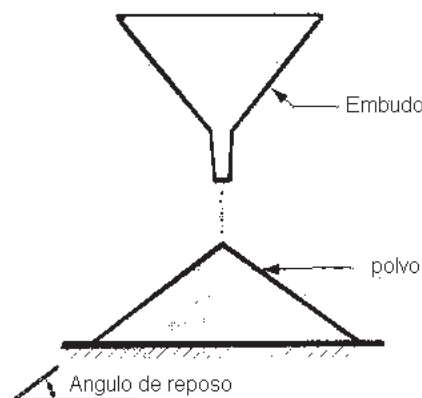


Figura 1.3 Fricción interparticular indicada por el ángulo de reposo de un montón de polvo vaciado desde un embudo angosto. A mayor ángulo, mayor fricción interparticular^[4].

Las características de flujo son importantes durante el llenado del dado y prensado. Para reducir la fricción interparticular y facilitar el flujo durante el prensado, frecuentemente se añaden pequeñas cantidades de lubricantes a los polvos.

Compactado, densidad y porosidad. Las características de compactado dependen de dos medidas de la densidad. Primero, la densidad real, que es la densidad del volumen verdadero del material. Esta podría ser la densidad del material si los polvos se fundieran en una masa sólida. Segundo, la densidad volumétrica es la densidad de los polvos en el estado suelto después de vaciado; ésta incluye el efecto de los poros entre las partículas. Debido a los poros, la densidad volumétrica es menor que la densidad real.

El “factor de empaquetamiento” es la densidad volumétrica dividida entre la densidad real. El factor de empaquetamiento depende de la forma y distribución de los tamaños de partícula y los valores típicos para los polvos fluctúan entre 0.5 y 0.7. Si están presentes polvos de varios tamaños, los polvos más finos se ajustarán entre los intersticios de los grandes, que de otra manera podrían ser ocupados por el aire, resultando así un factor de empaquetamiento más alto. El compactado puede aumentarse también vibrando los polvos, lo cual ocasiona que se asienten más firmemente. Por último, se observa que la presión extrema que se aplica durante la compactación, incrementa en gran medida el empaquetamiento de los polvos a través del rearrreglo de las partículas.

La “porosidad” se define como la relación del volumen de los poros (espacios vacíos) en el polvo, con respecto al volumen total. Este asunto se complica por la posible existencia de poros cerrados en algunas de las partículas^[4].

Composición química y películas superficiales. La caracterización del polvo no sería completa sin una identificación de su composición química. Los polvos metálicos pueden consistir de un metal puro o prealeado, en donde cada partícula es una aleación.

Las películas superficiales, son un problema en la metalurgia de polvos debido a la gran área por unidad de peso del metal cuando se trata con polvos. Las posibles películas incluyen óxidos, sílice, materiales orgánicos absorbidos y humedad. Por lo general, estas películas deben removerse antes de procesar la forma.

1.1.2 Producción de polvos metálicos

Tanto el hierro como el silicio en polvo pueden producirse por los métodos que se describen a continuación. Hay tres métodos principales para producir comercialmente polvos metálicos: atomización, reducción química y electrólisis.

Atomización. Este método implica la conversión de un metal fundido en una nube de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos. Es el método más versátil y popular para producir polvos metálicos en la actualidad, y aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros. Hay muchas maneras de crear el rocío del metal fundido una de ellas se muestra en la figura 1.4. En este método se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido. Esta figura muestra como fluye el gas a través de una boquilla de expansión succionando el metal líquido de la fusión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotitas se solidifican en forma de polvo. Otros métodos pueden ser atomizados por agua y atomizado centrífugo.

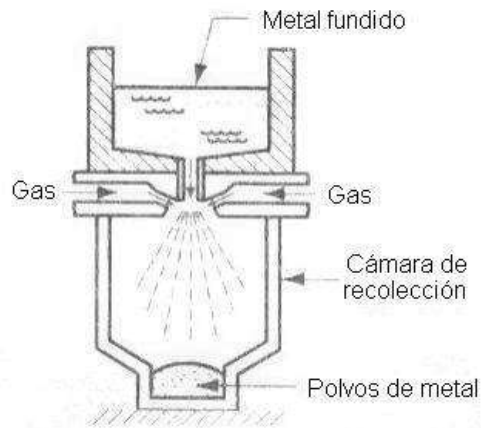


Figura 1.4 Atomización empleando gas para producir polvos metálicos^[4].

Reducción química. Comprende una serie de reacciones químicas que reducen los compuestos metálicos a polvos metálicos elementales. Un proceso común consiste en la liberación de los metales de sus óxidos mediante el uso de agentes reductores como hidrógeno y monóxido de carbono. El agente reductor se combina con el oxígeno del compuesto y libera el elemento metálico. Por este método se producen polvos de hierro, de

tungsteno y de cobre. Otro proceso químico para polvos de hierro implica la descomposición del pentacarbonilo de hierro para producir partículas esféricas de alta pureza. Otros procesos químicos incluyen la precipitación de elementos metálicos de sales disueltas en agua. Los polvos de cobre, níquel y cobalto pueden producirse por este método.

Electrólisis. Se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrolito y se deposita en el cátodo. El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio.

1.1.3 Herramientas de compactación

El desgaste de los herramientas empleados en el proceso del compactado es significativo debido a que las partículas de polvo tienden a ser abrasivas y por las altas presiones involucradas durante la compactación. En consecuencia, los equipos de compactación son usualmente fabricados de acero endurecido. Para polvos particularmente abrasivos, o para una elevada producción, pueden emplearse carburos cementados. Las superficies del dado deben ser altamente pulidas y los dados deben ser lo suficientemente resistentes a las altas presiones. También se usan lubricantes para reducir el desgaste del dado.

1.1.4 Prensado convencional y sinterizado

Después de la producción de polvos metálicos, la secuencia convencional de la metalurgia de polvos consiste en tres pasos: 1) Mezclado de polvos, 2) compactación, en la cual se prensan los polvos para obtener la forma deseada; y 3) sinterizado, que implica

calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión para provocar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la pieza.

Mezclado de polvos.

Para lograr buenos resultados en la compactación y el sinterizado, los polvos metálicos necesitan homogeneizarse perfectamente antes del proceso. El mezclado se refiere a la combinación de polvos de la misma o diferente composición química, pudiendo tener diferentes tamaños de partícula. Una ventaja de esta tecnología es la oportunidad de combinar varios metales en aleaciones que sería difícil o imposible producir por otros medios.

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos. Algunas de estas técnicas son: a) por rotación en tambor, b) por rotación en un recipiente de cono doble, c) por agitación en un mezclador de tornillo y d) por agitación en un mezclador de paletas^[4].

Generalmente se añaden aditivos a los polvos metálicos durante el paso de mezclado. Estos aditivos son: 1) el **estearato de zinc y el aluminio** en pequeñas cantidades para reducir la fricción entre las partículas y las paredes del dado; 2) **aglutinantes**, que se requieren en algunos casos para lograr una resistencia adecuada en las partes compactadas pero no sinterizadas; 3) **desfloculantes**, que inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar sus características de flujo durante la alimentación, y 4) **polímeros sintéticos termofijos**, tales como el “novolac” el cual con pequeñas cantidades agregadas mejora la resistividad eléctrica.

Compactación

En la compactación se aplican presiones que oscilan entre 3 y 120 tons/in² dependiendo del material y de la aplicación (ver tabla 1), siendo las más comunes entre 10

y 30 tons/in². El método convencional de compactación es el **prensado**, en el cual punzones opuestos presionan el polvo contenido en un dado.

Tabla 1.1 Presiones típicas de compactación para varias aplicaciones_[4].

APLICACION	PRESION tons/in²	PRESION MPa.
Metales porosos y filtros	3-5	40-70
Metales refractarios y carburos	5-15	70-200
Chumaceras porosas	10-25	146-350
Partes de máquinas	20-50	275-690
Partes de acero y hierro de alta densidad	50-120	690-1650

La presión que se aplica en los polvos produce inicialmente un compactado con un mejor acomodo de las partículas, elimina los puentes que se forman durante el llenado, reduce el espacio de los poros e incrementa el número de puntos de contacto entre las partículas. Al incrementar la presión, las partículas se deforman plásticamente, ocasionando que el área de contacto interparticular aumente y entren en contacto partículas adicionales. Esto viene acompañado de una reducción posterior del volumen de los poros.

En esta etapa del proceso se obtiene un cuerpo con una “densidad en verde”, el cual posteriormente se lleva a un proceso de secado, calcinado y sinterizado.

El equipo usado en la compactación convencional en la metalurgia de polvos son prensas mecánicas, hidráulicas o una combinación de las dos.

Durante la compactación, las partículas de polvo se mueven primeramente en la dirección de la fuerza aplicada. Los polvos no fluyen como un líquido sino que simplemente se comprimen hasta que una fuerza igual y opuesta es creada. Esta fuerza opositora es creada posiblemente por la combinación de (1) resistencia del punzón inferior, y (2) fricción entre las partículas y las superficies del dado. Como se muestra en la figura 1.5-a, cuando la presión es aplicada por un solo punzón, la máxima densidad ocurre abajo del punzón y decrece hacia abajo. Es muy difícil de transmitir una presión uniforme y

producir una densidad uniforme a través de un compactado. Con el uso de una doble aplicación de presión (figura 1.5-b), puede obtenerse mejor uniformidad de densidad y pueden compactarse productos más gruesos. La fricción que se ejerce sobre la pared es un factor determinante en la compactación, la densidad de la pieza obtenida está en función de su espesor y ancho. Para una compactación uniforme, la relación espesor/ancho debería conservarse por debajo de un valor de 2. Productos con una relación por arriba de 2 tienden a mostrar una considerable variación en su densidad.

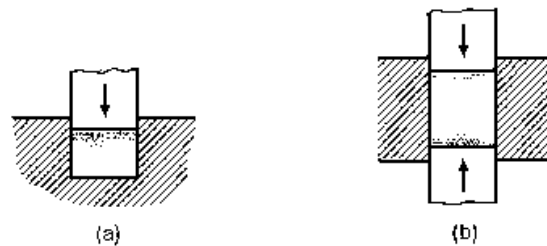


Figura 1.5 Diferencias de densidad: (a) con un punzón, (b) con dos punzones^[7].

Sinterizado

Después del prensado, el compactado en verde carece de fuerza y resistencia, se desmorona fácilmente al menor esfuerzo. El sinterizado es una operación de tratamiento térmico que se ejecuta sobre el compactado para unir sus partículas metálicas, incrementando de esta manera su fuerza y resistencia. El tratamiento se lleva a cabo generalmente calentando el material a temperaturas entre 0.7 y 0.9 del punto de fusión del metal (en la escala absoluta). El término “sinterizado en estado sólido” se usa algunas veces para este sinterizado convencional debido a que el metal permanece sin fundir a la temperatura del tratamiento.

Una característica del sinterizado es que reduce la energía superficial. El compactado verde consiste en muchas partículas distintas que tienen su propia superficie, por tanto, la superficie total del área contenida en el compactado es muy alta. Bajo la influencia del calor, el área se reduce por la formación y crecimiento de las uniones entre las partículas, esto implica la reducción de la energía superficial. Mientras más fino sea el

polvo inicial, más alta será la superficie del área total y más grande la fuerza que mueve al proceso^[4].

El sinterizado implica transporte de masa para crear cuellos y transformarlos en límites de grano. El principal mecanismo para que esto ocurra es la difusión; otro posible mecanismo es el flujo plástico. La contracción ocurre durante el sinterizado como resultado de la reducción del tamaño de los poros. Esto depende en gran medida de la densidad del compactado verde, y ésta a su vez de la presión durante la compactación.

El tratamiento térmico de sinterización consiste en tres pasos realizados en hornos continuos de tres cámaras: 1) precalentamiento, en el cual se queman los lubricantes y el aglutinante, 2) sinterizado y 3) enfriado.

En la práctica moderna del sinterizado se utilizan atmósferas controladas. Los propósitos de la atmósfera controlada son: 1) disminuir en lo posible la oxidación, 2) proporcionar una atmósfera reductora para remover los óxidos existentes, 3) suministrar una atmósfera carburizadora y 4) ayudar a la remoción de los lubricantes y aglutinantes que se usan en el prensado. Las atmósferas de los hornos de sinterizado comunes son: de gas inerte, basadas en nitrógeno, de amoníaco disociado, de hidrógeno y basadas en gas natural.

Densificación y dimensionamiento. Para aumentar la densidad y mejorar la dimensión de la pieza o para lograr formas adicionales en las partes sinterizadas, se realizan numerosas operaciones secundarias tales como densificación, dimensionamiento, impregnación, infiltración, el tratamiento térmico y acabado. El “reprensado” es una operación de prensado en el que se aplica presión a la pieza en un dado cerrado para aumentar la densidad y mejorar las propiedades físicas. El “dimensionamiento” es la compresión de una parte sinterizada para mejorar sus dimensiones. El “acuñado” es una operación de prensado sobre una parte sinterizada para imprimir detalles en la superficie.

Rara vez se utiliza el “maquinado” para dimensionar las partes, más bien se usa para crear características geométricas que no se pueden lograr por prensado, como son cuerdas internas o externas, perforaciones laterales y otros detalles.

Impregnación e infiltración. Recientemente, se ha desarrollado la incorporación de lubricantes orgánicos a los compactados, la porosidad es una característica inherente a la tecnología de metalurgia de polvos. Esta porosidad se puede aprovechar para crear productos especiales, llenando el espacio disponible en los poros con aceite, polímeros o metales que tienen un punto de fusión más bajo que la base del metal en polvo. La “Impregnación” es el término que se usa cuando se introduce aceite u otro fluido dentro de los poros de una parte sinterizada. Los productos más comunes de este proceso son los rodamientos impregnados con aceite, los engranes y componentes similares de maquinaria. Estas piezas tienen un suministro continuo de lubricante, por acción capilar durante sus vidas de servicio, para otros casos se eliminan las graseras de lubricación. Los tratamientos se realizan mediante inmersión de las piezas sinterizadas en un baño de aceite caliente.

La “infiltración” es una operación en la cual se llenan los poros con un metal fundido. El punto de fusión del metal de relleno debe ser menor que el de la pieza. El proceso implica calentar el metal de relleno en contacto con el componente sinterizado de manera que la acción de capilaridad haga fluir al relleno dentro de los poros. La estructura resultante es relativamente no porosa y la parte infiltrada tiene una densidad más uniforme, así como una tenacidad, dureza y resistencia a la tensión mejoradas. Una aplicación de este proceso es la infiltración con cobre de las partes de hierro sinterizado; también se puede hacer infiltración con plomo: por la baja resistencia del plomo al corte, la parte infiltrada desarrolla características de menor fricción que la no infiltrada_[4].

1.1.5 Alternativas de prensado y técnicas de sinterizado

Una de las operaciones más críticas en el proceso de la metalurgia de polvos es el prensado. En esta operación polvos sueltos son densamente empaquetados en una forma

geométrica determinada conocida como prensado en verde, usualmente a la temperatura ambiente. Una alta densidad y uniformidad del producto densificado son características deseadas por lo que se debe tener cuidado en la selección del proceso de prensado.

Una forma de promover la obtención de un prensado uniforme es mediante el incremento en la cantidad de lubricante utilizado. Esto reduce la fricción entre el polvo y las paredes de la matriz, promoviéndose una mejor transmisión de la presión de prensado a través del polvo a compactar^[5].

La secuencia convencional de prensado y sinterizado es la más utilizada en la tecnología de la metalurgia de polvos. Estos métodos caen en tres categorías: 1) métodos de compactación alternativa, 2) compactación combinada y sinterizado, y 3) métodos de sinterizado^[4].

Prensado isostático

Una característica del prensado convencional es que la presión se aplica uniaxialmente. Esto impone limitaciones sobre la geometría de la pieza, ya que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección perpendicular a la aplicación de la presión. El prensado uniaxial produce también variaciones de la densidad en la compactación, después del prensado. En el prensado isostático, la presión se aplica en todas direcciones contra los polvos contenidos en un molde flexible, para lograr la compactación se usa la presión hidráulica. El prensado isostático puede realizarse en frío (a temperatura ambiente) como se muestra en la figura 1.6 y prensado isostático en caliente, empleando gas inerte a altas temperaturas.

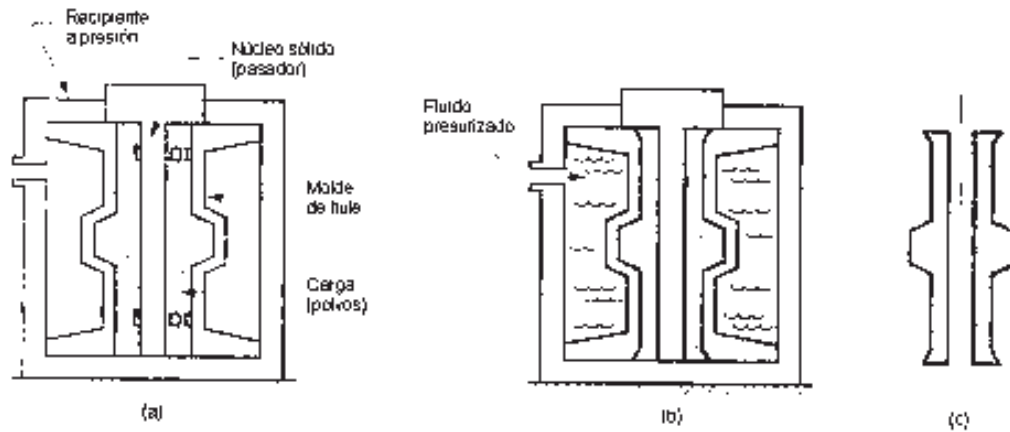


Figura 1.6 Prensado isostático en frío: (a) se colocan los polvos en el modelo flexible, (b) se aplica presión hidráulica sobre el modelo para compactar los polvos, y (c) se reduce la presión y se retira la pieza_[4].

1.1.6 Materiales y productos para metalurgia de polvos

Las materias primas para el procesamiento en metalurgia de polvos son más costosas que para otros trabajos de metal_[4], debido a la energía adicional requerida para producir los polvos.

Materiales para la metalurgia de polvos

Desde un punto de vista químico, los polvos metálicos se pueden clasificar en elementales y prealeados. Los polvos *elementales* consisten en un metal puro y se usan en aplicaciones donde la alta pureza es importante. Por ejemplo, el hierro puro puede usarse donde importan sus propiedades magnéticas.

Los polvos *elementales* se mezclan también con otros polvos metálicos para producir aleaciones especiales que son difíciles de formular por métodos convencionales. Las herramientas de acero son un ejemplo, la metalurgia de polvos permite combinar

ingredientes que son difíciles o imposibles por las técnicas tradicionales de aleación. El uso de mezclas de polvos elementales facilita el procedimiento para formar una aleación, aun cuando no involucre aleaciones especiales. Siendo los polvos metales puros, no son tan fuertes como los metales prealeados. Por tanto se deforman más fácilmente durante el prensado, así que la densidad y la resistencia verde son más altas que los compactados prealeados.

En los polvos *prealeados*, cada partícula es una aleación que tiene la composición química deseada, estos polvos se usan cuando la aleación no puede formularse mediante la mezcla de polvos elementales, unos ejemplos de estos casos son el acero inoxidable, aleaciones de cobre y aceros de alta velocidad.

Productos de la metalurgia de polvos

La ventaja sustancial de la tecnología de polvos es que las partes se hacen sin maquinado adicional después de procesarse por este método. Algunos de los componentes comúnmente manufacturados mediante metalurgia de polvos son engranes, rodamientos, catarinas, sujetadores, contactos eléctricos, herramientas de corte, imanes suaves y permanentes.

1.1.7 Diseño de piezas de metalurgia de polvos

La metalurgia de polvos es un proceso de manufactura empleado por quienes tienen como objetivo final el producir productos económicos para aplicaciones específicas de ingeniería. El éxito se logra con un buen diseño, materiales y procesos adecuados. Algunas reglas básicas para el diseño de piezas mediante metalurgia de polvos son:

1. La forma de la pieza debe permitir la expulsión del dado. Se prefieren paredes perpendiculares y los diámetros formados deben ser uniformes en tamaño y paralelos al eje en el cual viaja el punzón.

2. La forma de la pieza debe ser tal que el polvo no requiera fluir a cavidades pequeñas tales como paredes delgadas, ranuras cercanas o esquinas agudas.
3. La forma de la pieza debe permitir la construcción de herramientas resistentes y estar en el rango de espesores.
4. El diseño de la pieza debe tener pocos cambios en su espesor.
5. El diseño debe ser consistente con el equipo disponible.
6. Las tolerancias juegan un papel importante en las piezas fabricadas.
7. El diseño debe considerar y compensar los cambios que ocurrirán después del prensado, tales como la contracción, que ocurre durante el sinterizado^[7].

1.1.8 Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos

Al igual que otros procesos de manufactura, la metalurgia de polvos tiene distintas ventajas y desventajas que deben ser consideradas en la fabricación de productos útiles en la vida diaria del ser humano. Algunas ventajas importantes son:

1. *Eliminación o reducción de maquinado.* La dimensión exacta y terminado superficial de los productos son tales que las operaciones de maquinado subsiguiente se eliminan para muchas aplicaciones.
2. *Altos índices de producción.* Todos los pasos en los procesos de la metalurgia de polvos son simples y fácilmente automatizados.
3. *Pueden producirse formas complicadas.* Sujetos a las dimensiones discutidas previamente, pueden producirse formas complejas, tales como combinaciones de engranes, levas, y llaves internas. Debido a la naturaleza del material inicial, se pueden hacer partes con un nivel específico de porosidad. Es común producir piezas que por otros métodos, resultarían más costosas.

4. *Es posible una gran variación en composiciones.* Se pueden producir fácilmente piezas de una pureza muy alta. Metales y cerámicos pueden ser mezclados, tales como “cermets” (materiales compuestos en los cuales un cerámico está contenido en una matriz metálica), que no se pueden producir por otros métodos. Materiales inmiscibles pueden ser combinados y los límites de solubilidad pueden ser excedidos.
5. *Una amplia variación en propiedades son obtenidas.* Los productos pueden tener un rango de baja densidad con control de la permeabilidad en piezas de alta densidad con propiedades que igualan o exceden a los equivalentes de las contrapartes forjadas. El ruido y vibraciones se reducen. Las propiedades magnéticas son fácilmente modificadas para una aplicación específica, como en el caso de los materiales magnéticos suaves.
6. *Los desperdicios de material son eliminados.* Es de los pocos procesos de manufactura en los cuales no se desperdicia material. En la fundición, maquinado y procesos de formado el desperdicio puede exceder frecuentemente el 50% del material inicial.

Las mayores desventajas del proceso de la metalurgia de polvos son:

1. *Propiedades de resistencia bajas.* Debido a la porosidad residual, las piezas de la metalurgia de polvos tienen generalmente propiedades mecánicas inferiores a los productos fundidos o forjados del mismo material. Su uso puede ser limitado al empleo de bajos esfuerzos.
2. *Costos elevados.* Debido a las altas presiones y severas abrasiones desarrolladas en el proceso, los dados deben ser hechos de materiales costosos y relativamente robustos. En una unidad básica de peso, los metales en polvo son considerablemente más costosos que los materiales fundidos o forjados. Sin embargo, la ausencia de

desperdicios y eliminación de maquinados pueden compensar el alto costo del material inicial.

3. *Diseño limitado*. Para algunos procesos de manufactura no es posible usar esta técnica, sobre todo cuando se requieren alta resistencia o para formas muy complejas.
4. *Propiedades heterogéneas*. En el producto no uniforme en densidad producido en operaciones de compactación, generalmente resultan variaciones en las propiedades a través de la pieza. Para algunos productos, estas variaciones serían inaceptables.
5. *Peligros de higiene y seguridad*. Muchos metales, tales como aluminio, titanio, magnesio y hierro son pirofosfóricos, pueden incendiarse o explotar cuando están en forma de partículas con grandes relaciones de superficie/volumen. Partículas finas pueden permanecer en el aire por largo tiempo y pueden ser inhalados por los trabajadores^[7].

1.2 Teoría electrónica del magnetismo

La teoría electrónica explica el magnetismo en términos de la relación existente entre la corriente eléctrica y el campo magnético. Un electrón que gira en una órbita produce un campo magnético, porque equivale a una corriente que fluye describiendo un círculo^[8]. El giro del electrón genera un campo magnético. Dos electrones orbitando en la misma dirección forman un campo que tiene el doble de la fuerza desarrollada por el electrón solitario en órbita, ilustrado en la (figura 1.7-a). Cuando las órbitas electrónicas están en direcciones opuestas, (figura 1.7-b), anulan por completo los efectos externos de cada uno de ellos si sus planos, velocidad y órbita, son idénticos.

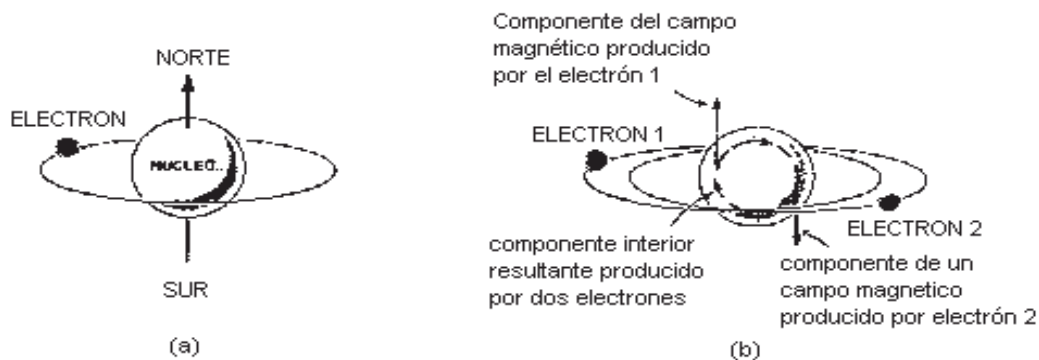


Figura 1.7 La disposición más común de las rutas de electrones da como consecuencia un campo magnético exterior neutral: (a) campo magnético debido a un solo electrón en órbita; (b) el campo combinado debido a un par de electrones en órbita está confinado dentro de un átomo individual^[8].

El comportamiento magnético de un material está determinado principalmente por su estructura electrónica, que es la que genera los dipolos magnéticos. Las interacciones entre estos dipolos determinan el tipo de comportamiento magnético que se desarrollará. El comportamiento magnético puede ser modificado por la composición, la microestructura y el procesamiento de los materiales^[9].

La magnetización ocurre cuando los dipolos magnéticos ya sean los inducidos o los permanentes, se orientan debido a la interacción entre el material magnético y un campo magnético. La magnetización aumenta la influencia del campo magnético permitiendo que se almacene mayor energía magnética que si el material no estuviera presente. Esta energía puede almacenarse permanente o temporalmente, y puede ser utilizada para realizar un trabajo.

La mayoría de las aleaciones ferrosas pueden magnetizarse, y muchas de las aleaciones magnéticas contienen también níquel, cobalto o silicio. Se usan otros metales para acentuar varias propiedades mediante la disposición de la estructura del grano y molécula de la aleación en forma ventajosa para satisfacer requisitos específicos.

El hierro y el níquel poseen estructuras cristalinas cúbicas tal como se ilustra en la figura 1.8. Sin embargo, existe una diferencia en la disposición atómica. En la celda

unitaria de la estructura cristalina del hierro, hay átomos en las ocho esquinas del cubo y uno en el centro del mismo; pero no existe ninguna en los centros de los lados. El cristal de níquel se dispone de distinto modo, con átomos en las ocho esquinas y seis átomos más en los centros de los lados, pero ninguno en el centro del cubo. Estas estructuras cristalinas reciben el nombre de “cúbica centrada en el cuerpo” y “cúbica centrada en las caras”, respectivamente.

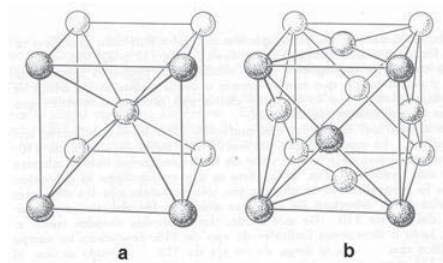


figura 1.8 Las formaciones atómicas en el interior de un cristal de (a) Hierro, el cual tiene una red de malla centrada en el cuerpo; (b) Níquel, el cual tiene una red centrada en la cara_[8].

Los átomos individuales se orientan por sí mismos, desde el punto de vista de la generación de un campo magnético externo al átomo mismo, siguiendo direcciones preferentes relativas a la red espacial cúbica, dependiendo del origen correspondiente. Estas direcciones son tres: (a) a lo largo de la dirección [100]; (b) a lo largo de la dirección [110]; y (c) a lo largo de la dirección [111] (figura 1.9).

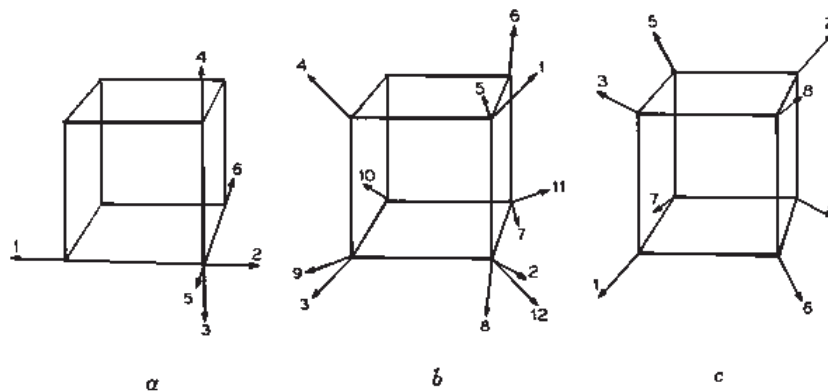


Figura 1.9 Las direcciones de las orientaciones en el interior de un cristal de red cúbica: (a) las seis direcciones [100] a lo largo de las diagonales de las caras del cubo; (b) las 12 direcciones [110] a lo largo de las diagonales del cuerpo del cubo; (c) las ocho direcciones [111] a lo largo de las diagonales del cuerpo del cubo_[8].

La cuidadosa investigación de la conducta de pequeños cristales de hierro y níquel revela que tales dominios o áreas pequeñas de cristal se magnetizan fácilmente a lo largo de ciertos ejes preferidos, mientras que en otros se magnetizan con dificultad.

En el caso del hierro, la magnetización es preferencial en la dirección [100]. La magnetización del hierro a lo largo de un eje de [110], por ejemplo, quiere decir que el valor de la magnetización final se alcanza mucho más lentamente (fig. 1.10). Esto se explica mediante la suposición de que la magnetización se alcanza tan solo haciendo que las diferentes moléculas en la estructura de cristal se sitúen en las direcciones componentes del eje de [110]. De este modo, dos moléculas situadas frente a frente, junto a direcciones limítrofes de ejes de [110], producirán un campo magnético resultante a lo largo de un eje de [110]. De modo similar, el eje de [111] requiere tres elementos componentes del eje de [110] para integrar el magnetismo resultante.

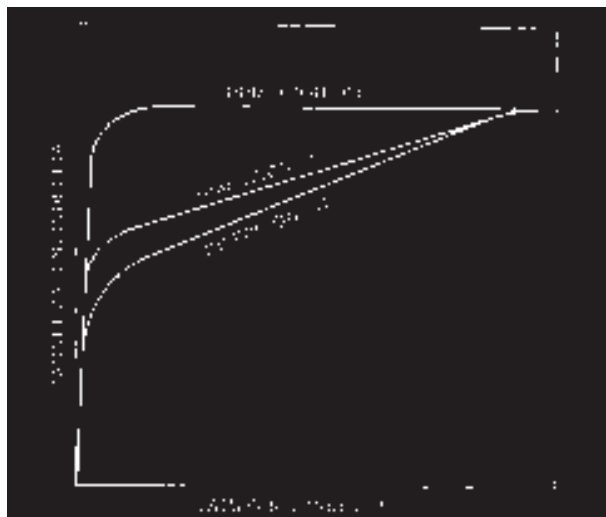


Figura 1.10 Características de magnetización de un sólo cristal de hierro, mostrando la preferencia por la magnetización en una dirección [100], con aumento más pausado tanto en la dirección [110] como de la [111]^[8].

1.2.1 Dominios magnéticos y curva de histéresis

Los dominios son regiones en el material en los cuales todos los dipolos están alineados.

Por debajo de la temperatura Curie, en la cual el material se vuelve o deja de ser magnético, los momentos de los dipolos magnéticos de los átomos de materiales ferromagnéticos tienden a alinearse en direcciones paralelas, en pequeñas regiones de volumen llamadas **dominios magnéticos**. Cuando un material ferromagnético como el hierro o níquel es desmagnetizado por enfriamiento lento por encima de su temperatura Curie, los dominios magnéticos se alinean al azar, de tal forma que no se produce momento magnético alguno para la muestra global (Fig. 1.11).

Cuando a un material magnético se le aplica un campo magnético por primera vez, al principio la magnetización crece lentamente aumentando de velocidad conforme los dominios empiezan a crecer. Posteriormente, la magnetización se vuelve más lenta, ya que los dominios deberán girar para poder llegar a la saturación.

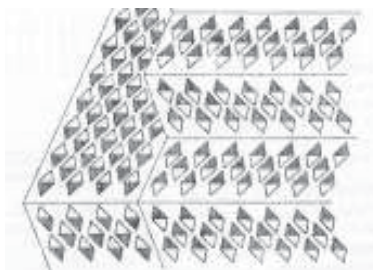


Figura 1.11 Esquema ilustrativo de los dominios magnéticos en un metal ferromagnético. Todos los dipolos magnéticos en cada dominio están alineados, pero los dominios están alineados al azar, por eso no existe ninguna magnetización neta_[10].

Al eliminar o invertir la dirección del campo magnético, la resistencia ofrecida por las paredes de los dominios evita el nuevo crecimiento de los mismos hacia orientaciones aleatorias. Como resultado, muchos de los dominios se mantienen orientados aproximadamente en la dirección del campo original y en el material se presenta una

magnetización residual llamada **remanencia** (B_r). Si el valor de dicha magnetización es grande el material actúa como un imán permanente (figura 1.12).

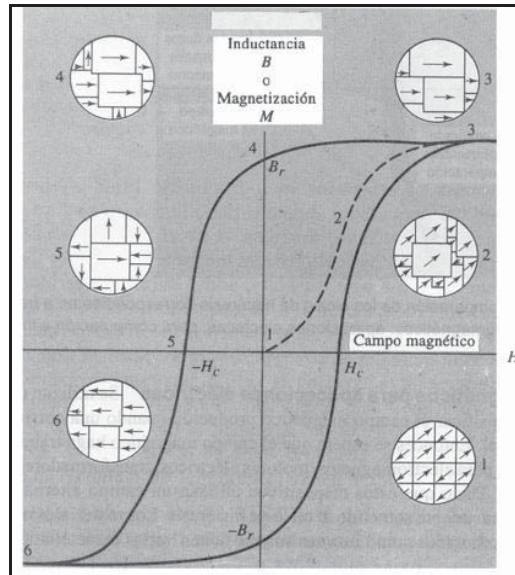


Figura 1.12. Ciclo de histéresis ferromagnético, mostrando el efecto del campo magnético sobre la inductancia o magnetización. Al alinearse los dipolos se llega a la magnetización de saturación (punto 3), a una remanencia (punto 4) y a un campo coercitivo (punto 5)^[9].

Ahora, si se aplica un campo magnético en dirección inversa, los dominios crecerán alineándose en esta nueva dirección. Para obligar a los dominios a orientarse de manera aleatoria y cancelar el efecto que unos tienen sobre otros se requiere de un *campo coercitivo* H_c (coercitividad), la cual es la fuerza necesaria para que el material se desmagnetice totalmente. Finalmente los incrementos adicionales en la intensidad del campo alinearán los dominios hacia la saturación en la dirección opuesta.

Si el campo magnético se alterna continuamente, la relación de magnetización contra el campo magnético aplicado trazará un “ciclo de histéresis”. El área incluida en el ciclo de histéresis está relacionada con la energía consumida durante el ciclo de variación del campo magnético.

1.2.2 Clasificación de los materiales magnéticos

Los materiales magnéticos se emplean para muchos diseños de ingeniería. En general, hay dos tipos principales: **materiales magnéticos suaves y duros**. Los suaves son usados en aplicaciones en las que el material es fácilmente magnetizado y desmagnetizado, y sus aplicaciones son en núcleos de transformadores de distribución de energía eléctrica, estatores y rotores para motores, generadores y concentradores de energía magnética empleados en el proceso de temple por inducción. Por el contrario, los materiales magnéticos duros son usados para aplicaciones que requieren imanes permanentes, los cuales no se desmagnetizan fácilmente, tales como auriculares, altavoces, motores sincrónicos sin escobillas, así como motores de arranque. El ciclo de histéresis que representa a cada uno de ellos se muestra en la figura 1.13.

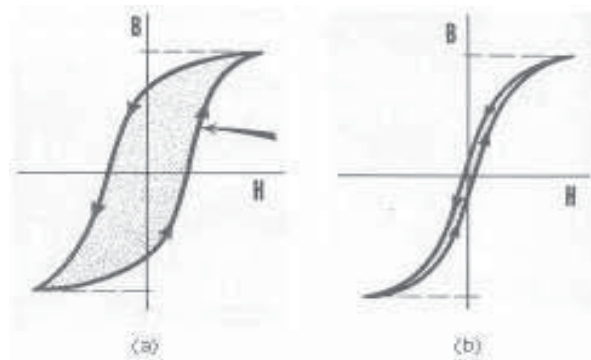


Figura 1.13 Ciclo de histéresis de dos diferentes materiales magnéticos; (a) material magnético duro y (b) material magnético suave^[11]

Para un material ferromagnético, el ser “suave” quiere decir que su ciclo de histéresis es delgada para que la magnetización sea fácil y tenga alta permeabilidad. Una alta inducción de saturación es también una propiedad importante de los materiales magnéticos suaves.

Los cuatro tipos de composiciones usadas para piezas magnéticas suaves prensadas son: hierro puro, aleación hierro-silicio 3% Si, aleación de hierro-fósforo 0.45 a 0.75 % en peso de P, y aleaciones de hierro-níquel 50% Fe y 50% en peso de Ni. Muchas de estas

aleaciones son difíciles de mecanizar debido a su suavidad. El polvo férrico puro se usa ampliamente para producir las partes magnéticas suaves.

En la producción de estas piezas, los procesos que se utilizan es el compactado, sinterizado y en algunos casos el recompactado y templado. Las propiedades magnéticas son una función de la densidad, temperatura y atmósfera en que se efectúa el sinterizado, así como del tamaño de partícula del polvo.

Las temperaturas de sinterizado son tan altas como 1370 °C esto es común en la fabricación de partes magnéticas^[7].

1.2.3 Pérdidas de energía en materiales magnéticos suaves

Pérdidas de energía por histéresis. Se deben a la disipación de energía que se requiere para mover las paredes de los dominios durante la magnetización y la desmagnetización de materiales magnéticos. La presencia de impurezas, imperfecciones cristalinas y precipitados de materiales magnéticos suaves, actúan como barrera para impedir el movimiento de las paredes del dominio durante el ciclo de magnetización, incrementando las pérdidas de energía de histéresis. Este tipo de pérdidas también aumenta por la presencia de deformación plástica en las paredes del dominio, gracias al aumento en la densidad de las dislocaciones en el material. En general, “el área interna de un ciclo de histéresis es la medida de la energía perdida debida a la histéresis magnética”.

Pérdidas de energía por corrientes parásitas. Un campo magnético fluctuante originado por una corriente eléctrica alterna en los núcleos magnéticos conductores, produce un cambio en los gradientes de voltaje, los cuales crean pérdidas de corrientes eléctricas. Estas corrientes eléctricas inducidas son llamadas “**corrientes parásitas**” y también conocidas como “**corrientes de Eddy**” por fluir alrededor del material en forma de remolino.

Las corrientes de Eddy son una fuente de pérdida de energía debido al calentamiento de la resistencia eléctrica. Las pérdidas de energía por corrientes parásitas se pueden minimizar usando una estructura laminar de acero al silicio. Una capa de aislante entre los materiales de conducción magnética previene las corrientes parásitas desde una hoja a la siguiente. Otra aproximación para reducir las pérdidas de corriente, particularmente a altas frecuencias, es usar un material magnético suave con un aislante. Los óxidos ferrimagnéticos y otros tipos similares de materiales magnéticos, se utilizan para aplicaciones a altas frecuencias electromagnéticas [10].

1.2.4 Tipos de magnetismo

Cuando se aplica un campo magnético a un conjunto de átomos se observan varios tipos de comportamientos (figura 1.14): (a) Diamagnetismo, (b) Paramagnetismo, (c) Ferrimagnetismo, y (d) ferromagnetismo.

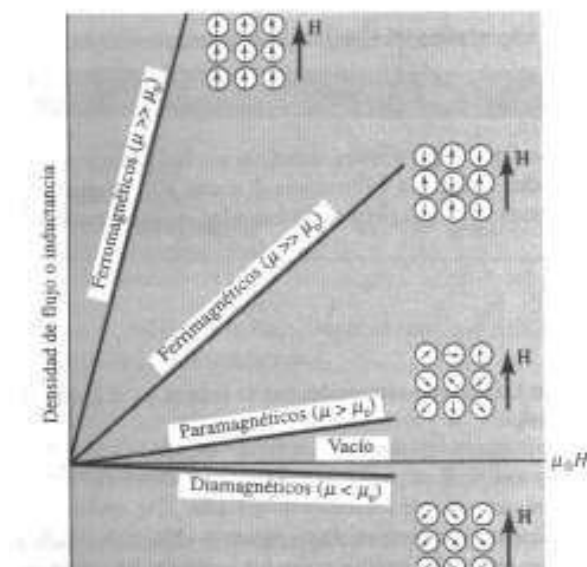


Figura 1.14. Efecto del material del núcleo sobre la densidad de flujo. En los materiales diamagnéticos el momento magnético se opone al campo. Para un mismo campo aplicado estarán presentes momentos progresivamente más intensos en materiales paramagnéticos, ferrimagnéticos y ferromagnéticos[9], donde μ es la permeabilidad del material y μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío.

a) Diamagnetismo ($\mu < \mu_0$)

Un campo magnético externo actúa sobre los átomos de un material desequilibrando ligeramente sus electrones en las órbitas y creando un dipolo magnético dentro de los átomos que se opone al campo aplicado. Esta acción produce un efecto magnético negativo conocido como diamagnetismo. El efecto diamagnético produce una susceptibilidad magnética negativa muy pequeña del orden de $X_m = -10^{-6}$ [10]. El diamagnetismo se produce en todos los materiales, pero en muchos su efecto magnético negativo es cancelado por un efecto magnético positivo. En esta clasificación están el cobre, plata, oro y la alúmina a temperatura ambiente.

Los materiales diamagnéticos tienen susceptibilidades negativas por debajo de la temperatura ambiente. Esto significa que al aplicar un campo magnético en él, se genera un campo magnético en sentido contrario.

b) Paramagnetismo ($\mu > \mu_0$)

Los materiales paramagnéticos son los que exhiben una pequeña susceptibilidad magnética positiva en presencia de un campo magnético. El efecto paramagnético en los materiales desaparece cuando se elimina el campo magnético aplicado. El paramagnetismo se origina por la alineación de los momentos dipolares magnéticos individuales de átomos o de moléculas en un campo magnético aplicado. Puesto que la vibración térmica hace aleatorias las direcciones de los dipolos magnéticos, un aumento en la temperatura hace que disminuya el efecto paramagnético. Una característica importante de estos materiales es que al aplicarles un campo magnético el resultado final es un vector cero; ya que sus momentos magnéticos están desorientados, por lo cual estos materiales no se pueden magnetizar. Los materiales que caen dentro de esta clasificación son el aluminio, el titanio y aleaciones de cobre.

c) Ferrimagnetismo ($\mu \gg \mu_0$)

En algunos materiales cerámicos, diferentes iones poseen distintas magnitudes para sus momentos magnéticos, y cuando dichos momentos se alinean de manera antiparalela, no existe momento magnético en ninguna dirección. Existe un grupo de materiales ferrimagnéticos llamados “ferritas”. Un grupo está basado en la magnetita Fe_3O_4 , o piedra imán. Las ferritas tienen baja conductividad, lo que les hace útiles para muchas aplicaciones electrónicas.

Al aplicar un campo magnético, los momentos magnéticos se alinean en direcciones opuestas pero uno de ellos es más pequeño (el material se llega a magnetizar muy poco)^[9].

d) Ferromagnetismo ($\mu \gg \mu_0$)

En los materiales ferromagnéticos es posible la generación y eliminación de grandes campos magnéticos. Los materiales ferromagnéticos más importantes, desde el punto de vista industrial, son el hierro, el cobalto, y el níquel. Estos elementos cuando son magnetizados a temperatura ambiente son capaces de producir un fuerte campo magnético alrededor suyo. El gadolinio (Gd), un elemento de las tierras raras, es ferromagnético por debajo de 16°C , pero tiene pocas aplicaciones industriales.

Las propiedades ferromagnéticas de los elementos de transición, hierro, cobalto y níquel son debido a que el sentido de giro de los espines de los electrones internos desapareados se alinean en sus estructuras cristalinas. Las capas internas de los átomos individuales se llenan con pares de electrones de espines opuestos y así no hay un momento dipolar resultante.

Al aplicar un campo magnético el material orienta sus momentos magnéticos en la dirección del campo.

e) Antiferromagnetismo

Es la oposición de los dipolos magnéticos adyacentes, causando una magnetización neta igual a cero.

En presencia de un campo magnético, los polos magnéticos de los átomos de los materiales antiferromagnéticos se alinean ellos mismos en direcciones opuestas. Los elementos como manganeso, cromo, óxido de manganeso y óxido de níquel en estado sólido y a temperatura ambiente, muestran antiferromagnetismo y tienen una energía de intercambio negativa porque la relación de su espaciado atómico al diámetro de los orbitales 3d, es menor de 1.4.

Al aplicar un campo magnético, en estos materiales, se generan momentos magnéticos o dipolos que se orientan por sí solos en direcciones opuestas y que al final se cancelan tal como se muestra en la figura 1.15.

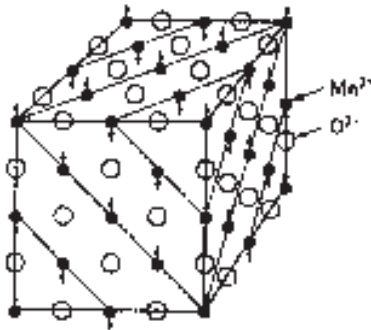


Figura 1.15. Estructura cristalina del MnO, formada por capas alternas de planos tipo [111] de iones de oxígeno y manganeso. Los momentos magnéticos de los iones de manganeso en cada plano alterno [111] están en oposición. En consecuencia, el MnO es antiferromagnético_[10].

1.2.5 Inducción magnética en una bobina

Cuando pasa una corriente eléctrica (**I**) a través de una bobina, se produce un campo magnético **H** generando una relación entre el campo magnético y la magnetización.

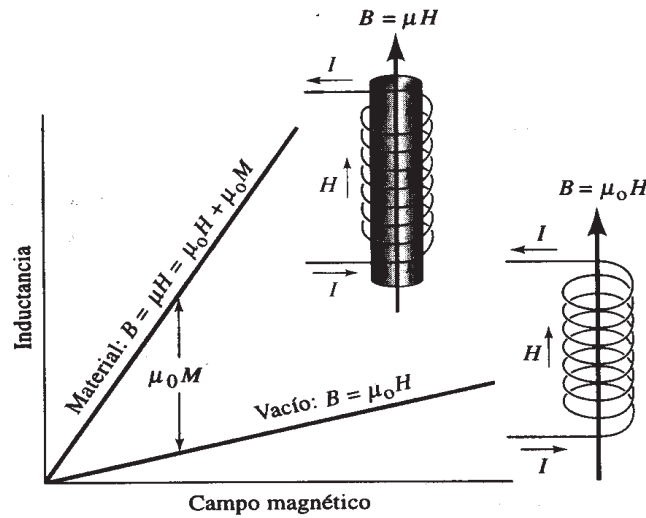


Figura 1.16 Una corriente I que pasa a través de una bobina establece un campo magnético H con una densidad de flujo B . La densidad de flujo es mayor cuando se coloca un núcleo magnético dentro de una bobina^[9].

La intensidad del campo magnético (H) está dada por:

$$H = \frac{n I}{L} \quad (1.10)$$

Donde n es el número de vueltas, I es la corriente (ampers) y L es la longitud de la bobina (m). Las unidades de H son; ampers*vuelta/metro, o simplemente A/m. Unidades de inductancia, campo, magnetización y permeabilidad se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Unidades para el comportamiento magnético^[10].

	Unidades cgs	Unidades SI	Conversión
Inductancia B	gauss	tesla (weber/m ²)	1 tesla = 10 ⁴ gauss
Campo H	oersted	A/m	1 A/m = 4π × 10 ⁻³ oersted
Magnetización M	oersted	A/m	
Permeabilidad μ_0	1 gauss/oersted	4π × 10 ⁻⁷ weber/A • m (henry/m)	

Cuando se aplica un campo magnético en el vacío se inducen líneas de flujo magnético. El número de líneas de flujo, conocido como densidad de flujo o inductancia B , está relacionado con el campo aplicado por:

$$B = \mu_0 H \quad (1.11)$$

μ_0 es una constante conocida como la permeabilidad magnética en el vacío.

Cuando se coloca un material dentro de un campo magnético, la inductancia magnética se determina por la manera en la cual los dipolos magnéticos, inducidos y permanentes, interactúan con el campo, por lo tanto la inductancia puede expresarse como:

$$B = \mu H \quad (1.12)$$

Donde μ es la permeabilidad del material.

Si los momentos magnéticos refuerzan el campo aplicado, entonces $\mu > \mu_0$, creándose un mayor número de líneas de flujo que puedan realizar trabajo y se amplifica el campo magnético. Si los momentos magnéticos se oponen al campo, entonces, $\mu < \mu_0$.

Es posible describir la influencia del material magnético en función de la permeabilidad relativa μ_r :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.13)$$

Una permeabilidad relativa grande significa que el material amplifica o intensifica el efecto del campo magnético.

1.3 Concentradores de energía magnética

1.3.1 Antecedentes

En los años de 1930, la compañía Crack-Shaft de Ohio, una gran manufacturadora de árbol de levas para motores diesel, logró grandes avances en el calentamiento superficial mediante inducción magnética utilizando altas frecuencias y motogeneradores de 300

Hertz. Se puede decir que ésta compañía desarrolló la primera aplicación industrial en el calentamiento por inducción^[1].

De todos los métodos de calentamiento, el de inducción se puede utilizar en un amplio rango de aplicaciones, presenta un fácil control de temperatura y manejo. Nada parecido a los métodos de hornos de combustible fósil, la inducción puede proporcionar una rápida velocidad de calentamiento, mayor facilidad para ajustar sus variables, limpieza y condiciones silenciosas de trabajo. Además la inducción puede ser utilizada para calentamientos selectivos, tratamiento térmico y soldadura de metales.

El costo de la energía está determinado por el costo del combustible y la eficiencia total del sistema de calentamiento. En promedio, la electricidad cuesta 3.5 veces más que el gas natural. Sin embargo la eficiencia en los sistemas de calentamiento pueden mitigar esta diferencia en costo. La eficiencia es la relación de energía utilizada por el calentamiento a la energía aplicada al sistema. Para el calentamiento por inducción, las eficiencias son del 55 al 85 %. Para sistemas de hornos de gas con aislamiento, en los cuales hay pérdidas de calor a través de puertas, paredes y techos, las eficiencias son del 40 al 50 % ^[12].

El fenómeno electromagnético básico en un calentamiento por inducción, consiste de un voltaje alterno aplicado a una bobina de inducción, lo cual resultará en una corriente alterna en el circuito de la bobina. Esta corriente producirá a su alrededor un campo magnético variable que tiene la misma frecuencia que la corriente de la bobina. Este campo magnético induce corrientes de Eddy en la pieza a calentar localizada en el interior de la bobina. Estas corrientes inducidas tienen la misma frecuencia que la corriente de la bobina; sin embargo su dirección es opuesta. Estas corrientes producen calor por el efecto Joule (I^2R). Un sistema convencional de calentamiento por inducción que consiste de una pieza de trabajo rodeada por una bobina de varias vueltas es mostrada en la figura 1.17.

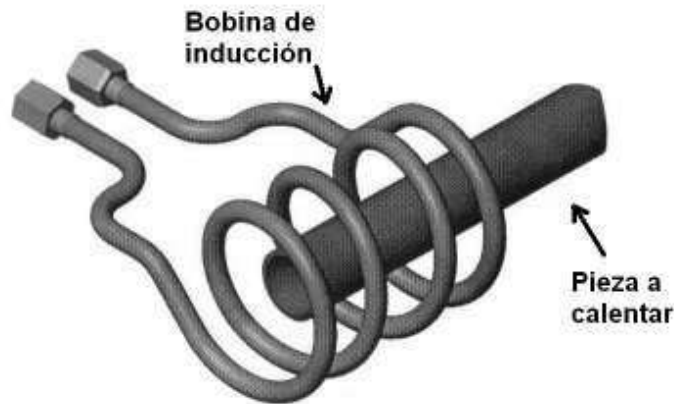


Figura 1.17. Sistema convencional de calentamiento por inducción que consiste de una pieza cilíndrica rodeada por una bobina de inducción de varias espiras^[13].

Sin embargo, estos sistemas tienen la desventaja de que no toda la energía que genera la máquina es transmitida a la pieza de trabajo, pero existen materiales que ayudan a aumentar esta eficiencia y que son llamados concentradores de flujo magnético, los cuales son colocados en la parte externa de la bobina y dirigen a puntos específicos las líneas magnéticas generadas por la bobina creando así una mayor concentración del campo magnético.

En el tratamiento térmico con calentamientos por inducción, los materiales más utilizados como concentradores de flujo magnético son de naturaleza magnética suave (imanes suaves), lo que significa que sólo son magnéticos cuando se induce sobre ellos un campo magnético. Como resultado de un campo magnético existente, estos materiales pueden cambiar su magnetización rápidamente sin mucha fricción. Una característica típica de este tipo de materiales es la de poseer un ciclo de histéresis alto, delgado y de área pequeña.

Los materiales magnéticos suaves, usualmente poseen poca anisotropía y con dominios orientados al azar. La orientación al azar corresponde a una configuración de mínima energía donde los efectos magnéticos de los dominios se cancelan entre sí, por lo tanto el resultado total es una magnetización de valor cero. Los dominios magnéticos pueden ser fácilmente reorientados aplicando un campo magnético externo. La dirección de

la reorientación de los dominios corresponde a la dirección del campo externo aplicado. En este caso el material magnético se comporta como un imán temporal, el material no acepta más energía magnética una vez que el nivel de saturación es alcanzado^[14].

1.3.2 Características magnéticas

Los concentradores de energía magnética (intensificadores de flujo) se han convertido en un conocimiento estándar en el tratamiento térmico por inducción. Materiales con una alta permeabilidad magnética y baja reluctancia (resistencia magnética) son comúnmente utilizados de manera similar a los núcleos de transformadores o motores eléctricos.

Una función tradicional de los concentradores magnéticos en el tratamiento por inducción ha sido la de mejorar la eficiencia de este proceso, además de producir un calentamiento selectivo en áreas específicas de la pieza de trabajo que son difíciles de calentar.

El aire, (permeabilidad relativa de 1) ofrece un camino difícil al paso del campo magnético generado por la bobina, por lo que, para optimizar el uso de las líneas de fuerza magnética alrededor de la bobina es necesario colocar un concentrador de flujo magnético que ofrezca una menor resistencia al paso del campo magnético. Este material deberá tener una reluctancia menor de 1. Cuanto mayor sea la permeabilidad del material que reemplaza el camino de las líneas magnéticas que se generan en la bobina, mayor será la eficiencia que se alcance en la operación del calentamiento por inducción.

Estudios experimentales^[15] han demostrado que la reluctancia que existe entre la pieza de trabajo y la bobina, en cualquier instalación de calentamiento por inducción, puede ser reducida usando concentradores de energía magnética fabricados con “materiales de alta permeabilidad magnética”.

Los concentradores de energía magnética presentan propiedades como alta permeabilidad magnética, baja fuerza coercitiva y baja pérdida por histéresis. Estas aleaciones tienen la cualidad de que al aplicarles un campo magnético, con facilidad y rapidez se magnetizan y desmagnetizan. En la tabla 1.3 se muestran diferentes materiales magnéticos con sus diferentes valores de permeabilidad relativa máxima, inductancia de saturación y campo coercitivo.

Tabla 1.3 Propiedades de materiales magnéticos suaves^[9].

Material	Permeabilidad relativa máxima	Inductancia de saturación (gauss)	Campo coercitivo (oersted)
Hierro puro 99.95%	5,000	21,400	0.9
Fe-3% Si (orientado)	50,000	20,100	0.09
Fe-3% Si (no orientado)	8,000	20,100	0.7
Permalloy 45 (55% Fe-45% Ni)	25,000	16,000	0.25
Superpermalloy (79% Ni-16% Fe-5% Mo)	800,000	8,000	0.006
Ferroxcube A6 (Mn, Zn)Fe ₂ O ₄		4,000	
Ferroxcube B2 (Ni, Zn)Fe ₂ O ₄		3,000	

La selección del material para un concentrador está en función de los siguientes factores:

1. Frecuencia utilizada.
2. Magnetización de saturación alta.
3. Permeabilidad magnética alta.
4. Campo coercitivo pequeño.
5. Remanencia pequeña.
6. Ciclo de histéresis pequeño.
7. Resistividad eléctrica alta.
8. Buena maquinabilidad.
9. Resistencia al ataque químico de los medios de temple.
10. Resistencia a las altas temperaturas^[9].

1.3.3 Ventajas

Con los adelantos tecnológicos de las máquinas de inducción, la bobina es el elemento que determina la eficiencia en una instalación. Sin embargo una base importante para el mejoramiento de las bobinas es el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías así como métodos y programas de simulación matemática de los procesos de calentamiento por inducción.

El uso de los concentradores de energía magnética presenta las siguientes ventajas:

- 1.- Mejora la calidad de tratamiento térmico debido al control del patrón de calentamiento, mejorando las propiedades físicas y metalúrgicas.
- 2.- Reduce el calentamiento indeseable y recocido en las partes adyacentes.
- 3.- Reduce el nivel de potencia requerida para obtener el calentamiento deseado en la pieza de trabajo.
- 4.- Mejora la eficiencia del proceso.
- 5.- Se reduce el costo de mantenimiento debido al ahorro de energía y reduce el número de partes rechazadas, retrabajadas y desechos.
- 6.- Alarga la vida del equipo.
- 7.- Reduce el tiempo de calentamiento y por consecuencia el tiempo de tratamiento.
- 8.- Elimina los efectos biológicos negativos por exposición a los campos electromagnéticos en humanos.
- 9.- Reduce esfuerzos en las bobinas.
- 10.- Reduce la distorsión y deformación en las piezas.

La figura 1.18 muestra de lado izquierdo el perfil de una bobina sin concentrador de energía magnética donde se aprecia cómo las líneas magnéticas se pierden al vacío y la concentración de calor o energía en la pieza de trabajo es mínima. En el lado derecho se muestra el perfil de una bobina que tiene instalado un concentrador de energía magnética observándose cómo las líneas magnéticas se dirigen hacia un área específica de la pieza de trabajo, evitando pérdidas de energía.

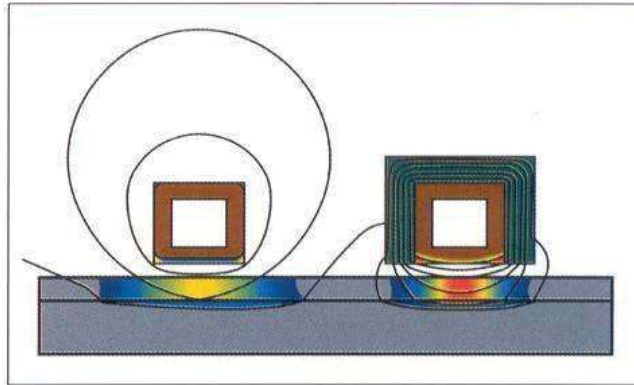


Figura 1.18 Líneas de campo magnético y fuente de calor para una bobina sin concentrador en la parte izquierda y una bobina con concentrador de flujo magnético en la parte derecha^[16].

La figura 1.19 muestra en el lado izquierdo el porcentaje de la potencia aprovechada en un equipo de calentamiento por inducción, empleando una bobina sin concentrador de energía magnética potencia aprovechada es de 51%. En el lado derecho se muestra la potencia, empleando una bobina con concentrador de energía magnética y en la cual se aprovecha un 75% de la potencia suministrada.

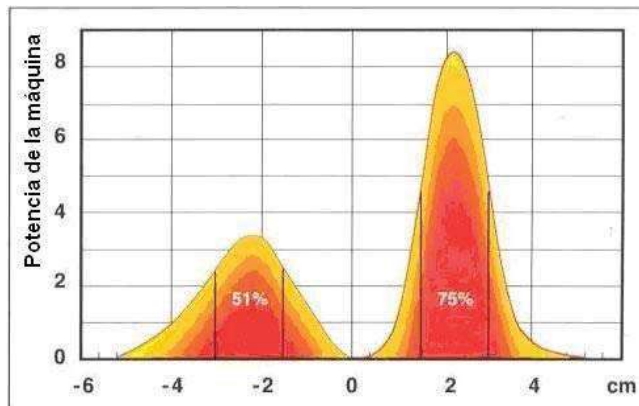


Figura 1.19 Comparación de la distribución de potencia a través de la pieza de trabajo^[15].

El material concentrador de energía magnética dirige a un punto específico los campos magnéticos generados (en el proceso de calentamiento por inducción), y se compone de polvos de hierro y ligantes que, cuando se mezclan, se compactan y sinterizan obteniéndose un material magnetodiéctrico, no conductor, con pocas pérdidas^[15].

1.3.4 Tipos de concentradores

Los concentradores de energía magnética usados en el tratamiento térmico por inducción, se clasifican en: a) Laminillas de acero al silicio; b) Ferritas puras y c) Materiales magnetodieléctricos, la figura 1.20 muestra las gráficas de su comportamiento.

Laminillas.- Son piezas manufacturadas de acero al silicio para ser instaladas en las bobinas, las cuales son troqueladas y siguen la forma de la bobina y por lo general lo cubren un 75%. Su principal rango de operación es por debajo de los 10 KHz. Existen laminillas de diferentes tipos incluyendo grano orientado de acero al silicio. El espesor de estas piezas es determinante para la aplicación de las diferentes frecuencias que se utilizan en el calentamiento por inducción, a mayores espesores (0.15 mm), su aplicación es para frecuencias mayores a 100 KHz. A menores espesores (0.05 mm), se emplean en frecuencias de entre 3 y 10 KHz. Las laminillas pueden trabajar a elevadas temperaturas si están protegidas contra la degradación química. Una de sus ventajas comparadas con la mayoría de los materiales concentradores es que tienen una alta permeabilidad magnética y densidad de saturación y son relativamente baratas.

Las laminillas son sensibles a atmósferas agresivas, lo cual conlleva a problemas de oxidación y degradación. La degradación de las propiedades magnéticas de las laminillas es causada por un incremento de la fuerza coercitiva y pérdida de histéresis. Debe tenerse cuidado con las esquinas ya que tienen una tendencia a sobrecalentarse debido a la terminación de los efectos electromagnéticos.

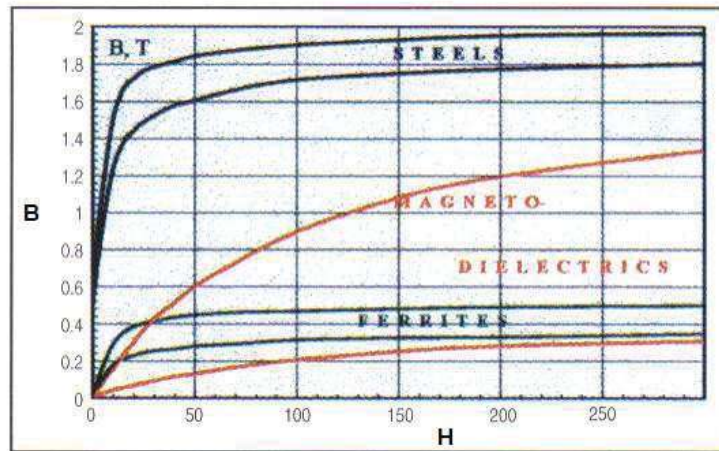


Figura 1.20 Curvas B-H para laminillas de acero al silicio, ferritas y materiales magneto dieléctricos utilizados en equipo de calentamiento por inducción_[16].

Ferritas. Son materiales cerámicos de estructuras densas de cerámica fabricadas mediante mezclas de óxido de hierro (Fe_2O_3) con óxidos o carbonatos de uno o más metales tales como el níquel, zinc o magnesio. Estos materiales son prensados y calentados en un horno a altas temperaturas y maquinados para colocarlos en la bobina. Las ferritas tienen alta permeabilidad magnética. Las desventajas de las ferritas son: quebradizos, tienen baja densidad de saturación, son sensibles a los choques térmicos y tienen baja maquinabilidad. Diferentes clases de ferritas se utilizan en rangos de frecuencia de 10 a 1000 KHz y son químicamente inertes.

Materiales Magnetodieléctricos. Estos materiales están fabricados con partículas magnéticas de hierro y un material dieléctrico el cual sirve como ligante y aislante dieléctrico de las partículas. Las propiedades magnéticas de estos materiales dependen de las propiedades de las partículas, su forma, su arreglo y deformación (presión de empaquetamiento). Las características mecánicas y térmicas dependen principalmente del tipo y cantidad de ligante. Existen dos clases de materiales magnetodieléctricos:

- (a) sólidos
- (b) moldeables

(a) Los materiales magnetodieléctricos sólidos se emplean para aplicaciones entre 1000 y 100,000 Hz y requieren maquinarse para obtener la forma de la bobina en la cual se va a instalar. Una de las ventajas de estos materiales es que tienen buena maquinabilidad, son estables a los choques térmicos y presentan alta resistencia a la oxidación provocada por elevadas temperaturas de los medios de temple. Una de sus desventajas es que son costosos.

Existen materiales aplicables para las condiciones particulares de frecuencia. Los materiales sólidos de baja frecuencia para aplicaciones en inducción, están hechos de polvos atomizados o electrolíticos (manufacturados mediante los métodos de atomización y depositación electrolítica de soluciones o sales fundidas) de aleaciones de hierro con un 2 a 10 % en peso de ligante. La permeabilidad y la saturación de inducción se elevan rápidamente cuando el porcentaje del ligante se reduce. Algunos tipos de materiales magnetodieléctricos poseen una permeabilidad inicial de 250 unidades o más. Simultáneamente aumenta la resistividad eléctrica, por lo que se debe de trabajar en el desarrollo del material para un particular campo de aplicación. Los materiales para altas frecuencias de inducción están manufacturados a partir de hierro carbonilo, con el fin de reducir las pérdidas por corrientes de Eddy, usualmente poseen un porcentaje de ligante mayor al 20 % en peso^[3].

En la manufactura de los materiales magnéticos suaves mediante la técnica de la metalurgia de polvos, se han empleado partículas de hierro, hierro-silicio, hierro-fósforo, hierro-níquel, lográndose una adecuada relación entre la permeabilidad magnética, magnetización de saturación, fuerza coercitiva y remanencia.

Existen varios productos en el mercado: fluxtrol, ferrotron, alphaform, todos ellos con buenas propiedades mecánicas, buena conductividad térmica y resistencias a temperaturas sobre los 350°C. Son químicamente inertes y pueden soportar el ataque de los medios de temple.

Los valores de la permeabilidad en la mayoría de las condiciones del calentamiento por inducción se encuentran en el rango de 15-100, con valores menores para materiales de alta frecuencia $f > 100$ KHz y valores altos para frecuencias bajas y medias $f < 30$ KHz.

Es importante mencionar que todos los materiales magnetodieléctricos sólidos poseen cierta anisotropía. La permeabilidad y flujo de saturación son mínimos en la dirección de prensado y son máximos en direcciones perpendiculares. El grado de anisotropía depende de la composición del material y la tecnología de manufactura. La anisotropía es significativa en materiales de baja frecuencia y es mínima en materiales de alta frecuencia. El diseñador de bobinas debe tomar en consideración dicha anisotropía para alcanzar los mejores resultados en aplicaciones de materiales magnetodieléctricos

(b) Materiales moldeables. Son materiales que se encuentran en el mercado en forma pastosa y están constituidos por partículas de hierro, un material dieléctrico y un catalizador sensitivo a la temperatura que pueden ser fácilmente moldeados e instalados en el contorno de la bobina dándole la forma requerida sin necesidad de un maquinado posterior. El secado de este material concentrador se realiza en un horno a una temperatura de 121°C y un tiempo de una hora y posteriormente se aumenta a 191°C por un tiempo de 30 minutos_[17].

Estos materiales presentan propiedades mecánicas y magnéticas inferiores a los sólidos maquinables, por lo que tienen mayores limitantes en su uso. Otra de las desventajas de este tipo de materiales es que son porosos y frágiles por lo que su manejo requiere un cuidado extremo.

En algunas aplicaciones, los concentradores moldeables son necesarios en la instalación de la bobina ya que éste presenta una geometría tal que un material sólido se tendrían dificultades en su instalación_[17].

1.3.5 Aleaciones y concentradores de energía magnética de Fe y Si

Los materiales magnéticos blandos de utilización más amplia son las aleaciones de hierro con un 3 a 5 % en peso de silicio. Inicialmente se empleaban aceros de bajo contenido de carbono para dispositivos de utilización energética de baja frecuencia (60 ciclos), tales como transformadores, motores y generadores. Sin embargo, en estos materiales las pérdidas de energía magnética son altas^[10].

La adición de 3 a 5 % en peso de silicio al hierro reduce las pérdidas magnéticas y las aleaciones Fe-Si presentan las siguientes ventajas^[10]:

1. El silicio incrementa la resistividad del acero de bajo carbono y, por consiguiente, reduce las pérdidas por corrientes parásitas.
2. El silicio reduce la energía magnetoanisotrópica del hierro e incrementa la permeabilidad magnética, haciendo disminuir de este modo las pérdidas por histéresis.
3. Las adiciones de silicio también disminuyen la magnetoestricción y reducen las pérdidas de energía por histéresis y el ruido del transformador (zumbido).

Sin embargo, el silicio disminuye la ductilidad del hierro, por lo tanto, sólo el 4 % de silicio puede alearse con el hierro. El silicio, además, baja la inducción de saturación y la temperatura de Curie del hierro.

Uno de los mayores intereses en el uso de concentradores es la confiabilidad de su instalación. Usualmente los concentradores son adheridos a la bobina y se colocan enfrente de la pieza que requiere una alta densidad de flujo magnético. Los concentradores son sometidos a los esfuerzos de tensión que se generan en las bobinas ocasionando una fractura y un desprendimiento que ocasionan una baja eficiencia de la bobina, reflejando un patrón de calentamiento y endurecimiento no-uniforme en la pieza de trabajo. Para prevenir

tales situaciones, los concentradores de flujo deben ser examinados cada 6000 ciclos y ser reparados de ser necesario. En algunos casos, pueden ser instalados sistemas de monitoreo especial para indicar cambios en la operación del concentrador.

La función de la bobina es “producir un campo magnético de intensidades y configuración prediseñada mediante la conversión de energía eléctrica a magnética”.

El campo magnético así generado induce en la pieza una fuerza electromotriz (voltaje inducido) que da origen a las Corrientes de Eddy produciendo un calentamiento intensivo de la pieza debido al efecto Joule.

La bobina debe generar el campo magnético necesario con un mínimo de pérdidas de energía. Las leyes del electromagnetismo establecen los parámetros de diseño de la bobina. La ley de Ohm define el voltaje (V_i) que debe ser aplicado a la bobina para provocar que una corriente requerida (I_i) fluya a través de la impedancia (Z_i).

$$V_i = Z_i I_i \quad (1.5)$$

Los campos magnéticos obedecen a leyes muy similares a los circuitos eléctricos. La corriente solo puede fluir en un circuito eléctrico cerrado que contenga una fuente de energía y las líneas de flujo magnético deben también ser cerradas, abrazando las espiras de la bobina. Las vueltas-amper ($I_i N$) son la fuente del campo magnético, ellas mueven el flujo magnético (Φ_i) a través de la resistencia magnética (reluctancia) (R_m) del circuito magnético cerrado.

La ley de Ohm para este caso es:

$$I_i N = R_m \Phi_i \quad (1.6)$$

A mayor reluctancia (R_m), debe ser mayor la corriente en la bobina para producir el mismo flujo magnético requerido para el calentamiento de una pieza específica.

No todo el flujo magnético (Φ_i) generado por la bobina, contribuye al calentamiento de la pieza, sino solo aquella (Φ_W) que fluye a través de la sección transversal de la pieza a calentar. El flujo magnético (Φ_s) en la discontinuidad de aire, causa un incremento en el voltaje de la bobina (kVA) que debe ser suministrado.

El requerimiento adicional de corriente (I_{ca}) para mover el flujo total (Φ_i) a través del patrón de reluctancia, es:

$$I_{ca} = \Phi_i R_{mo} = (\Phi_W + \Phi_s) R_{mo} \quad (1.7)$$

El esquema de la figura 1.21 permite calcular los parámetros de la bobina y evaluar la influencia de la geometría de un sistema sobre su eficiencia. La influencia de los concentradores de flujo magnético puede ser estudiada con una buena aproximación en la mayoría de las aplicaciones. La separación entre la pieza y la bobina conocida como “gap” juega un papel importante en la eficiencia del concentrador, a separaciones mayores de 3 mm la eficiencia baja considerablemente^[3].

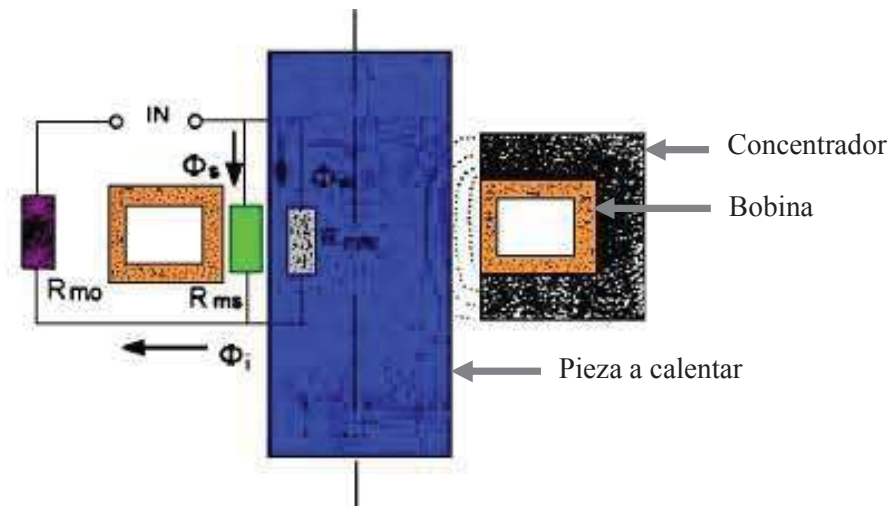


Figura 1.21 Circuito magnético de una bobina.

La reluctancia es proporcional a la longitud del patrón de flujo (L) y depende inversamente de su sección transversal (S) y de la permeabilidad del material (μ).

$$R_m = \frac{L}{(S \mu \mu_0)} \quad (1.8)$$

Donde (μ_0), es la permeabilidad magnética en el vacío.

La inserción de un concentrador en el espacio del flujo magnético en la periferia de la bobina, reduce drásticamente la reluctancia (R_{mo}) debido a la permeabilidad del material concentrador. Ver figura 1.21. Esto significa que para producir el mismo flujo que induce corrientes de Eddy sobre la pieza de trabajo, menos corriente debe fluir en la bobina provocando un calentamiento de la pieza.

El mismo flujo magnético significa que la misma intensidad de campo y densidad de potencia serán aplicadas sobre la superficie de la pieza de trabajo en la zona activa. El voltaje de la bobina será el mismo pero la demanda de corriente será reducida. Solo la parte de corriente que fluye sobre la superficie de la bobina frente a la pieza de trabajo, será ahora requerida para la generación de flujo magnético^[3].

1.4 Tratamientos térmicos

Son procesos que mediante el control y secuencia apropiados de la velocidad de calentamiento y enfriamiento del material, permiten modificar sus propiedades de manera que cumplan con requerimientos establecidos.

La obtención de las propiedades deseadas, se logran mediante el control de las transformaciones de fase y de las características microestructurales del material, que ocurren básicamente durante el enfriamiento de la pieza tratada.

1.4.1 Tratamientos térmicos y su importancia en la industria metal-mecánica

A finales de 1980 hubo un fuerte crecimiento en el desarrollo de los tratamientos térmicos, en especial en los tratamientos superficiales con un énfasis muy especial del endurecimiento superficial usando el calentamiento con energía eléctrica. En la siguiente lista se muestran los tipos de tratamiento y su porcentaje de aplicación^[18].

1.-	Tratamiento en atmósfera controlada	40%
2.-	Tratamiento en vacío	30%
3.-	Tratamiento por inducción	15%
4.-	Tratamiento por plasma	10%
5.-	Depósito en vacío	5%

Los sectores industriales de mayor aplicación se muestran en la siguiente lista^[18]:

1.-	Automotriz	25%
2.-	Metal-mecánica	25%
3.-	Herramientas	25%
4.-	Aeronáutica	10%
5.-	Otros	15%

Estas listas muestran la importancia que tienen los tratamientos y sus aplicaciones en los diferentes sectores específicos y en el desarrollo industrial de un país.

Con frecuencia las partes metálicas son tratadas térmicamente para alterar la microestructura o el patrón de esfuerzo residual para producir una condición final ventajosa. Las especificaciones pueden requerir cambios en la microestructura en un acero.

La definición aceptada para un tratamiento térmico de un metal o de una aleación es: “calentar y enfriar a un metal sólido o una aleación en una forma que se obtengan propiedades y condiciones específicas”. Procesos que alteran la forma del metal y la estructura, tales como los tratamientos termomecánicos o termoquímicos, caen dentro del

dominio de los tratamientos térmicos. Sería muy difícil imaginar que vida sería si las propiedades de los metales no pudieran ser alteradas en una variedad de formas a través del uso de los tratamientos térmicos.

Por lo general, casi todos los metales y aleaciones responden de alguna forma a los tratamientos térmicos. La respuesta de varios metales y aleaciones no significa que sea igual. Casi cualquier metal puro o aleación puede sufrir ablandamiento por medio de un ciclo de calentamiento y enfriamiento; sin embargo, el número de aleaciones que pueden ser endurecidas por tratamiento térmico es cada vez mayor^[19]

1.4.2 Clasificación de los tratamientos térmicos clásicos

Los tratamientos térmicos son un proceso importante en la industria de la manufactura, ya que permiten impartir al material las propiedades requeridas y deseadas para el buen funcionamiento y vida útil del producto.

Existe una gran variedad de tratamientos térmicos dependiendo del objetivo que se busque. Cada tratamiento debe ser diseñado para alterar las propiedades mecánicas que desean modificarse.

Todo tratamiento térmico consiste de tres etapas elementales^[20]:

- a) Un calentamiento controlado hasta la temperatura de tratamiento o de trabajo.
- b) Un periodo de tiempo a temperatura, llamado de homogeneización.
- c) Un enfriamiento controlado hasta la temperatura ambiente.

De acuerdo a lo anterior, los tratamientos térmicos clásicos se pueden clasificar en^[20]: (a)_ Recocidos; (b)_ Normalizados; (c)_ Temple y revenido; (d)_ Tratamientos especiales y (e)_ Tratamientos superficiales.

(a)_ Recocidos

Los tratamientos térmicos de recocido tienen por objetivo fundamental el de uniformizar la microestructura del material calentándolo hasta una temperatura de austenización (que depende de la composición química) y una vez que la temperatura se uniformiza se enfría lentamente hasta temperatura ambiente. Se recomienda que el enfriamiento sea dentro del horno (para el recocido clásico).

(b)_ Normalizados

El propósito del normalizado es aumentar la dureza del acero mediante una disminución en el tamaño de grano. Este tratamiento implica un calentamiento hasta el rango austenítico (temperatura mayor a la empleada en los recocidos) seguido de un periodo de homogeneización y un enfriamiento al aire, hasta temperatura ambiente.

(c)_ Temple y revenido

Este tipo de tratamiento térmico, en realidad considera la realización de dos tratamientos separados, primero uno de temple y el segundo de revenido. El temple consiste de una austenización seguida de un enfriamiento rápido, que se logra tradicionalmente, sumergiendo la pieza caliente en un líquido frío.

El objetivo del temple es endurecer el material mediante un cambio de fase conocido como “transformación martensítica”, es decir, la formación de martensita a partir de la austenita, lo que genera altas tensiones residuales y durezas elevadas que fragilizan el material, haciéndolo poco útil para la mayoría de las aplicaciones.

Para eliminar las tensiones residuales y disminuir la fragilidad del material ocasionadas por las altas durezas, el material o pieza templada se somete a un tratamiento

térmico de revenido que consiste de un calentamiento a temperaturas subcríticas, seguido de un enfriamiento lento.

Las piezas templadas y revenidas generan propiedades mecánicas excelentes de resistencia y ductilidad, así como de tenacidad.

Los materiales que aceptan este tratamiento, son aceros con un porcentaje de 0.25 a 0.55 % de carbono, y en las fundiciones de hierro gris el carbono varía de 3.10 a 3.50 % y en el hierro nodular varía de 3.40 a 3.80 % [18].

El temple fragiliza el material debido al cambio drástico en su estructura cristalina. En esta sección se da una explicación de este proceso de enfriamiento y los factores principales que lo afectan.

A velocidades de enfriamiento lentas o moderadas, los átomos de carbono pueden difundir hacia fuera de la estructura de austenita (f.c.c.), para transformarse en ferrita (b.c.c.) Esta transformación gama-alfa tiene lugar mediante un proceso de nucleación y de crecimiento y depende del tiempo. Con un aumento adicional en la velocidad de enfriamiento, no hay tiempo suficiente para que el carbono difunda de la solución, a pesar de que ocurra movimiento de los átomos de carbono, la estructura no puede llegar a ser b.c.c., puesto que el carbono queda atrapado en la solución. La estructura resultante llamada martensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo.

Dos dimensiones de la celda unitaria son iguales, pero la tercera está ligeramente extendida debido al carbono atrapado. Esta estructura reticular altamente distorsionada es la primera razón para la alta dureza de la martensita. Como los átomos de la martensita están menos densamente empaquetados que en la austenita durante la transformación, ocurre una expansión; sin embargo, durante la formación de la martensita, dicha expansión produce altos esfuerzos localizados que dan como resultado la deformación plástica de la matriz. Después de un enfriamiento drástico, la martensita aparece microscópicamente

como una estructura blanca acicular o tipo aguja, descrita algunas veces como un haz de pajitas^[20].

El propósito básico del temple es producir una estructura totalmente martensítica, y la mínima velocidad de enfriamiento que evitará la formación de cualquiera de los productos más suaves de transformación se conoce como “velocidad crítica de enfriamiento”; y está determinada por la composición química y el tamaño de grano austenítico. Adicionalmente, esta velocidad se considera como una propiedad importante de un acero, ya que indica qué tan rápido debe enfriarse un acero para formar 100% martensita.

(d)_ Tratamientos especiales

Una de las desventajas con el tratamiento de temple y revenido es la realización de dos tratamientos para alcanzar las propiedades deseadas. Con el objeto de integrar los dos tratamientos mencionados en uno solo, se desarrollaron dos tipos de tratamiento térmico que generan resultados equivalentes al clásico de temple y revenido. Estos tratamientos son conocidos como “Especiales” y son: (a)_ Martemplado y (b)_ Austemplado. A continuación se presenta una descripción de ambos tratamientos.

(d.1)_ Martemplado

La característica del martemplado consiste en que después de llevar el material a la temperatura de austenización, el enfriamiento generalmente se detiene en una temperatura ligeramente superior a la de inicio de transformación martensítica (M_s). El objetivo de interrumpir el enfriamiento es lograr que la superficie y el centro igualen su temperatura antes de que ocurra la transformación de austenita a martensita. Esta igualación de temperatura asegura que la superficie y el centro de la pieza tendrán una temperatura semejante cuando ocurra la transformación martensítica y de esta manera, los esfuerzos

residuales serán mínimos disminuyendo así la distorsión y fisuración. Para iniciar la transformación martensítica, la segunda etapa del enfriamiento se realiza en aire hasta temperatura ambiente. El enfriamiento lento en aire ayuda a que la velocidad de enfriamiento del centro y la superficie sean casi iguales. El tratamiento térmico termina cuando la pieza es revenida para obtener la dureza deseada.

(d.2)_ Austemplado

Consiste en austenizar el material y posteriormente enfriarlo rápidamente en sales fundidas hasta una temperatura justo antes de la transformación martensítica. La temperatura se mantiene constante por un largo tiempo para permitir la transformación isotérmica de la austenita en bainita. Una vez que se obtiene una estructura completamente bainítica, se enfría en aire quieto y no requiere revenido.

Estos tratamientos térmicos especiales muestran ventajas sobre el tratamiento clásico de temple y revenido tales como: menor riesgo de distorsiones y fisuras debidas a las contracciones en la pieza que ocurren durante el enfriamiento. Así mismo, existen desventajas tales como: requiere un control más preciso de las temperaturas y tiempos de enfriamientos; se debe contar con un medio de enfriamiento (baños de sales) a cierta temperatura lo cual también repercute en el costo del proceso.

(e)_ Tratamientos superficiales

Este tipo de tratamiento térmico ha sido diseñado para alterar las propiedades mecánicas exclusivamente de la superficie del material y en especial para incrementar la dureza de la superficie y por consecuencia, la resistencia del material. Este incremento en la dureza de la superficie, hace que el centro de la misma sea más suave y tenaz. Estas características hacen que las piezas así tratadas, tengan una gran variedad de aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste en la superficie.

Los tratamientos térmicos superficiales son^[20]: (a)_ Carburización; (b)_ Nitruración; (c)_ Carbonitruración; (d)_ Endurecimiento a la flama y (e)_ Endurecimiento por inducción. Es de observarse que los dos últimos tratamientos (d,e), no involucran cambio en la composición química y su diferencia estriba en la forma del calentamiento.

1.4.3 Calentamiento por inducción

Este proceso depende, para su operación, del calentamiento localizado que producen las corrientes de Eddy inducidas en un metal y el efecto de histéresis bajo la acción de un campo magnético rápidamente cambiante el cual es proporcionado por una bobina, la cual aplica sobre la pieza el campo magnético necesario para la generación de la corriente inducida que producirá el calentamiento y está acoplada a una máquina de inducción de alta frecuencia^[21]. Las corrientes inducidas de alta frecuencia tienden a viajar por la superficie del metal, lo cual se conoce como “efecto de piel”; por lo tanto, es posible calentar una capa poco profunda del acero sin calentar el interior. La figura 1.22 muestra una bobina acoplada a una rueda de cadena y el área a ser calentada.

La superficie dura obtenida mediante endurecimiento por inducción es similar a la que se obtiene mediante endurecimiento por flama, y es posible obtener capas endurecidas más delgadas.

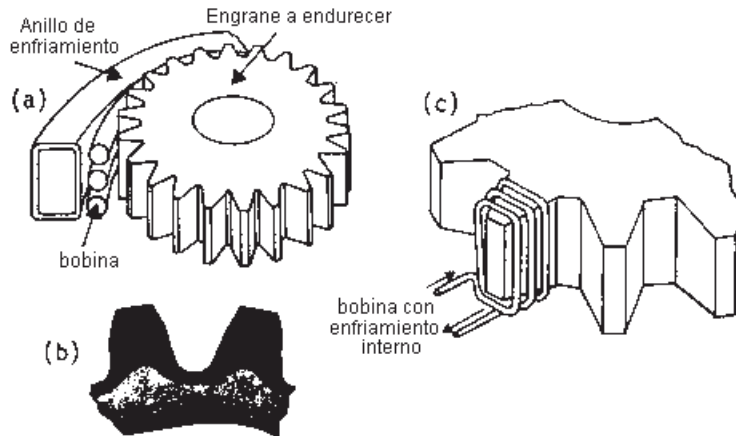


Figura 1.22 Endurecimiento por inducción de los dientes de una rueda de cadena en su etapa de calentamiento: (a) bobina en forma de solenoide y una ducha concéntrica alrededor de los dientes los cuales serán endurecidos por el método de disparo único, (b) esquema de un patrón de endurecimiento realizado por inducción a un engrane, (c) endurecimiento de un engrane realizado diente por diente^[22].

1.4.4 Mecanismo de eliminación de calor durante el temple

La estructura, dureza y resistencia resultantes de una operación de tratamiento térmico de temple, se determinan por la velocidad de enfriamiento real del proceso de temple. Si la velocidad de enfriamiento real es menor que la velocidad crítica de enfriamiento, la pieza no endurecerá completamente. A menor velocidad real de enfriamiento, los productos de transformación serán más blandos y la dureza menor. En este punto, es necesario entender el mecanismo de eliminación de calor durante el temple^[20].

En vez de mostrar una rapidez de enfriamiento constante durante todo el temple, la curva de enfriamiento muestra tres etapas. Ver figura 1.23:

Etapa A: Estado de enfriamiento por medio de una “capa de vapor”. En esta etapa la temperatura del metal es tan alta que el medio de temple se vaporiza en la superficie del metal caliente. El enfriamiento se realiza por **conducción y radiación** a través de la

película gaseosa y, como las partículas de vapor son pobres conductores de calor, la velocidad de enfriamiento es relativamente lenta a través de esta etapa.

Etapa B: enfriamiento por “transporte de vapor”. Esta etapa empieza cuando el metal se ha enfriado a una temperatura tal que la película de vapor ya no es estable. Lo mojado de la superficie del metal por el medio de temple produce una violenta ebullición. El calor se elimina del metal muy rápidamente como calor latente de vaporización. Esta etapa es la más rápida del enfriamiento.

Etapa C: “Enfriamiento por medio de líquido”. Esta etapa empieza cuando la temperatura de la superficie del metal alcanza el punto de ebullición del líquido en temple. Ya no se forma más vapor, de modo que el enfriamiento se efectúa por conducción y por convección a través del líquido. La velocidad de enfriamiento es la más lenta en esta etapa.

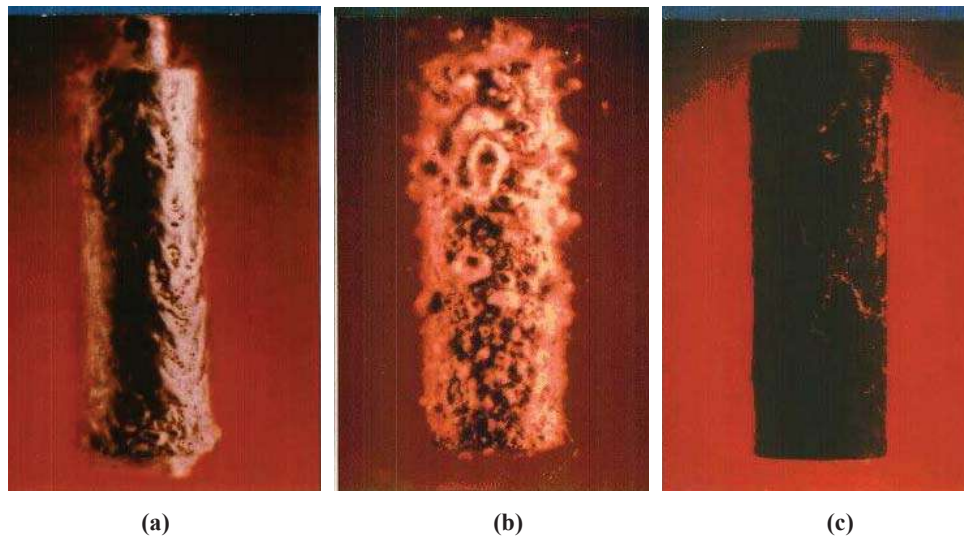


Figura 1.23 Etapas de eliminación de calor durante el temple de una pieza enfriada con un refrigerante de base polimérica. a) En el momento de inmersión se forma una capa gaseosa alrededor de la superficie de la pieza templada; b) Después de 5 segundos, ocurre la ebullición sobre toda la superficie; c) Después de 10 segundos la película se ha disuelto y la eliminación de calor es completada por conducción y convección^[23].

1.4.5 Medio de temple

El medio de temple ideal (figura 1.24) mostraría una alta velocidad de enfriamiento inicial para evitar la transformación en la región de la nariz del diagrama TTT y luego una lenta velocidad de enfriamiento para todo el intervalo inferior de temperatura a fin de homogeneizar la temperatura y minimizar la distorsión. Desafortunadamente, no hay un medio de temple que muestre estas características ideales. Los siguientes medios de temple industriales se enumeran en orden de disminución de la severidad de temple^[24].

1. Solución acuosa del 10% de cloruro de sodio (salmuera)
2. Agua más polímero
3. Sales fundidas o líquidas
4. Aceite soluble y soluciones acuosas
5. Aceite
6. Baños de plomo
7. Aire
8. Arenas

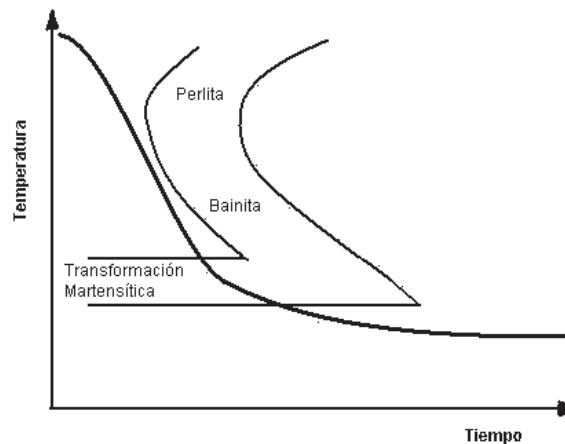


Figura 1.24 Caso ideal de enfriamiento durante el temple mostrando una alta velocidad de enfriamiento inicial para evitar la transformación de estructuras suaves y después un lento enfriamiento para homogeneización de la temperatura y evitar la distorsión.

1.5 Diseño de bobinas de inducción

La utilización de bobinas de inducción se justifica debido a que permite calentar en un área específica, de forma rápida y altamente repetitiva, lo cual no sería posible empleando métodos convencionales.

En la fabricación de componentes automotrices de acero que sufren esfuerzos de tensión, compresión y desgaste, el “tratamiento por inducción” juega un papel importante en el buen funcionamiento y en la vida de dichos componentes. Para lograr las características metalúrgicas especificadas, cada pieza es templada con una bobina especial donde las consideraciones básicas de diseño son la geometría de la pieza y las características metalúrgicas del área a templar.

De cierta manera, el diseño de bobinas se basa en gran cantidad de datos empíricos y su desarrollo ha avanzado gracias a análisis teóricos de varias geometrías de bobinas simples. Debido a esto, el diseño de bobinas está basado generalmente en la experiencia.

1.5.1 Consideraciones en el diseño de bobinas.

Para lograr un calentamiento uniforme en el área a calentar, es importante que la bobina se diseñe de acuerdo a la geometría específica de la pieza. Las consideraciones de diseño deben de tomar en cuenta: a) la forma de calentamiento, b) el movimiento relativo entre la bobina, c) la pieza de trabajo y d) el índice de producción. Debido a que el patrón de calentamiento revela la forma de la bobina, su geometría es el factor más importante. Si una pieza es necesitada cada 30 seg pero se requieren 50 seg para calentarla, será necesario calentar dos piezas a la vez para encontrar la producción necesaria. Tomando estas consideraciones, es importante observar un amplio rango de tipos de bobinas para encontrar la más apropiada [11].

Existen bobinas uniespira y multiespira con ducha integrada o separada, la cual va en función del espacio existente en la máquina, producción requerida y características de dureza en la pieza de trabajo.

Las principales consideraciones que deben tomarse en cuenta en el diseño de bobinas para una eficiente inducción de calor pueden resumirse de la siguiente manera:[11]

1.- Para obtener una máxima transferencia de energía, la bobina debe ser colocada a la pieza de trabajo lo más cerca posible. Es deseable que la mayor cantidad de líneas de flujo intercepten la pieza de trabajo en el área a ser calentada. Entre más denso el flujo en este punto, más alta será la corriente generada en la pieza.

2.- El mayor número de líneas de flujo en una bobina solenoide deben ser concentradas hacia el interior, para que el máximo calor sea en el centro.

3.- Debido a que el flujo es más concentrado cerca de la bobina y decrece conforme se aleja, el centro geométrico de la pieza tiene una densidad de flujo menor. Si la pieza estuviera colocada fuera del centro de la bobina, el área más cercana a las espiras de la bobina interceptará un mayor número de líneas de flujo y por lo tanto tendrá un mayor calentamiento y disminuirá conforme la pieza este más alejada; este patrón de calentamiento es mostrado esquemáticamente en la figura 1.25

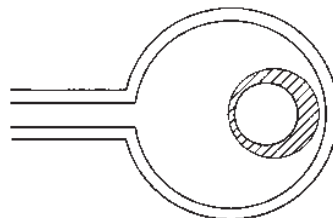


Figura 1.25 Forma del calentamiento por inducción producido en una barra sólida colocada fuera del centro de una bobina [11].

4.- La bobina debe ser diseñada para prevenir la cancelación del flujo del campo de inducción, por ejemplo, en la bobina de la izquierda de la figura 1.26 no tiene inductancia debido a que los lados opuestos de la bobina están muy cerca uno del otro. Agrandando los

lados opuestos de la bobina, se creará inductancia. Entonces la bobina calentará la pieza colocada en el centro. El diseño de la derecha provee más inductancia y es más representativo como un buen diseño.

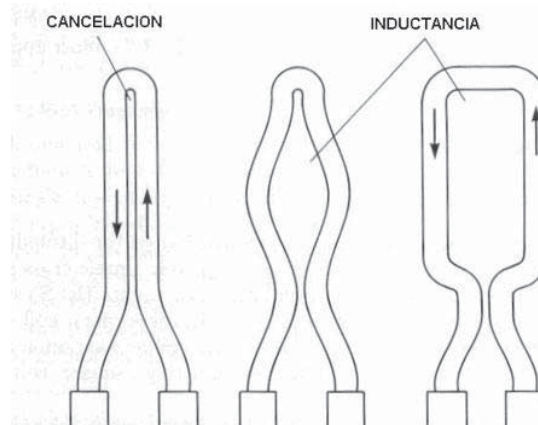


Figura 1.26 Efecto del diseño en la inductancia [11]

Adicionalmente, para proveer una exposición más uniforme del flujo magnético, la pieza debe ser rotada para obtener un calentamiento más homogéneo.

Debido a los principios antes señalados, algunas bobinas pueden transferir energía a una pieza según su capacidad para concentrar el flujo magnético en el área a calentar. Por ejemplo, tres bobinas que proveen diferentes formas de calentamiento son:

- Una bobina helicoidal con la pieza de trabajo o área a calentar localizada dentro de la bobina y por lo tanto, en el área de mayor flujo magnético.
- Una bobina plana donde solo el flujo de una de sus superficies intercepta la pieza de trabajo.
- Una bobina interna para calentamientos internos, donde solo el flujo del lado de afuera es utilizado.

En general, las bobinas helicoidales tienen los más altos valores de eficiencia y las bobinas para interiores tienen los más bajos valores.

Los parámetros de diseño que se deben considerar en la fabricación de una bobina son:

- a) Geometría de la pieza y forma de la bobina
- b) Frecuencia
- c) Potencia
- d) Tiempo de ciclo
- e) Separación entre pieza y bobina
- f) Sistema de templado

a) Geometría de la pieza y forma de la bobina

La geometría de la pieza de trabajo y su patrón de endurecimiento son dos de los mayores factores que determinan la forma de la bobina. Por ejemplo algunos patrones de dureza pueden ser obtenidos con una bobina de una sola espira. El tiempo de ciclo decidido puede ser obtenido con una forma particular de bobina que puede ser de disparo sencillo, uniespira, multiespira o bien con un sistema de calentamiento por desplazamiento de la pieza.

b) Frecuencia

La frecuencia es el número de ciclos por segundo a la cual se ve sometida la pieza de trabajo. En el calentamiento superficial por inducción, la frecuencia requerida es determinada por la profundidad y patrón de calentamiento.

El comportamiento de la frecuencia con respecto a la profundidad de calentamiento se muestra en la tabla 1.5

Tabla 1.5 Frecuencias y profundidades de calentamiento utilizadas para un acero SAE 1045^[25]

Frecuencia KHz	Profundidades de calentamiento (mm)
450	1.143 – 2.286
10	2.540 – 7.620
1-3	8.890 – 12.700

Por lo que se puede decir que a frecuencias altas, se obtienen profundidades de calentamiento bajas y a frecuencias bajas, las profundidades de calentamiento serán mayores.

c) Potencia

La potencia de la máquina de inducción es una de las principales variables que se modifican al realizar un ajuste en el ciclo de calentamiento. Al aumentar la potencia nos aumenta la penetración de calentamiento, por el contrario al disminuirla, el calentamiento será más superficial.

La potencia requerida (tabla 1.6) para calentar un área superficial determinada de la pieza de trabajo, es aproximadamente de 0.0077 a 0.0232 Kw/mm².

Tabla 1.6 Potencias y profundidades de calentamiento utilizadas para un acero SAE 1045^[25]

Potencia Kw	Profundidades de calentamiento (mm)
100	1.143 – 2.286
250	2.540 – 7.620
350	8.890 – 12.700

d) Tiempo de calentamiento

El tiempo de calentamiento está determinado por la profundidad o espesor de la pieza que se desea calentar y van desde milisegundos hasta minutos, logrando con ello un patrón de calentamiento específico. A pequeños tiempos de calentamiento, menor profundidad de calentamiento, por el contrario, a tiempos mayores, grandes profundidades de calentamiento.

e) Separación entre pieza y bobina

La separación entre la bobina y pieza de trabajo juega un papel importante en la eficiencia del proceso de calentamiento, ya que a grandes distancias de separación entre pieza y bobina se pierde energía magnética lo cual se refleja en un pobre calentamiento. Por el contrario, a distancias pequeñas, se obtienen elevados patrones de calentamiento. Sin embargo, se pueden originar contactos físicos entre pieza y bobina trayendo como consecuencia cortos circuitos que ocasionan daños en la bobina. La tabla 1.7 proporciona valores ideales de separación.

Tabla 1.7 Separaciones típicas de la pieza de trabajo con la bobina a varias frecuencias de calentamiento.^[25]

	Frecuencia (KHz)		
	1 – 3	10 - 25	50 - 450
Separación (mm)	7.620 – 3.810	3.810 – 2.540	< 1.524

f) Sistema de templado

El sistema de enfriamiento de la pieza de trabajo es una característica elemental en el diseño de la bobina. El temple debe diseñarse para remover el calor rápidamente y desarrollar la dureza y microestructura deseada en el metal. Un templado deficiente trae

como consecuencia bajas durezas y microestructuras del tipo perlítico y bainítico. Templados irregulares provocan que los problemas de distorsión aparezcan.

El sistema de templado será mejor si la pieza de trabajo está girando durante el proceso, con esto se asegura una uniformidad en el templado.

El punto de choque deberá tener una rápida velocidad de enfriamiento que un área que es templada con un fluido de temple de menos severidad.

Se requieren pequeños orificios para agitar el baño y prevenir desarrollos de cavidades de vapor. El tamaño del orificio está relacionado al diámetro de la pieza. Ver tabla 1.8.

Tabla 1.8 Tamaño de los orificios con respecto al diámetro de la pieza.^[25]

Diámetro de la pieza (mm)	Tamaño del orificio (mm)
6.350 – 12.700	1.168 – 1.600
12.700 – 38.100	1.600 – 2.387
> 38.100	3.175 – 3.962

El flujo total del baño puede ser calculado con la figura 1.27

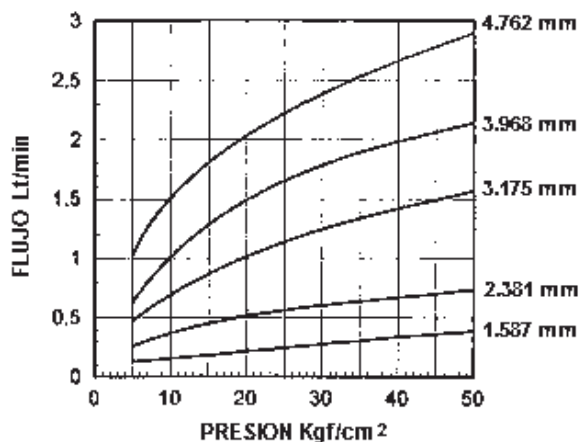


Figura 1.27 Flujos para un orificio de templado.^[25]

La temperatura del baño de temple es crítica, por lo cual se le agrega un polímero entre 2 y 8% en volumen que ayude a que el temple sea más moderado. En la mayoría de los procesos de inducción, las temperaturas requeridas del agua varían entre 25 a 35 °C, puesto que de otra manera, baños muy fríos son causa de fisuras y distorsiones. Por otro lado el uso de baños muy calientes se manifiesta como una disminución de la dureza.

1.5.2 Materiales para la fabricación de bobinas

Debido a que las bobinas requieren tener alta conductividad eléctrica, ser costeables y presentar buena maleabilidad para su construcción, se emplea en su fabricación cobre electrolítico libre de oxígeno. Este material también proporciona una vida más prolongada de las bobinas en comparación de los que se fabrican de cobre comercial.

Las bobinas se construyen de tubos y placas de cobre, como accesorios adicionales llevan tornillería y soportes de acero inoxidable amagnético y materiales aislantes como láminas de teflón, esto para aislar el paso de la corriente eléctrica y evitar un corto circuito.

1.5.3 Selección de la tubería

Las bobinas que se utilizan en el calentamiento de las piezas pueden ser de diferentes perfiles dependiendo del área a calentar, siendo estos de formas cuadradas, redondas, rectangulares o bien un diseño especial, los espesores de la tubería de las bobinas se muestran en la tabla 1.9

Tabla 1.9 Espesores de la pared de cobre con respecto a la frecuencia [25].

Espesor de la pared de cobre (mm)	Frecuencia de la máquina (KHz)
0.812 – 1.219	50 - 450
1.651 – 2.286	8,3 - 25
3.175 – 3.962	3 - 10
3.962 – 6.350	1 - 3

1.5.4 Enfriamiento interno de las bobinas

Las bobinas tienen venas de enfriamiento internas para remover el calor generado durante el proceso de calentamiento, el fluido que circula es agua desmineralizada o tridestilada con el fin de eliminar las sales o iones que provoquen bloqueos con el tiempo. La temperatura de ésta agua se recomienda que esté dentro de los 18 a 24 °C y a una presión entre 60 y 110 lb/plg².^[11]

Capítulo 2

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es describir el procedimiento y los experimentos realizados para lograr el objetivo de este trabajo, “la fabricación de un concentrador de energía magnética”, mencionando el equipo utilizado.

Los materiales concentradores de energía magnética han mejorado de manera muy importante la etapa del calentamiento de piezas que son sometidas a “tratamiento térmico de temple por inducción”^[3]. Estos materiales de desarrollo reciente, se componen principalmente de polvos de hierro y pequeños porcentajes de silicio que varían entre el 1 y 5 %^[9].

En el presente trabajo se determinaron las influencias de dicho elemento sobre las propiedades magnéticas y eléctricas de los mismos. Para este objeto, se prepararon una serie de muestras de diferentes contenidos de silicio sometiéndose posteriormente a una serie de análisis los cuales se detallan más adelante.

Considerando los principios de la tecnología de la metalurgia de polvos, se prepararon una serie de polvos y se sometieron a procesos de mezclado, compactado y sinterizado. Posteriormente se realizó una serie de pruebas magnéticas, eléctricas y mecánicas seguidas de un maquinado. Finalmente, para determinar la efectividad del material, éste se colocó en una bobina inductora y se realizó una serie de tratamientos térmicos de temple, que incluye una etapa de calentamiento por inducción magnética de una leva automotriz. El procedimiento experimental se muestra en la figura 2.1.

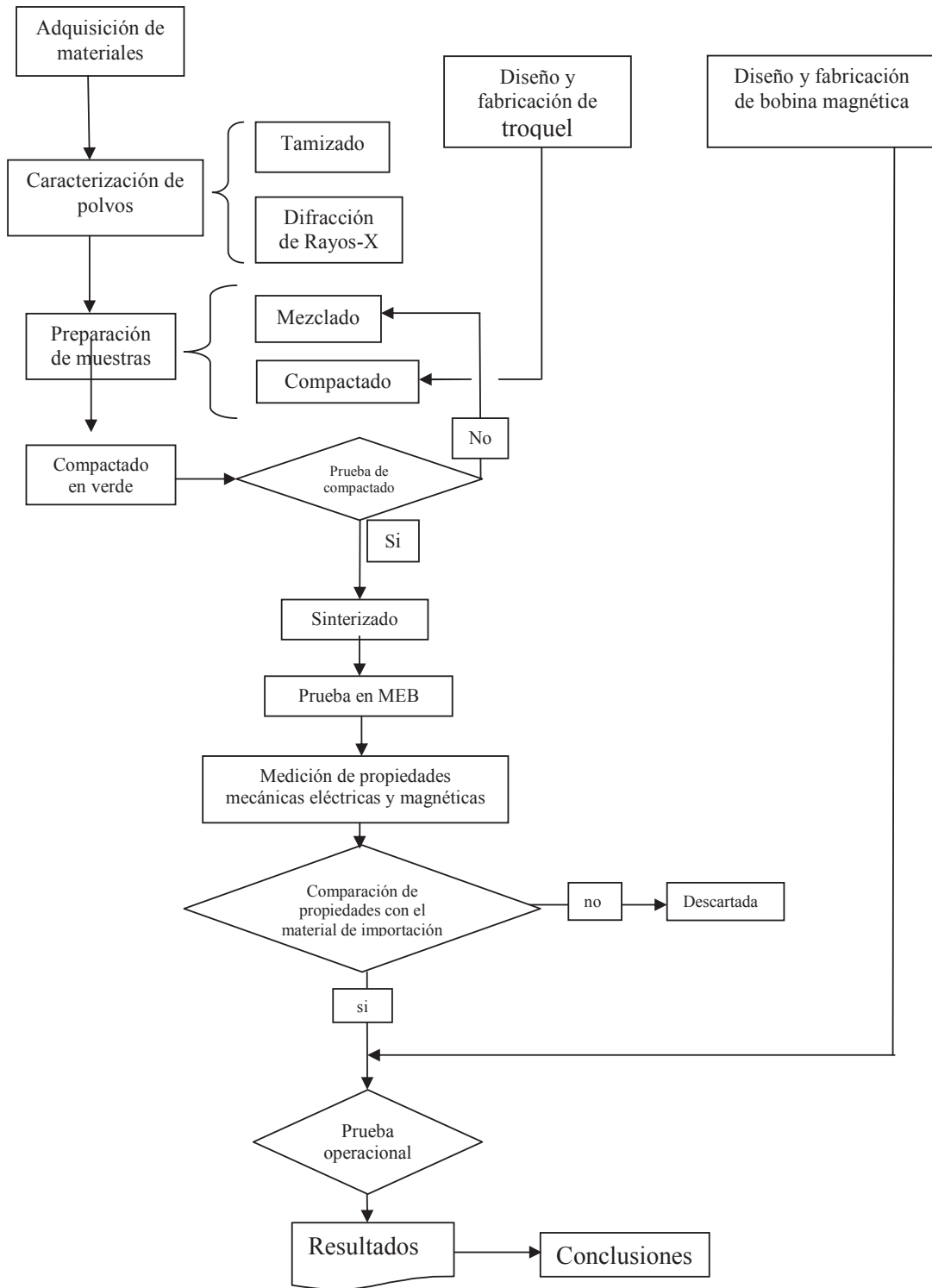


Figura 2.1 Diagrama de flujo del procedimiento experimental

El objetivo de la prueba operacional descrita en el párrafo anterior, es comparar el concentrador de energía magnética fabricado con materias primas nacionales y de fácil obtención, con uno importado llamado “Fluxtrol”, valorando en forma comparativa cada una de sus propiedades.

Con lo anterior, se podrán determinar las variables del proceso de manufactura del concentrador magnético, así como el mejoramiento en los parámetros del temple por inducción: a) tiempo de calentamiento y b) potencia consumida. Adicionalmente se obtendrá información suficiente para desarrollar un material concentrador de energía magnética con materias primas mexicanas.

La figura 2.2 muestra esquemáticamente el procedimiento experimental para la obtención de las muestras, indicado en el diagrama de flujo.

2.2 Experimentación

2.2.1 Materiales empleados.

Los materiales empleados en el presente trabajo experimental fueron:

- a) Polvo de hierro. con una pureza de 97% y un tamaño de partícula de 40 a 180 μm . obtenido de la empresa “Productos Químicos Monterrey S. A.”
- b) Silicio puro (en briqueta con un grado de pureza de 99.3%).
- c) Polímero líquido “Araldit M”, de la marca Ciba-Geigy (utilizado en recubrimientos de alta calidad como elemento matriz de materiales compuestos), adquirido en la empresa “Recubrimientos y Resinas de Querétaro S.A. de C.V.”
- d) Endurecedor líquido NY-956 la marca Ciba-Geigy. El cual se caracteriza por presentar un “curado” rápido ofreciendo una buena resistencia química y se emplea como recubrimiento en metales. El endurecedor fue adquirido de la compañía “Recubrimientos y Resinas de Querétaro S. A. de C. V.”
- e) Ácido esteárico en polvo, utilizado como lubricante.
- f) Acetona líquida.

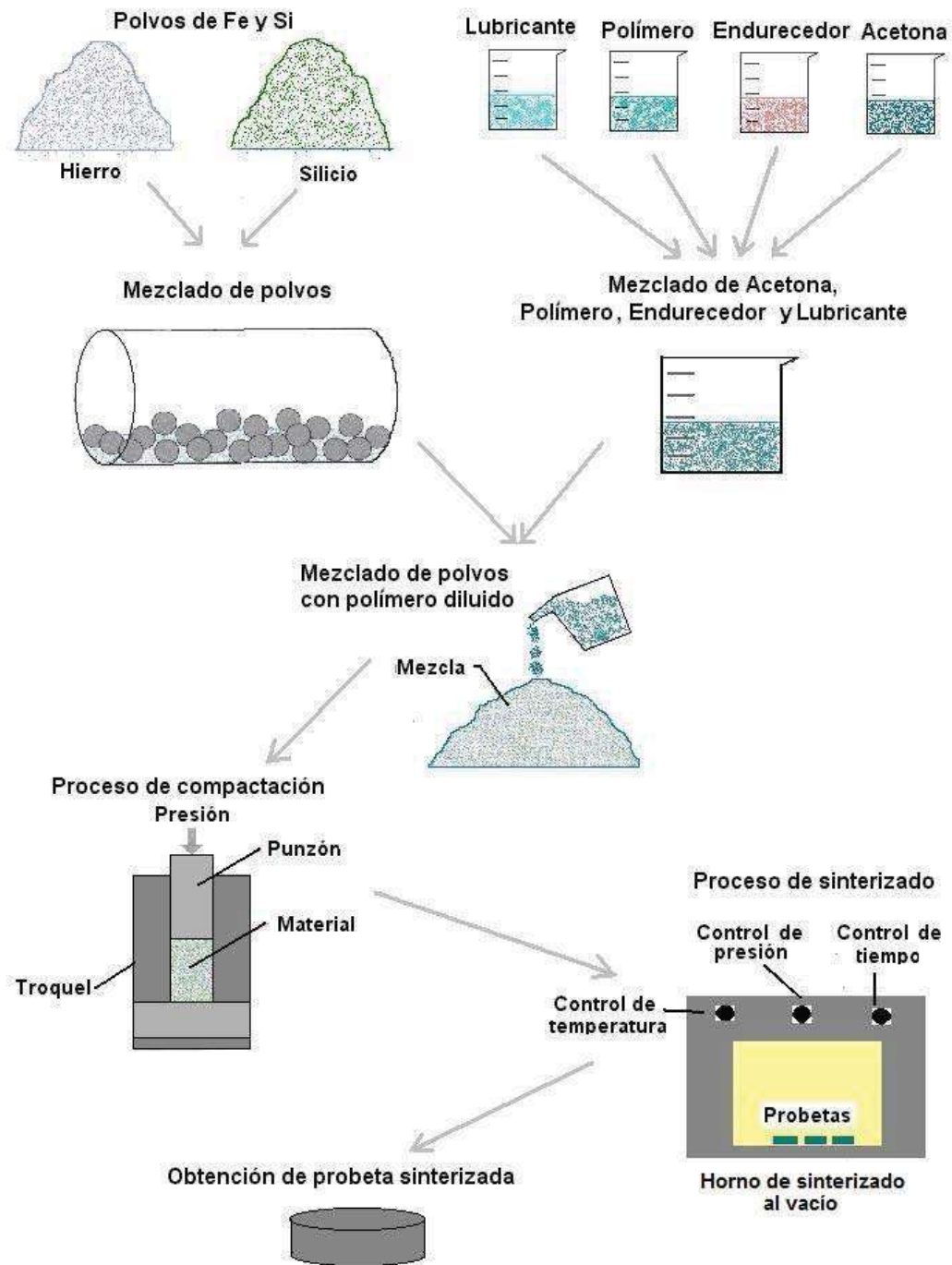


Figura 2.2 Representación esquemática de la obtención de las muestras a partir de los polvos metálicos.

2.2.2 Caracterización de los polvos

La caracterización de los polvos de hierro y silicio se efectuó mediante una clasificación por tamaño de partícula empleando un proceso de tamizado y análisis de difracción de Rayos-X. Los resultados de esta etapa se presentan en la sección de resultados, complementando dicha caracterización con fotomicrografías.

El análisis de difracción de Rayos-X se realizó en un difractómetro SIEMENS, modelo D-5000, operando a 30 KV y 30 mA de radiación monocromática de cobre $K\alpha$.

2.2.3 Diseño del troquel

Simultáneamente a la caracterización de los polvos, se diseñó y fabricó un troquel para compactar los polvos aplicando una presión axial y producir las probetas necesarias del material concentrador de energía magnética. El troquel dispone de una cámara de compactación cilíndrica para recibir el polvo y ser compactado uniaxialmente utilizando un punzón cilíndrico. Para la extracción de la muestra compactada se cuenta con una barra de sección transversal cuadrada deslizable, para dejar libre la parte inferior de la cámara de compactación.

El troquel mostrado en la figura 2.3 fabricado con un acero SAE 4140 templado, con las siguientes características: (a) sencillo de manejar; (b) fácil de desensamblar; (c) empleo de materiales comerciales.

El troquel con las características dimensionales que se mencionan en el anexo B permitió obtener muestras de polvo compactado con la geometría adecuada y requerida para el procesamiento subsecuente.

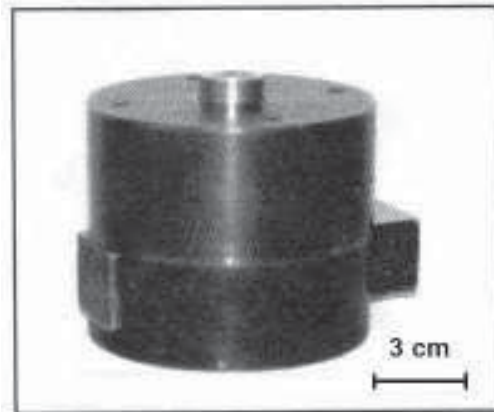


Figura 2.3 Troquel utilizado en el proceso de compactación.

Igualmente; para cumplir con los objetivos del proyecto, se tuvo la necesidad de diseñar y fabricar un inductor (bobina) magnético, para realizar las pruebas de funcionamiento del concentrador, en una operación real de calentamiento por inducción.

2.2.4 Diseño de la bobina de inducción

Una de las características de los calentamientos por inducción magnética es la compatibilidad geométrica entre la bobina y la pieza a calentar, lo que significa que la bobina se diseña y fabrica específicamente de acuerdo a la geometría de la pieza. Por esta razón, se diseñó y fabricó una bobina adecuada para una “leva automotriz” de geometría sencilla.

Para elevar la eficiencia del campo magnético, la bobina debe revestirse con el concentrador y por tal motivo, éste tiene que ser maquinado de manera tal que se ajuste a la geometría de la bobina, puesto que ésta determina el perfil de calentamiento.

La bobina debe instalarse en la máquina de inducción para que se realice el tratamiento térmico de temple. Este tratamiento implica el enfriamiento rápido desde la

temperatura de temple por lo que se debe contar con un sistema de enfriamiento que esté de acuerdo a la geometría de la pieza para aplicar el refrigerante y en consecuencia con el enfriamiento de la misma, de forma adecuada. Para lograr un enfriamiento eficiente se colocó una “ducha” de dimensiones adecuadas en la parte superior de la bobina.

Con la intención de evitar un calentamiento indeseable en la bobina durante el proceso de tratamiento térmico de temple; se diseñó un sistema de enfriamiento interno que consiste en una “vena” de enfriamiento a través de la bobina (figura 2.4).

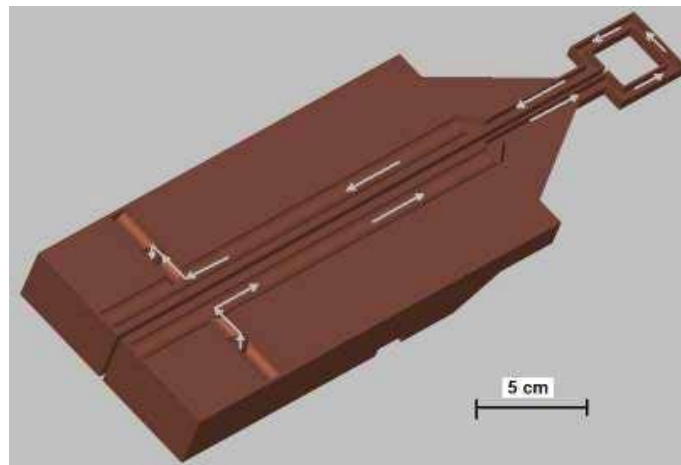


Figura 2.4 Corte longitudinal de la bobina indicando el sistema de enfriamiento interno y la dirección de flujo del refrigerante.

En la figura 2.5 se muestra en detalle el ensamble de la bobina de inducción con los accesorios que permite centrarla en la máquina y fijar las bases para evitar desplazamientos de la bobina. Para evitar posibles arcos eléctricos, se colocaron separadores aislantes de teflón entre las bases; entre la ducha y el cuerpo de la bobina. Los topes-guía, la tornillería y el cuerpo de la ducha fueron contruidos con acero inoxidable 316 amagnético para evitar pérdidas de corriente que afecten el tiempo de calentamiento y potencia consumida en la máquina de inducción.

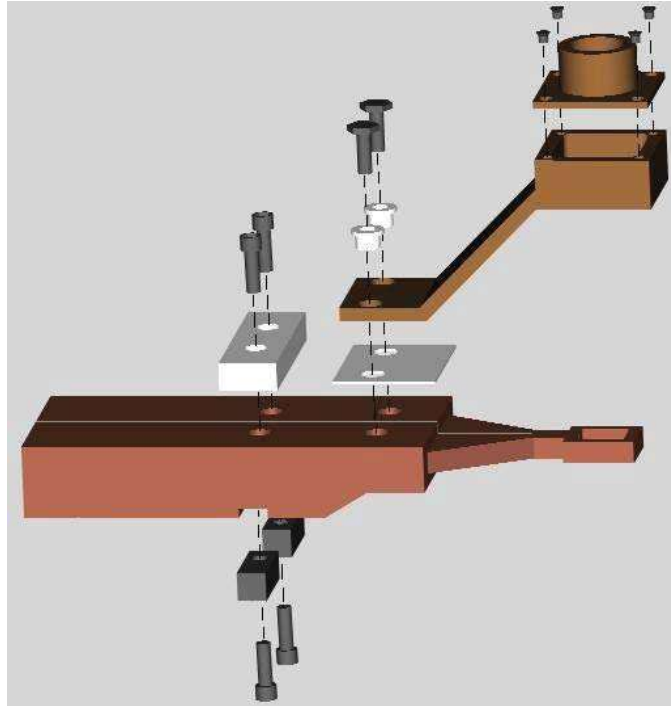


Figura 2.5 Ensamble de la bobina de inducción.

La pieza de trabajo seleccionada, que como se mencionó es una leva automotriz, requiere de acuerdo con consideraciones técnicas (la dureza en los puntos indicados 1, 2 y 3 debe variar en el rango de 45 a 55 HRc, y una profundidad de templado que se especifica de 7.9 mm mínimo a 9.3 mm máximo, siendo el área donde sufre el desgaste en la parte ensamblada del motor), un temple exclusivamente en la cresta de la leva. La figura 2.6 muestra el patrón de temple.

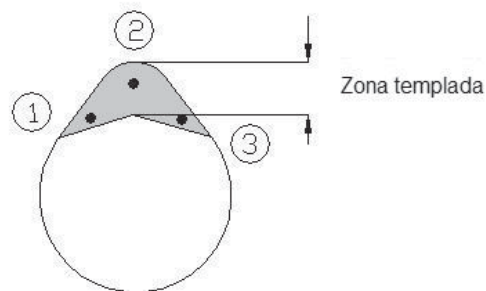


Figura 2.6.- Patrón de temple requerido para una leva automotriz.

Las figuras 2.7 y 2.8 muestran respectivamente la bobina con la ducha para enfriamiento ensamblada y el acoplamiento de la leva a la bobina. Sus planos de diseño se muestran en el anexo A.

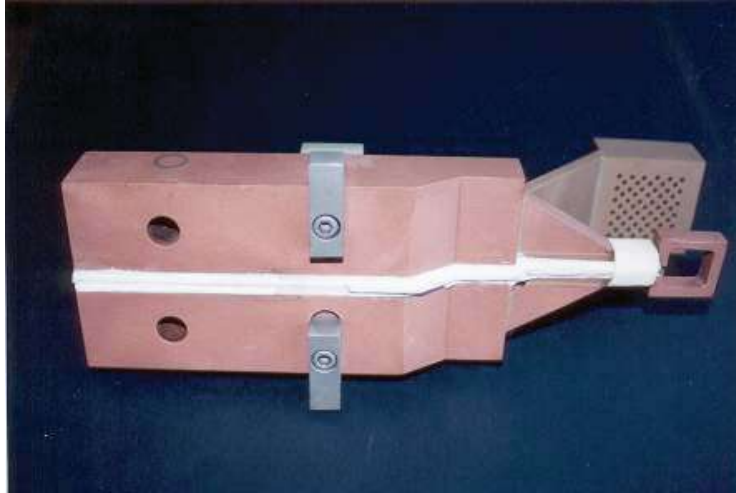


Figura 2.7 Bobina diseñada para templar árboles de levas.

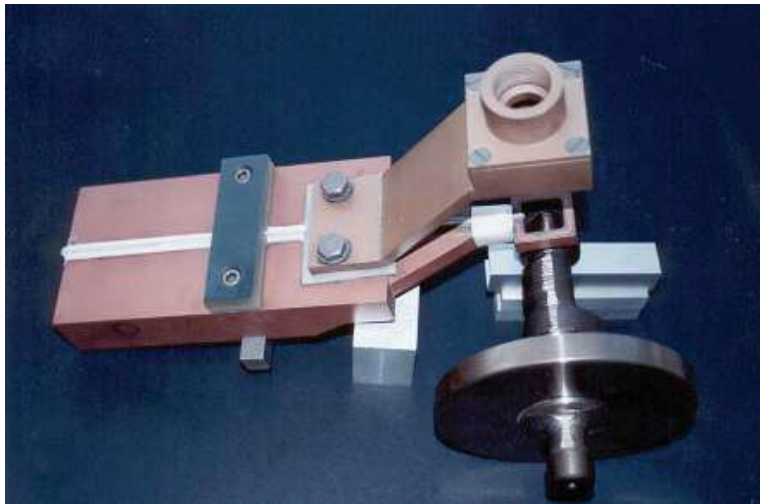


Figura 2.8 Acoplamiento entre bobina y árbol de levas.

2.2.5 Elaboración de muestras

Para elaborar las muestras, se prepararon tres tipos de mezclas compuestas de polvos de hierro con tamaño de partícula variable en el rango 40-200 micras, silicio, polímero y lubricante en las proporciones indicadas en la tabla 2.1, con un peso cada una de 450 g. Cada tipo de mezcla fue preparada de la misma manera, tal y como se describe en los siguientes párrafos.

Los polvos de silicio fueron previamente caracterizados y posteriormente triturados en un molino de bolas durante tres horas hasta lograr un tamaño de partícula variable entre 50 y 200 micras, fueron mezclados con los polvos de hierro en forma manual en un cilindro giratorio. El tiempo de mezclado empleado fue de 10 minutos.

Tabla 2.1.- Mezclas utilizadas para la preparación de muestras

MATERIAL	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3
	% (en peso)	% (en peso)	% (en peso)
Silicio	1	3	5
Lubricante	0.5	0.5	0.5
Polímero y endurecedor	3	3	3
Hierro	Balance	Balance	Balance

Esta mezcla de polvos (Fe + Si) fue enriquecida adicionándole una solución líquida compuesta de un polímero (para asegurar una buena consistencia mecánica) y un endurecedor (para acelerar el curado de la mezcla); a esta solución se le adicionó ácido esteárico en polvo (como lubricante para reducir el coeficiente de fricción entre el troquel y el material) y evitar que el preformado se adhiriera al troquel.

La solución líquida diluida y homogeneizada con acetona, fue preparada a temperatura ambiente y agregada a los polvos de hierro y silicio. Para asegurar un mezclado uniforme la solución fue sometida a un mezclado y agitado mecánico durante cuatro minutos,

El producto del proceso descrito fue una pasta de consistencia granular que fue utilizada para la elaboración de las muestras, mediante un proceso de compactación realizado en una prensa uniaxial GIMSA de 40 toneladas (figura 2.9).



Figura 2.9 Prensa y dado empleados en la compactación de las muestras.

En una balanza gravimétrica de 50 g se pesaron 20 gramos de pasta con una precisión de ± 0.01 g y se compactaron para obtener muestras “en verde” de 20 mm de diámetro y 13 mm de espesor (figura 2.10). La pasta fue colocada en el troquel y sometida a una carga de 10 toneladas y se elaboraron un total de 20 muestras por cada tipo de mezcla.



Figura 2.10.- Muestras “en verde” obtenidas después del compactado en el troquel mostrado.

Estas muestras se sometieron a una revisión visual de calidad para descartar la posibilidad de la presencia de grietas producto de un proceso de compactación inadecuado, o de desintegración granular. Ante la presencia de cualquiera de estas eventualidades, las muestras se desecharon.

Las muestras en verde así preparadas se sometieron a un tratamiento térmico de sinterizado.

2.2.6.- Sinterizado

Las muestras en verde fueron sinterizadas en un horno industrial de vacío (figura 2.11), marca ABBAR, modelo HR34X48HS, operando a una presión de 0.5 bars. Una característica del horno es su diseño con dos cámaras, una de calentamiento y otra de enfriamiento.



Figura 2.11.- Horno de vacío ABBAR utilizado en el sinterizado

La temperatura de sinterizado fue de 1180°C y el tiempo de tratamiento de 60 minutos; el enfriamiento lento (9.83 °C/min) fue realizado en una atmósfera inerte de vapor de nitrógeno para evitar oxidación en la superficie de las muestras y distorsión de las mismas. El ciclo térmico del tratamiento de sinterizado se muestra esquemáticamente en la figura 2.12.

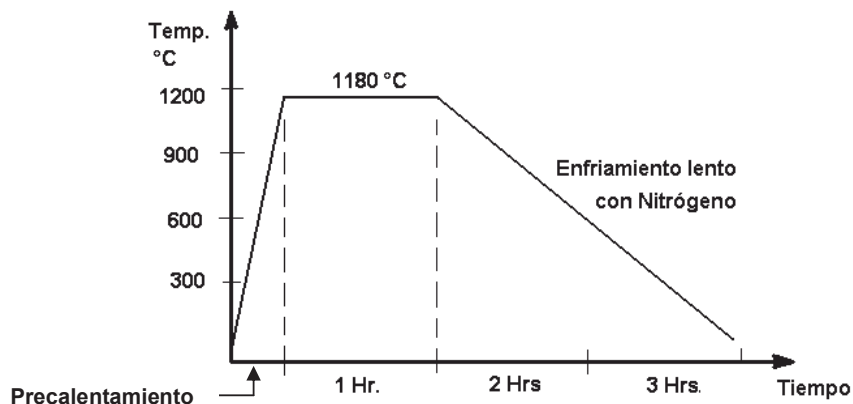


Figura 2.12.- Ciclo térmico del sinterizado empleado

Debe hacerse la observación de que los parámetros operativos indicados tanto del proceso de compactado como de tratamiento térmico son el resultado de una serie de pruebas realizadas en las presiones utilizadas y las temperaturas y tiempos de tratamiento térmico.

2.2.7 Medición de las propiedades mecánicas, eléctricas y magnéticas

2.2.7.1. Permeabilidad magnética

Para determinar la permeabilidad magnética del material concentrador de energía magnética, las muestras sinterizadas se maquinaron de acuerdo a la geometría requerida para realizar el ensayo magnético y poder establecer la permeabilidad magnética del concentrador.

A las muestras con forma de “pastilla” (20 mm de diámetro y 13 mm de espesor) se les realizó un barreno central de 5 mm de diámetro para darles una geometría “toroidal”. Sobre la muestra se efectuó un embobinado con 20 espiras, como se muestra en la figura 2.13.



Figura 2.13. Geometría de la muestra para practicar el ensayo de permeabilidad magnética, mostrando el embobinado realizado.

El ensayo fue practicado en un equipo RCL PHILIPS, PM6303, que permitió determinar la “Inductancia magnética”. Con esta medición se pudo encontrar la permeabilidad magnética mediante la igualdad mostrada en la ecuación 2.1.

$$\mu = \left(\frac{1}{n^2} \right) \left[\frac{5000}{t \cdot \ln \frac{d_e}{d_i}} \right] (L) \quad (2.1)$$

- Donde:
- μ = Permeabilidad magnética
 - n = Número de espiras del embobinado de la muestra
 - t = Espesor de la muestra, mm
 - d_e, d_i = Diámetro externo e interno, respectivamente, mm
 - L = Inductancia magnética, μm

2.2.7.2. Magnetometría.

Se prepararon muestras cilíndricas de 2 mm de diámetro y 4 mm de longitud, con un peso de 2.5 g, para realizar el ensayo de magnetometría y determinar propiedades magnéticas del material concentrador de energía magnética, tales como la coercitividad (H_c), remanencia (M_r) y saturación magnética (M_s).

Para la realización de este ensayo se utilizó un magnetómetro de muestra vibrante LDJ-9600 (figura 2.14). El tiempo de magnetización de las muestras fue de 11.26 min.

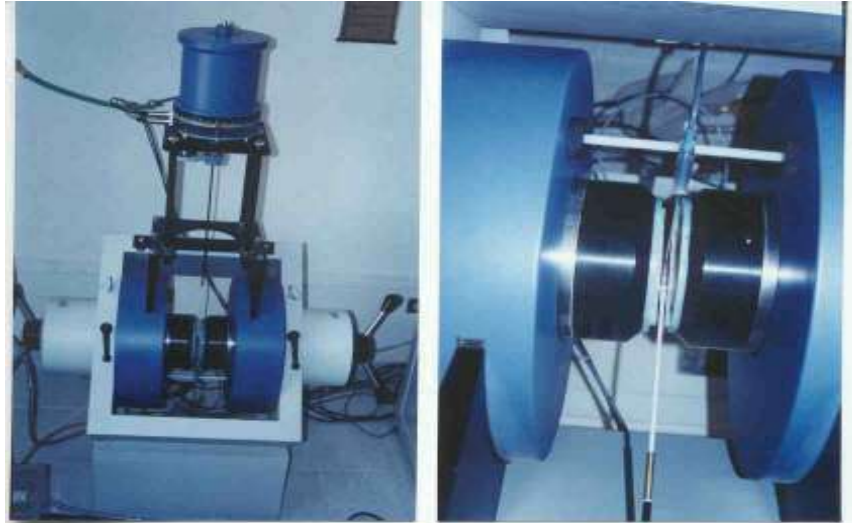


Figura 2.14. Magnetómetro de muestra vibrante LDJ-9600

2.2.7.3.- Resistividad eléctrica.

Las muestras especialmente preparadas para determinar la resistividad eléctrica son de geometría cilíndrica de 20 mm de diámetro y 13 mm de espesor y fueron sometidas a un proceso de desbaste mediante el uso de una serie de lijas de diferente granulometría, hasta que la superficie de las muestras adquirió un “terminado a espejo”, seguido de un pulido en paño de lana y pasta de diamante con un tamaño de partícula de 1.0 μm .

Simultáneamente se fabricaron dos electrodos (placas) de aluminio y se prepararon de igual manera que las muestras, para cubrir el área total de las mencionadas muestras.

Para realizar la medición de la resistividad eléctrica del material se utilizó un equipo YOKOHAMA-3213, calibrado por P.E.M.S.A.; SIC-DG-4782 (figura 2.15).

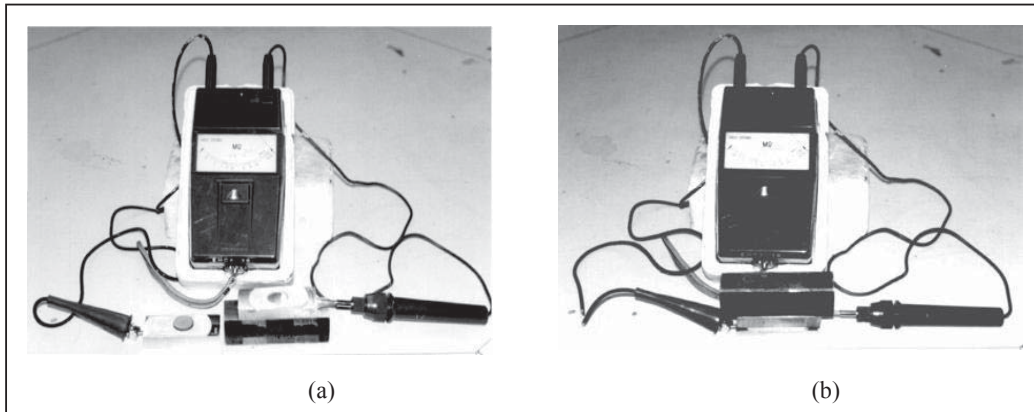


Figura 2.15 Sistema de medición de la resistividad eléctrica. (a) Sistema desacoplado para mostrar detalles del ensamble electrodo-probeta-electrodo, así como el fijador de posición de la probeta. (b) Sistema acoplado que muestra la barra que proporciona presión constante sobre el ensamble.

La resistividad eléctrica se calculó a partir de mediciones de resistencia eléctrica y de la geometría de las piezas mediante la relación indicada en la ecuación 2.2.

$$S = R_e \left(\frac{A_s}{L} \right) \quad (2.2)$$

Donde: S = Resistividad eléctrica, Ω -cm
 R_e = Resistencia eléctrica, Ω
 A_s = Area superficial de la muestra, cm^2
 L = Espesor de la muestra, cm.

2.2.7.4. Ensayo de dureza.

Para conocer la maquinabilidad de las muestras sinterizadas se midió la dureza Rockwell “B” (100 Kg y penetrador esférico de 1/16”). Para determinar la dureza se obtuvo el promedio de 5 mediciones realizadas al azar en toda la superficie de la muestra. Se utilizó un durómetro Wilson Rockwell Estándar, modelo 506.

2.2.8.- Microscopía.

Con el objeto de conocer las diferentes fases del material concentrador de energía magnética, se realizaron estudios de microscopía electrónica de barrido, para lo cual se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB), marca JEOL, modelo JMS-6400.

Las muestras se prepararon metalográficamente a fin de observar la microestructura del material, de acuerdo a lo establecido en los estándares ASTM respectivos.

2.2.9.- Prueba operacional del concentrador de energía magnética

Las muestras elaboradas con los tres tipos de mezcla y procesadas de acuerdo a lo descrito en los apartados anteriores, se maquinaron para darles una geometría como la mostrada en la figura 2.16, en una fresadora universal, y se acoplaron a la bobina de inducción diseñada y fabricada específicamente (tal y como se describe en el apartado 2.2.4;) para este fin.

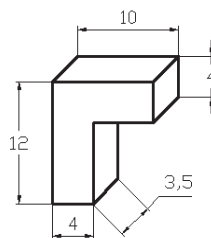


Figura 2.16.- Geometría final del concentrador maquinado (unidades: mm).

La bobina se acopló a una máquina de inducción, marca INDUCTOHEAT, modelo ULTRASCAN SCLP-1035, con capacidad de 200 KW; con frecuencia de 10 KHz y 440 Volts.

Las variables medidas en la máquina de inducción que nos permiten conocer la efectividad operacional del material concentrador de energía magnéticas, son (a) el tiempo de calentamiento y (b) la potencia consumida, es decir, los kilowatts/segundo consumidos.

Las muestras maquinadas se acoplaron en el contorno de la espira de la bobina, para lo cual se utilizaron 10 muestras con las que se logró cubrir la periferia de la espira. El montaje del material en la bobina se muestra en la figura 2.17.



Figura 2.17.- Montaje de los concentradores de energía magnética en la periferia de la bobina inductora en el momento del calentamiento.

Capítulo 3

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron en cada una de las etapas que constituyen el trabajo de investigación. Así mismo se muestran los resultados de la caracterización de los polvos empleados, las fotomicrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X, microanálisis mediante barrido de electrones retrodispersados (EDS), las pruebas de magnetometría y de los ensayos de dureza y metalografía.

Los ensayos realizados se efectuaron, como se mencionó en el capítulo anterior, en dos tipos diferentes de materiales; uno de importación adquirido en empresas extranjeras y un segundo elaborado en los laboratorios del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y manufacturado totalmente con materias primas nacionales y con el procedimiento diseñado en este trabajo de investigación. Debe mencionarse que el procedimiento de elaboración del material importado es información restringida por la empresa fabricante.

Es oportuno recordar que el objetivo del trabajo es elaborar un material concentrador de energía magnética con materiales nacionales que tenga como mínimo las características de funcionamiento y de eficiencia de trabajo que el importado.

3.2 Caracterización de los polvos de hierro y silicio.

El tamaño de partícula para ambos polvos (silicio y hierro) empleados varió en el rango de 40 a 200 μm . El polvo de silicio en lo particular tuvo una variación en el rango de 50 a 200 μm y el de hierro entre 40 y 180 μm . Sin embargo, es de aclarar que el tamaño de partícula predominante para el polvo de silicio fue entre 140 y 180 μm . En el caso del

tamaño de partícula del hierro, el tamaño predominante fue entre 100 y 120 μm , destacándose el de 100 μm . Las distribuciones del tamaño de partícula para ambos materiales se muestran en las figuras 3.1 y 3.2.

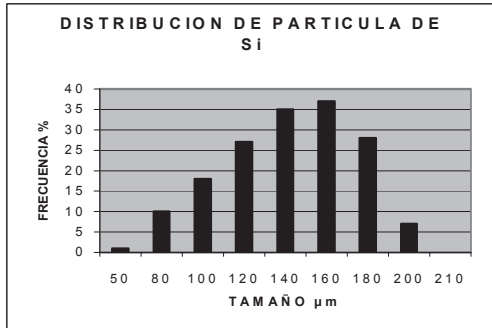


Figura 3.1 Distribución de tamaño de partícula del polvo de silicio

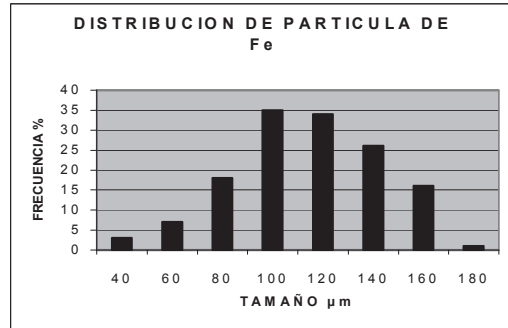


Figura 3.2 Distribución de tamaño de partícula del polvo de hierro

El polvo de silicio presenta una morfología irregular con tendencia y características aciculares (figura 3.3). El polvo de hierro muestra una partícula con morfología equiaxial y de tamaño uniforme, tal y como se puede apreciar en la figura 3.4.

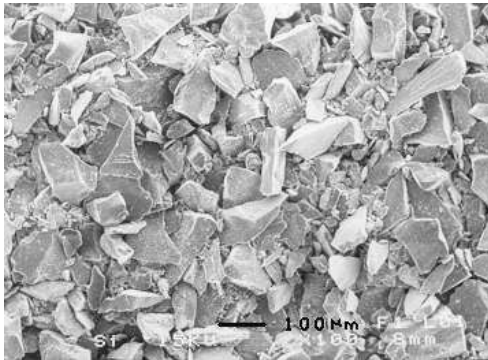


Figura 3.3 fotomicrografía de polvo de silicio obtenida con tecnología MEB.

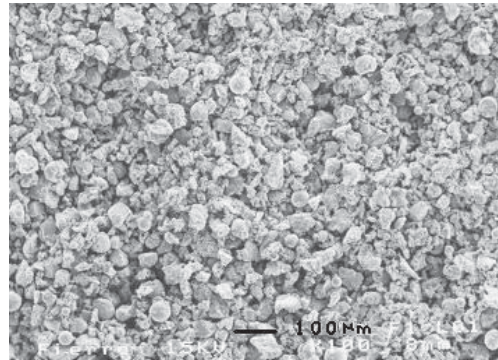


Figura 3.4 Fotomicrografía de polvo de hierro obtenida con tecnología MEB.

Los estudios de difracción de Rayos-X dieron como resultado los difractogramas mostrados en las figuras 3.5 y 3.6, en los cuales se puede observar claramente que ambos polvos son efectivamente de silicio e hierro.

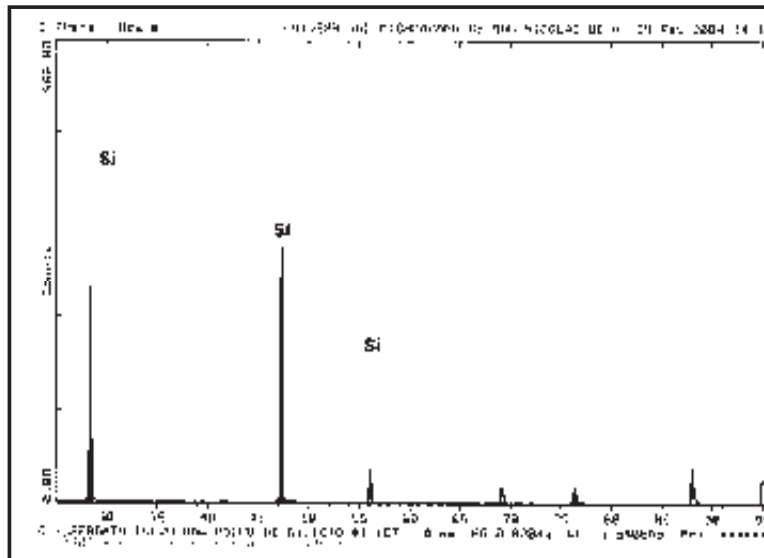


Figura 3.5 Difractograma de los polvos de silicio.

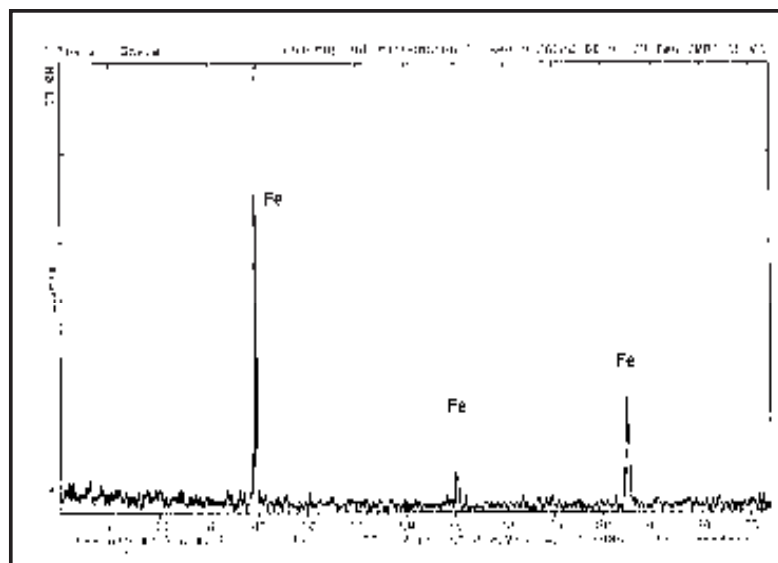


Figura 3.6 Difractograma de los polvos de hierro.

Estudios de microscopía y difracción de Rayos-X realizados sobre el material concentrador de energía magnética de importación, llamado comercialmente “FLUXTROL

VERDE” mostraron que la composición química del material exhibe básicamente dos elementos: hierro en un 96.87% en peso y fósforo 3.13% en peso.

En la fotomicrografía 3.7 se muestra la microestructura del Fluxtrol verde a 500X donde se puede observar una estructura conformada por una fase matriz (zona “a”) rodeando pequeñas islas de un color más claro (zonas “b”, “c” y “d”).

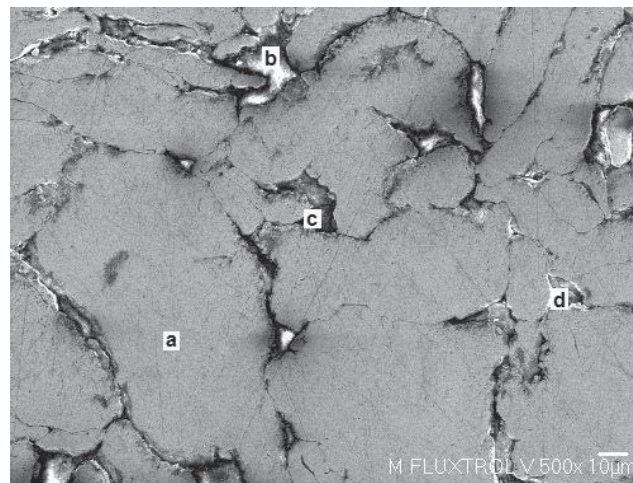


Figura 3.7 Fotomicrografía del Fluxtrol obtenida con tecnología MEB.

Para determinar la constitución química de las zonas mencionadas se realizaron estudios de difracción de Rayos-X a cada una de ellas. Estos estudios fueron complementados con estudios de microanálisis por barrido de electrones retrodispersados (EDS).

Las figuras, de la 3.8 a la 3.11, muestran los espectrogramas, resultado de los microanálisis realizados en las zonas a, b, c y d, indicados en la fotomicrografía de la figura 3.7.

La fase matriz (zona “a”) está constituida básicamente por el elemento hierro, tal y como se desprende del espectrograma mostrado por la figura 3.8. Las demás zonas (b,c,d), exhiben contenidos principalmente de fósforo, carbono y oxígeno.

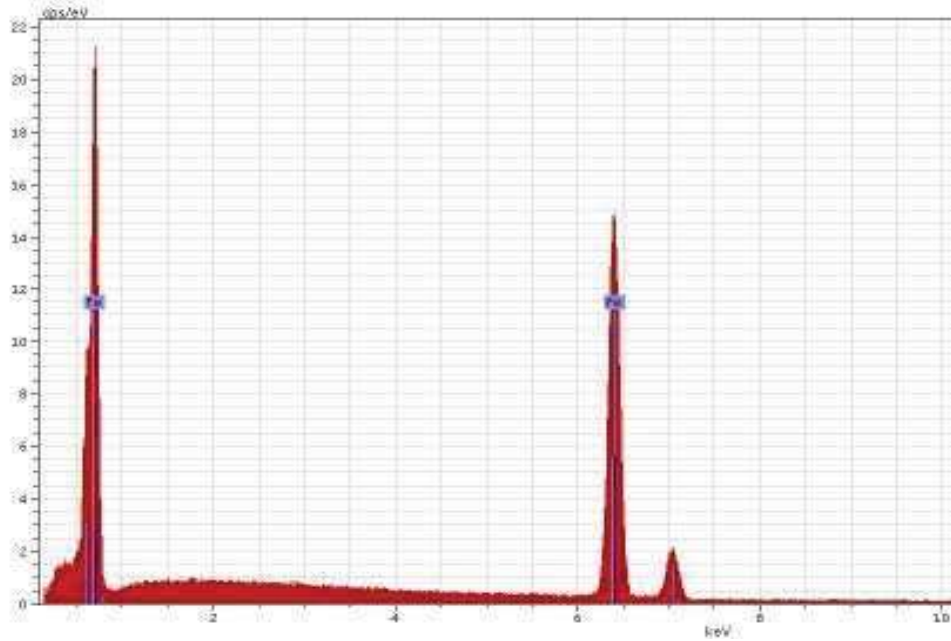


Figura 3.8 Espectrograma del Fluxtrol Verde, zona “a”.

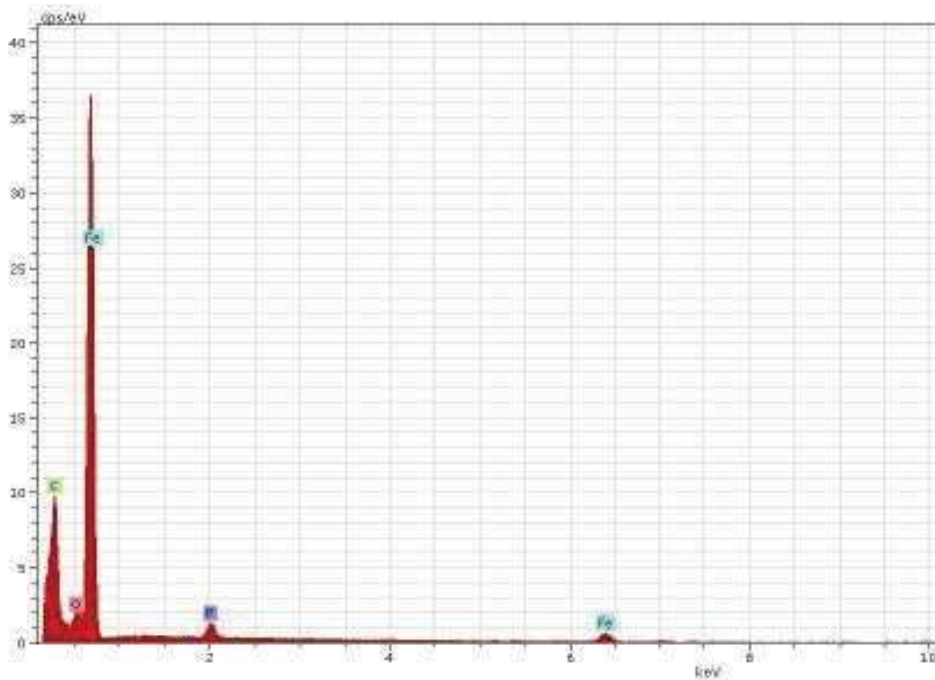


Figura 3.9 Espectrograma del Fluxtrol verde zona “b”

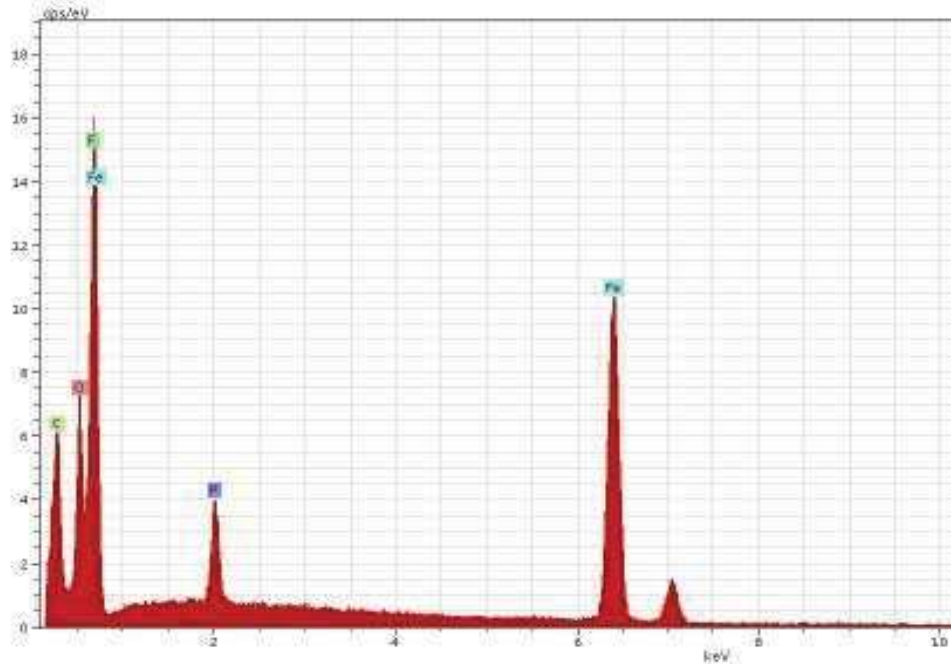


Figura 3.10 Espectrograma del Fluxtrol verde, zona “c”.

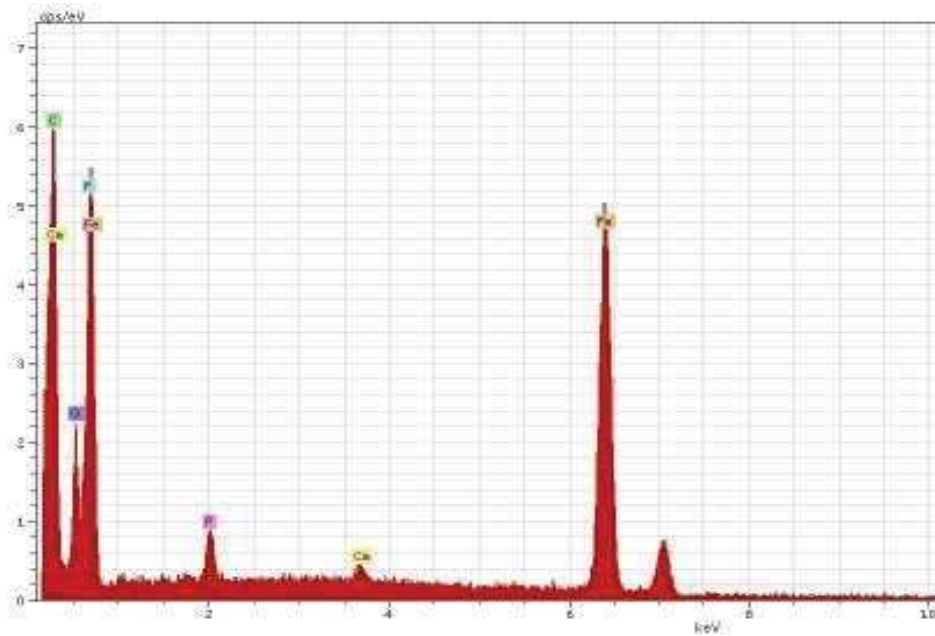


Figura 3.11 Espectrograma del Fluxtrol verde, zona “d”.

La figura 3.12 muestra el patrón de difracción de rayos X obtenido para el Fluxtrol verde, observándose que básicamente está formado de hierro y una pequeña cantidad de fósforo.

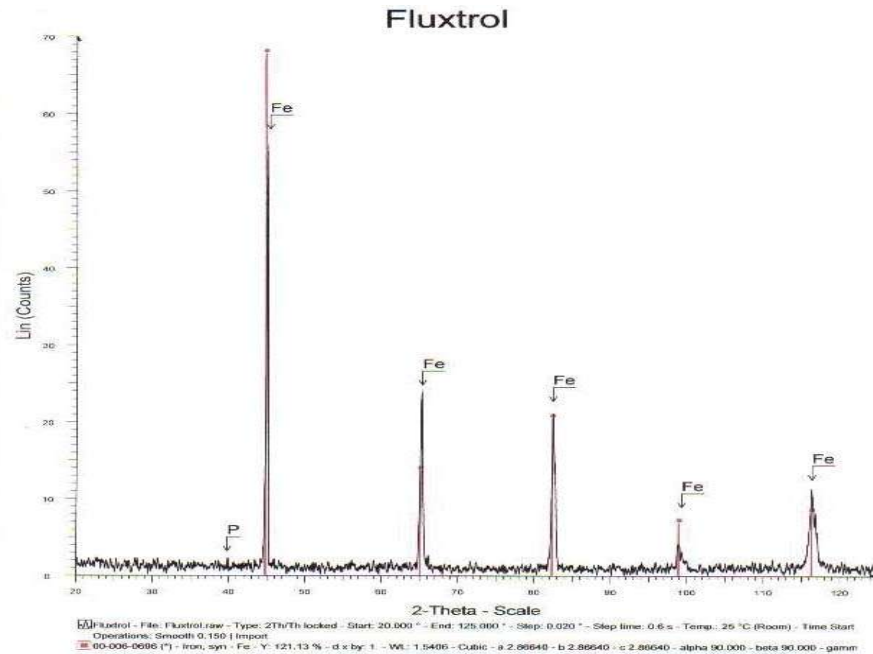


Figura 3.12 Difractograma de rayos X para el Fluxtrol.

Los resultados obtenidos, tanto en los espectrogramas como en el difractograma del Fluxtrol verde, demuestran que el material está constituido por hierro y fósforo.

3.3 Resultados de las aleaciones obtenidas

3.3.1 Microscopía y Difracción de Rayos-X

Con la tecnología de microscopía electrónica de barrido (MEB) se realizaron diferentes estudios para determinar la forma y distribución de las fases constituyentes del material concentrador de energía magnética formulado en el presente trabajo que incluye como principal característica el empleo del elemento silicio en sustitución del fósforo.

A continuación se presenta una serie de fotomicrografías que muestran la microestructura de las aleaciones Fe-1.0%Si; Fe-3.0%Si y Fe-5.0%Si y posteriormente los correspondientes espectrogramas obtenidos de cada una de ellas. Estos últimos se obtuvieron, realizando microanálisis EDS.

En la figura 3.13 puede observarse la microestructura de la aleación de hierro con 1.0% en peso de silicio distinguiéndose claramente la existencia de dos fases, presumiblemente hierro y silicio. El hierro (zona “a”), que es la fase matriz, se identifica en la microestructura por la cantidad de fase y su color claro. El silicio (zona “b”) se observa en forma de pequeños aglomerados de color oscuro formando una especie de red coronando y delimitando las partículas de hierro.

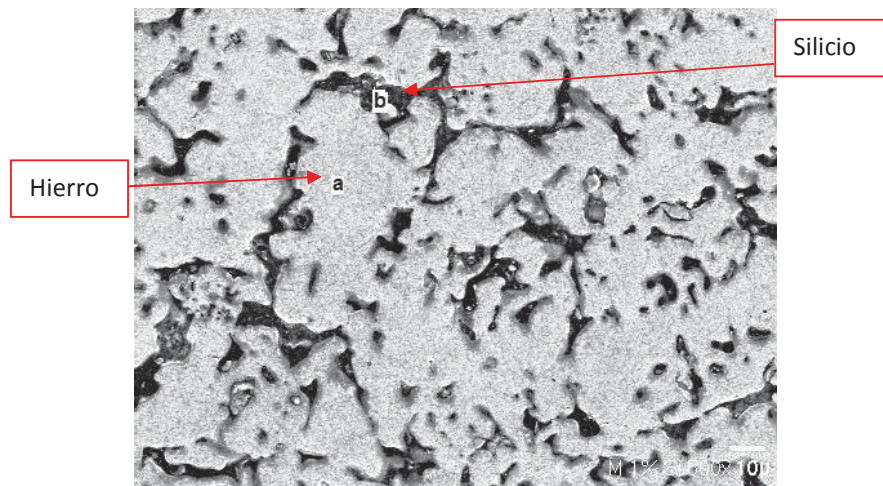


Figura 3.13 Fotomicrografía del material concentrador de energía magnética con 1% en peso de silicio obtenida por MEB.

Las figuras 3.14 y 3.15 muestran los espectrogramas realizados en la muestra correspondiente al material Fe-1.0%Si y del cual se observa su microestructura en la fotomicrografía 3.13.

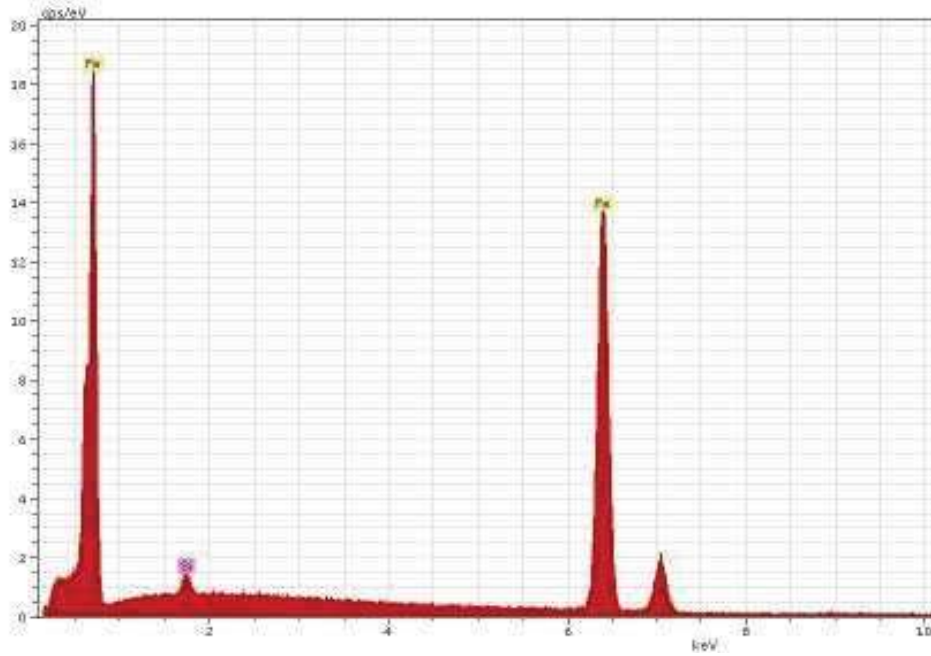


Figura 3.14 Espectrograma de las zonas claras obtenido mediante técnicas de microanálisis EDS de las muestras de Fe-1%Si.

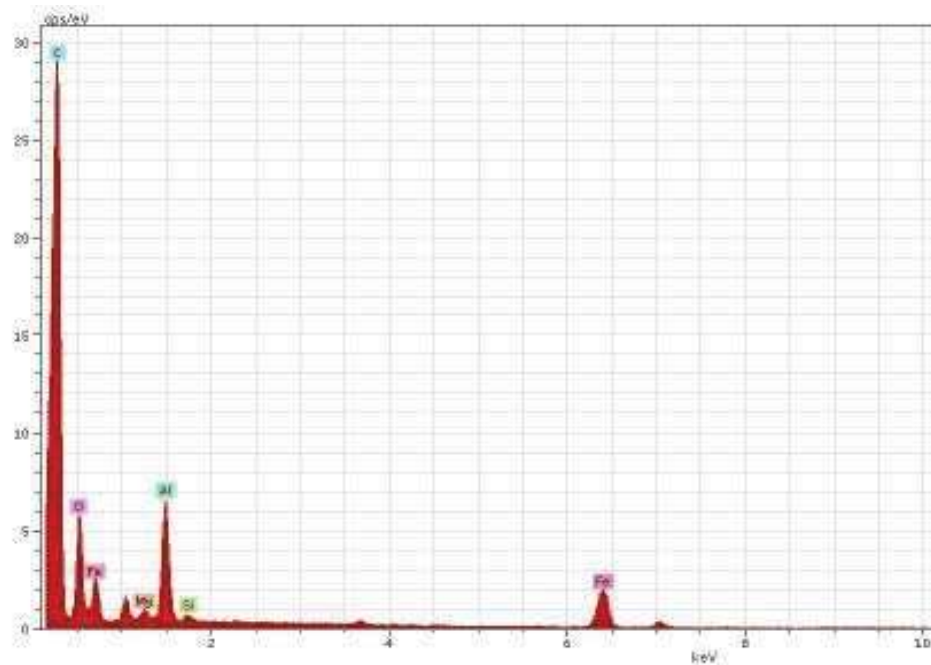


Figura 3.15 Espectrograma de las zonas oscuras obtenidas mediante técnicas de microanálisis EDS de las muestras de Fe-1%Si.

De acuerdo a los resultados del microanálisis EDS, realizados tanto en las zonas claras como en las oscuras, se puede confirmar lo que muestran las fotomicrografías y asegurar que las primeras corresponden a la matriz de hierro y las segundas al silicio.

La fotomicrografía 3.16 obtenida mediante la tecnología MEB, muestra la microestructura del material Fe-3.0%Si, a 500 X. Se puede observar el silicio en forma de aglomerados (zonas oscuras, zonas “b”) rodeadas de una matriz de hierro y se identifica por su color claro (zona “a”).

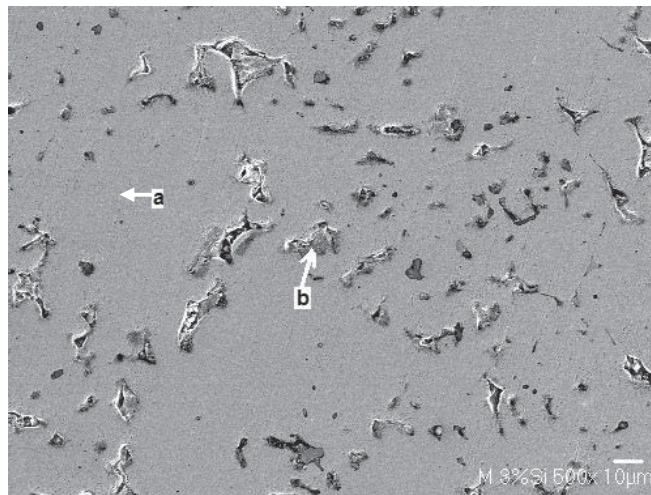


Figura 3.16 Fotomicrografía del material concentrador de energía magnética con 3.0% en peso de silicio obtenida por MEB.

Los espectrogramas respectivos, tanto de las zonas “a” como de las áreas “b” para el material Fe-3.0% en peso de silicio del concentrador de energía magnética, se muestran en las figuras 3.17 y 3.18.

En relación a la figura 3.18, podemos observar que aparecen elementos residuales tales como Cr, Mg, Al, Ca y otros en menor escala, lo cual nos hace suponer que son constituyentes de la materia original provenientes del hierrosilicio.

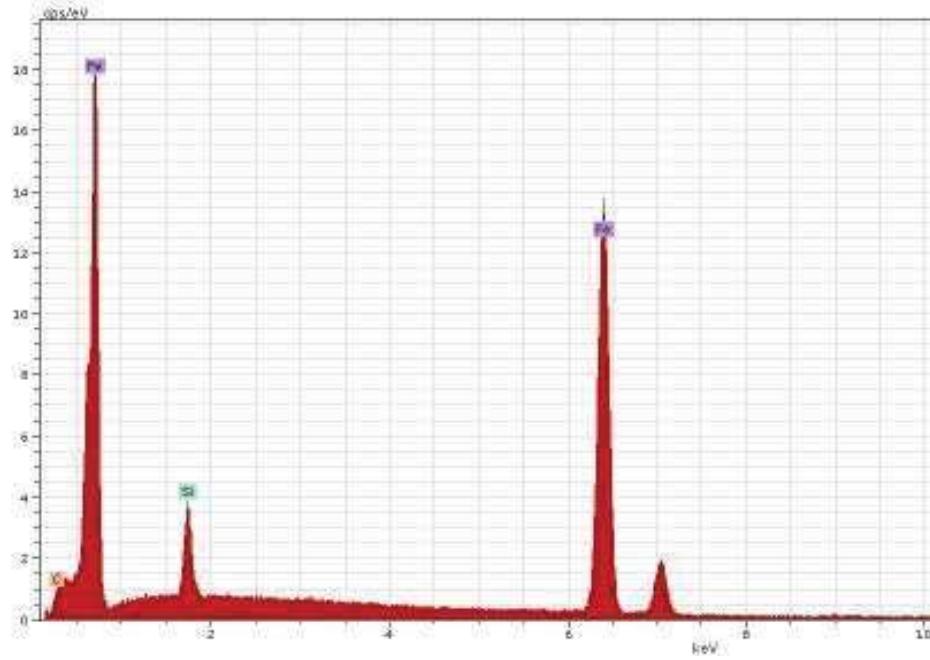


Figura 3.17 Espectrograma de la zona “a” obtenido mediante microanálisis EDS para el material Fe-3.0%Si.

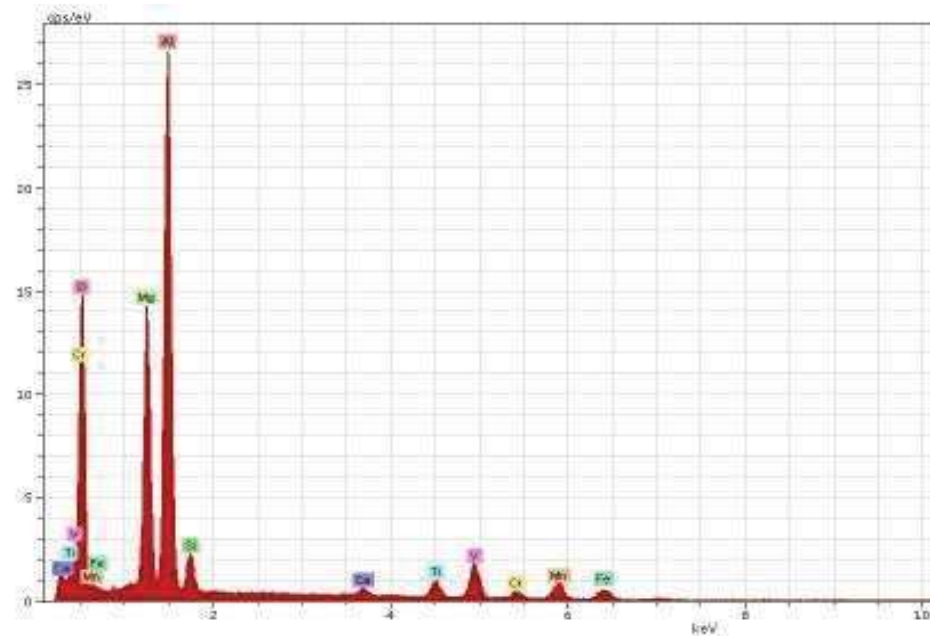


Figura 3.18 Espectrograma de la zona “b” obtenido mediante microanálisis EDS para el material Fe-3.0%Si.

La fotomicrografía 3.19 muestra la microestructura de la aleación Fe-5%Si. El hierro es la fase matriz y se identifica por su color claro (zona “a”). El silicio en forma de pequeños aglomerados de color oscuro, forma una especie de red que corona y delimita las partículas de hierro.

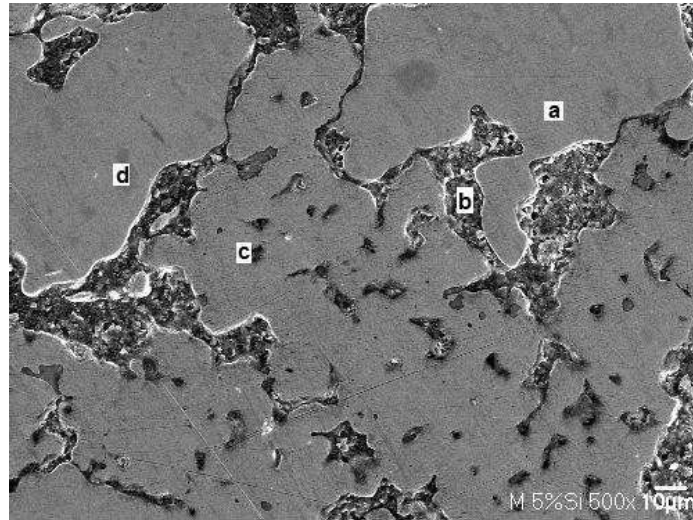


Figura 3.19 Fotomicrografía del material concentrador de energía magnética con 5.0% en peso de silicio obtenida por MEB.

Las figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 muestran los espectrogramas realizados en la muestra correspondiente a la aleación Fe-5%Si en los puntos característicos “a”, “b”, “c” y “d” indicados en la fotomicrografía de la figura 3.19. La fase matriz (zona “a”) está constituida básicamente por el elemento hierro con cierta presencia de silicio tal como se desprende del espectrograma mostrado en la figura 3.20. Las demás zonas (b, c y d), exhiben contenidos principalmente de carbono y oxígeno.

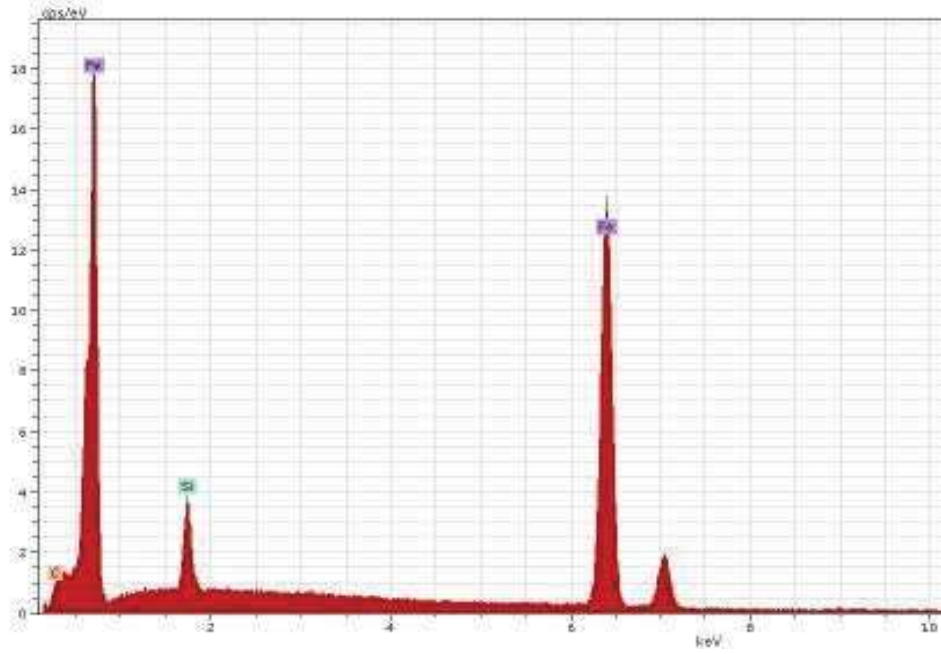


Figura 3.20 Espectrograma de la zona clara "a" obtenido mediante EDS del material Fe-5%Si.

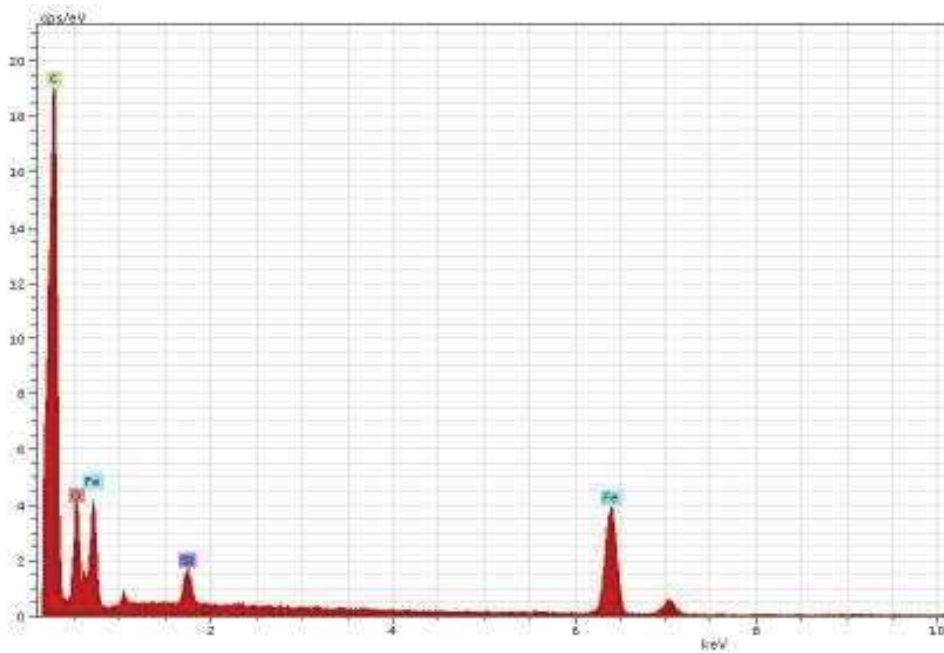


Figura 3.21 Espectrograma de la zona oscura "b" obtenido mediante ESD del material Fe-5%Si.

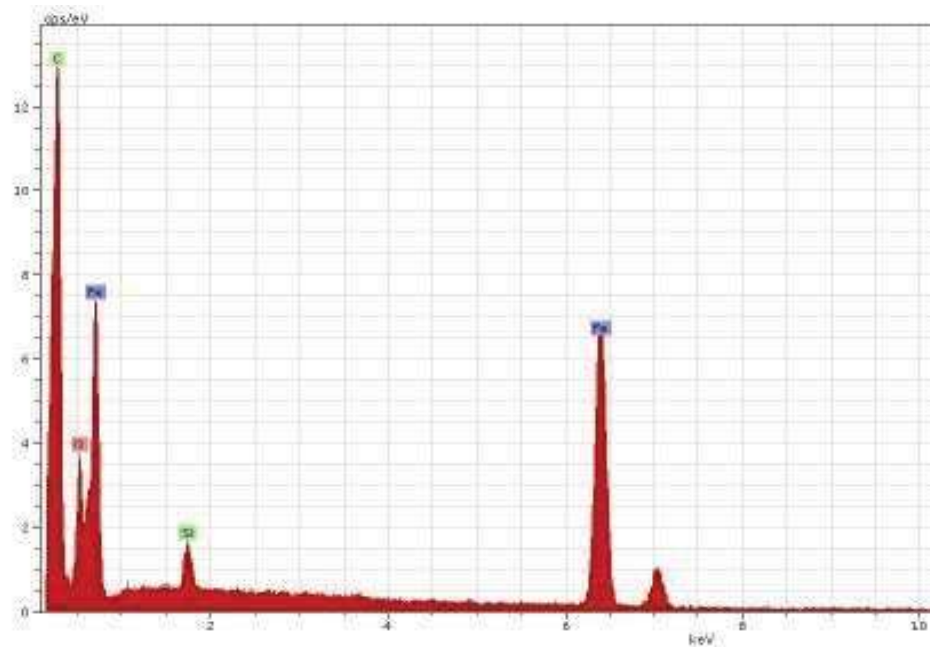


Figura 3.22 Espectrograma de la zona “c” obtenida mediante EDS del material Fe-5% Si.

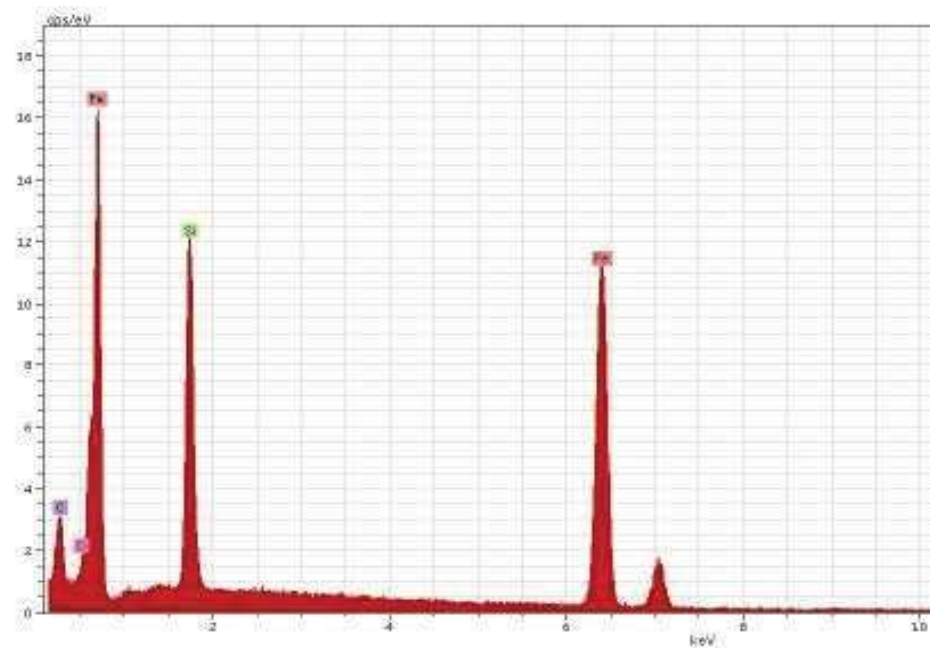


Figura 3.23 Espectrograma de la zona “d” obtenido mediante EDS del material Fe-5%Si.

Los resultados de rayos X realizados a los concentradores obtenidos se muestran en los difractogramas 3.24, 3.25 y 3.26 reflejándonos la intensidad de los picos, en función de la cantidad agregada, sobre todo del elemento silicio. En el eje de las “x”, representa el ángulo 2 teta y se desplaza de 20 a 120 grados. En el eje de las “y”, nos muestran los conteos, que son los disparos de fotones por segundo, para determinar la intensidad de las fases o picos.

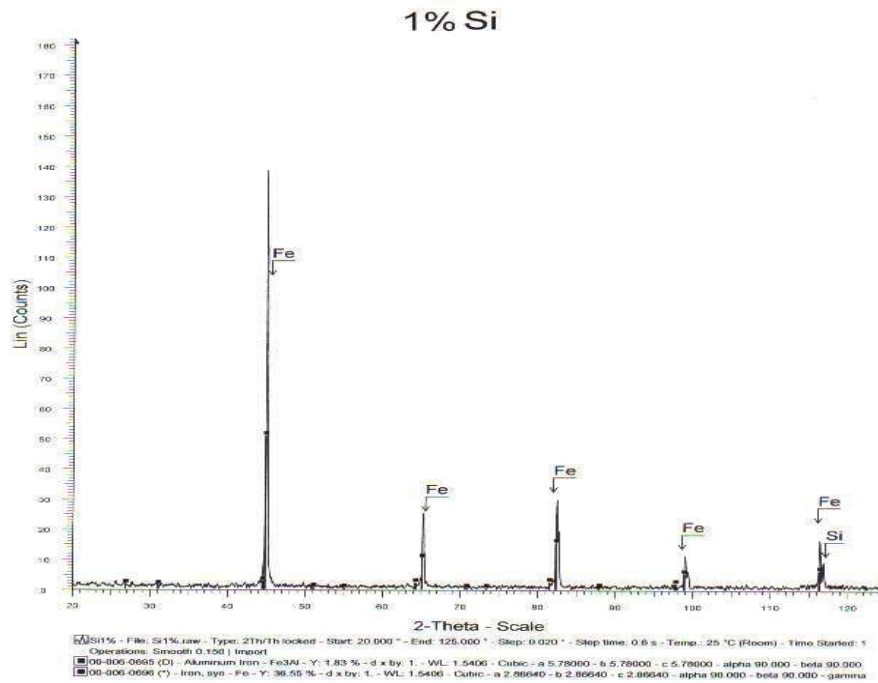


Figura 3.24 Difractograma de rayos X obtenido para la aleación Fe-1% Si.

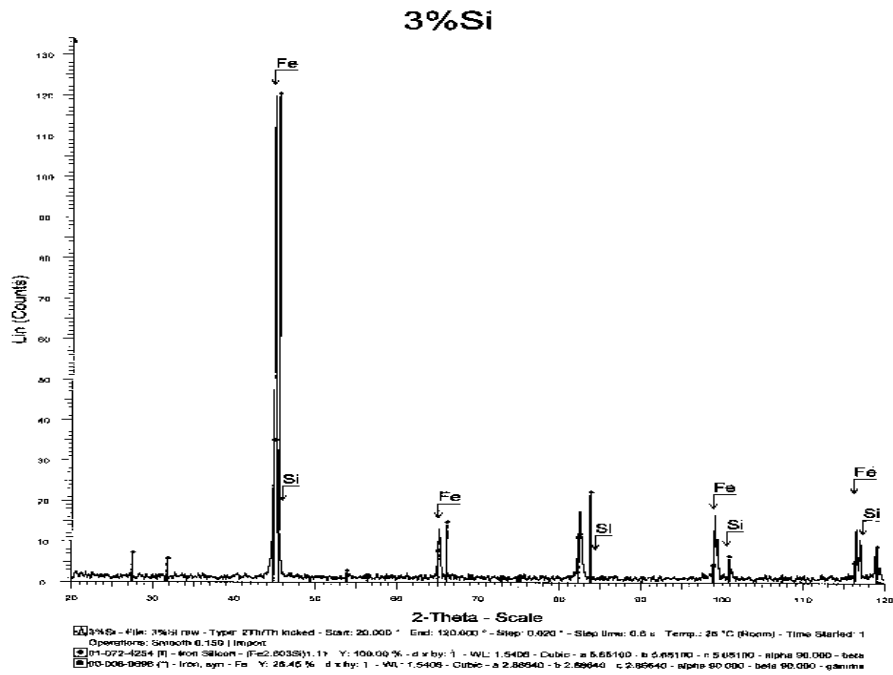


Figura 3.25 Difractograma de rayos X obtenido para la aleación Fe-3% Si.

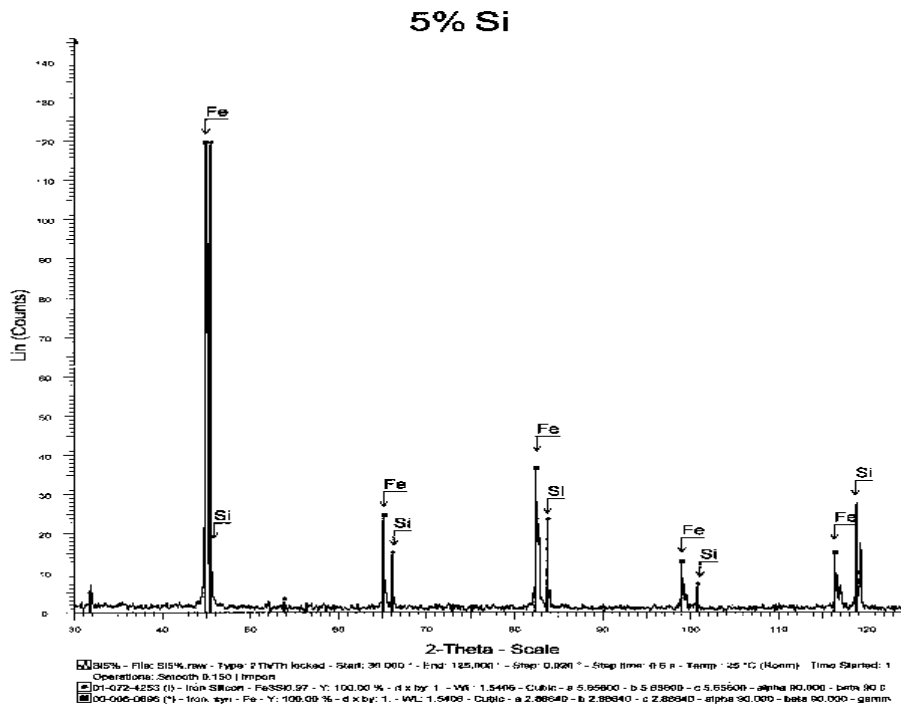


Figura 3.26 Difractograma de rayos X obtenido para la aleación Fe-5% Si.

En la figura 3.24 se observa que casi no aparece el silicio, en la figura 3.25 aparece en mayor cantidad y aún más en la figura 3.26.

3.3.2 Magnetometría

Las pruebas de magnetometría se realizaron en un magnetómetro de muestra vibrante marca LDJ modelo 9600. Las figuras 3.27, 3.28 y 3.29 muestran las curvas de histéresis de las aleaciones de hierro con 1%, 3% y 5% de silicio, respectivamente. Se observa para cada una la magnetización, la remanencia y la coercitividad de estas aleaciones.

La aleación Fe-1%Si exhibió una saturación magnética de 0.71 T que se incrementó un 58.7% al aumentar el contenido de silicio a 3% y alcanzar una valor de 1.12 T al incrementar el contenido de silicio hasta un 5%.

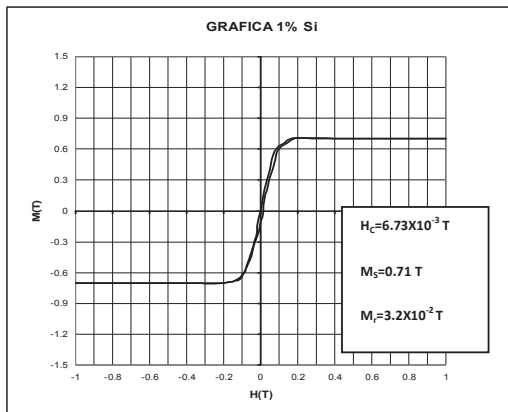


Figura 3.27 Curva de histéresis de la aleación de Fe-1%Si.

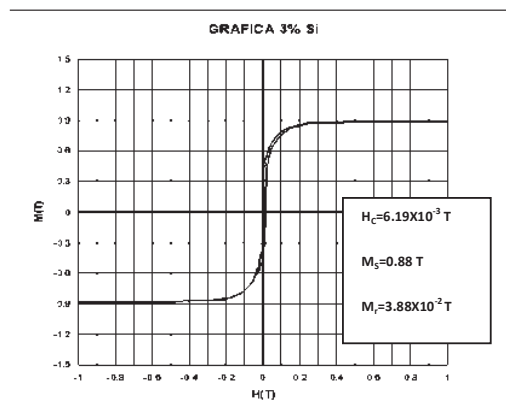


Figura 3.28 Curva de histéresis de la aleación de Fe-3%Si.

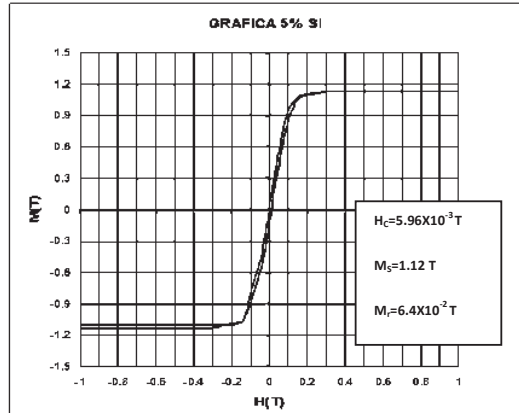


Figura 3.29 Curva de histéresis de la aleación de Fe-5%Si.

De las curvas de histéresis mostradas se desprenden igualmente las magnitudes tanto la remanencia como de la fuerza coercitiva de las aleaciones estudiadas. Se puede observar que inicialmente al aumentar el contenido de Si del 1% al 3%, la remanencia (M_r) aumenta ligeramente al pasar de $3.2 \times 10^{-2} \text{ T}$ a $3.88 \times 10^{-2} \text{ T}$. Con un 5% de Si, la remanencia se incrementa aún más hasta alcanzar un valor de $6.4 \times 10^{-2} \text{ T}$.

Contrariamente a lo que ocurre con la remanencia, la coercitividad (H_c) disminuye de manera continua al incrementar el contenido de Si, de 1% a 3% y a 5%. Así, pasa de $6.73 \times 10^{-3} \text{ T}$ a $6.19 \times 10^{-3} \text{ T}$ y finalmente a $5.96 \times 10^{-3} \text{ T}$.

La figura 3.30 muestra igualmente la curva de histéresis para el Fluxtrol verde, la cual muestra una magnetización de saturación igual a 0.806 T ; una remanencia de $6 \times 10^{-2} \text{ T}$; y una coercitividad de $3.2 \times 10^{-3} \text{ T}$.

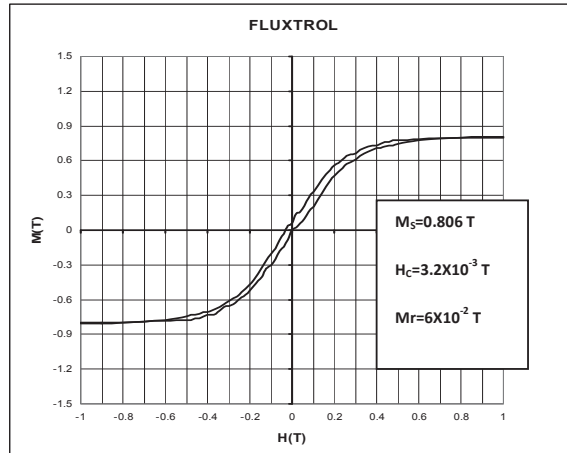


Figura 3.30 Curva de histéresis del Fluxtrol verde.

En la figura 3.31 y la tabla 3.2 se presentan, para fines comparativos, las curvas de histéresis y los valores de saturación magnética, remanencia y fuerza coercitiva para las aleaciones bajo estudio y para el Fluxtrol verde.

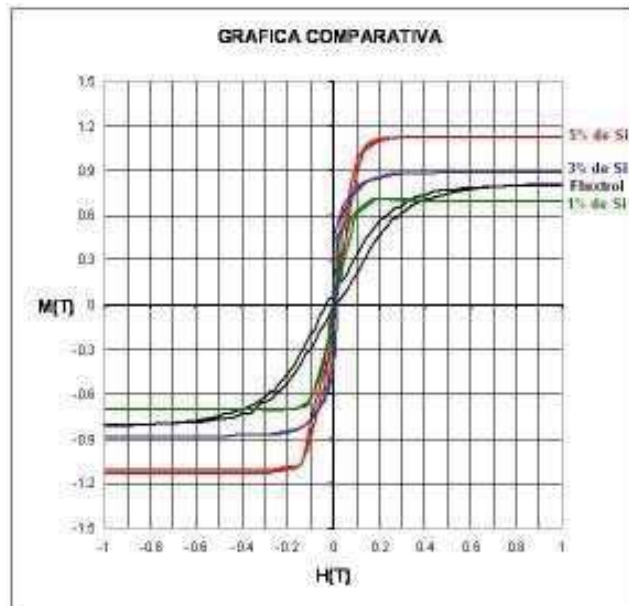


Figura 3.31 Curvas de histéresis de las aleaciones de Fe-Si y del Fluxtrol verde.

Tabla 3.2 Fuerza coercitiva, saturación magnética y remanencia de las aleaciones de Fe-Si y Fluxtrol verde.

TABLA COMPARATIVA			
	Fuerza Coercitiva	Saturación Magnética	Remanencia
	Hc	Ms	Mr
FLUXTROL	3.2 X 10⁻³ T	0.806 T	6 X 10⁻² T
1% Si	6.73 X 10⁻³ T	0.71 T	3.2 X 10⁻² T
3% Si	6.19 X 10⁻³ T	0.88 T	3.88 X 10⁻² T
5% Si	5.96 X 10⁻³ T	1.12 T	6.4 X 10⁻² T

A continuación se muestran gráficas de tendencia de las diferentes propiedades magnéticas que se desprenden del ciclo de histéresis. Se observa que la fuerza coercitiva de las aleaciones de Fe-Si (figura 3.32) tiende a disminuir muy ligeramente con el aumento en el contenido de silicio, siendo la diferencia entre la aleación con 1%Si y la de 5%Si de solo $0.77 \times 10^{-3} \text{T}$. Los valores de fuerza coercitiva logrados, para cualquiera de las aleaciones estudiadas, resulta alta comparada con la del Fluxtrol verde.

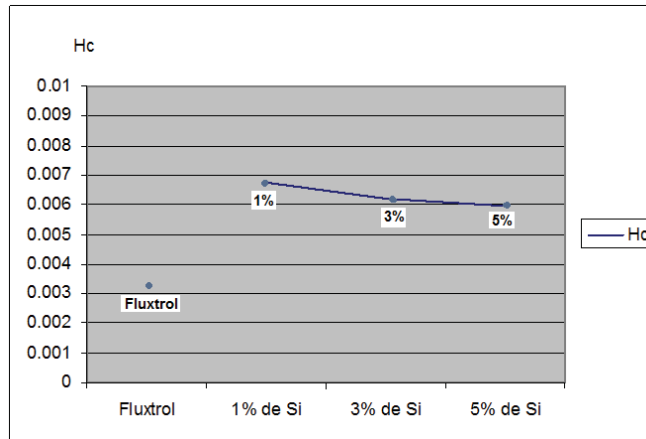


Figura 3.32 Tendencia de comportamiento de la Fuerza coercitiva (Hc) de las aleaciones Fe-1, 3 y 5%Si.

La saturación magnética (Ms), al contrario de la fuerza coercitiva, se incrementa sustancialmente (figura 3.33) al aumentar el contenido de silicio de 1 a 5%;

incrementándose en 0.41 T y superando la magnetización de saturación del Fluxtrol verde, que es de 0.808 T.

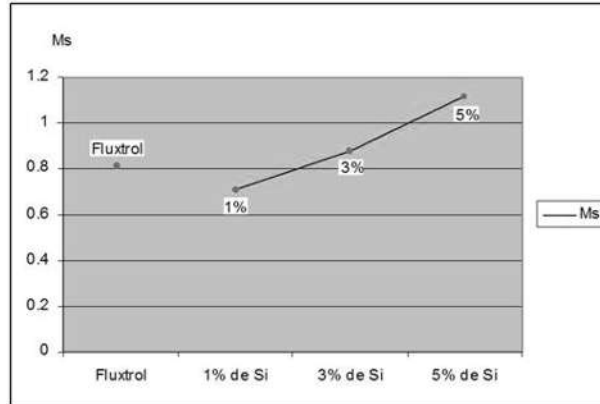


Figura 3.33 Tendencia de comportamiento de la saturación magnética (Ms) de las aleaciones de Fe- 1, 3 y 5%Si.

La Remanencia (Mr) de las aleaciones estudiadas exhibe (figura 3.34), al igual que la saturación magnética, un incremento al aumentar el contenido de silicio. Con el incremento del 1.0 a 5.0 %, en el contenido de silicio, la remanencia pasa de 3.2×10^{-2} T a 6.4×10^{-2} T. Este valor es superior al mostrado por el concentrador de energía magnética de carácter comercial (Fluxtrol verde).

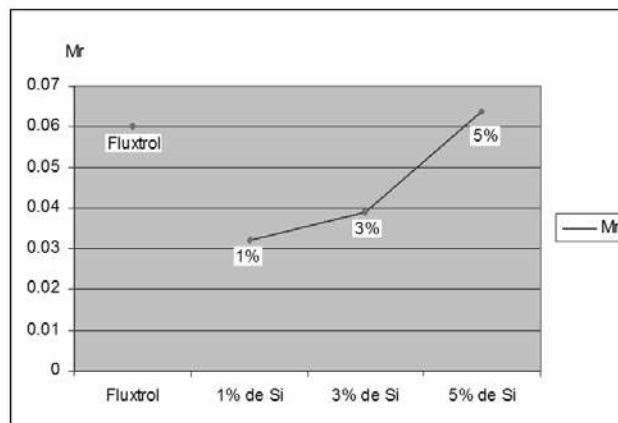


Figura 3.34 Tendencia de comportamiento de la Remanencia (Mr) de las aleaciones de Fe-1, 3 y 5%Si.

3.3.3 Resistividad eléctrica

Los resultados obtenidos en los ensayos para medir esta propiedad muestran variaciones mínimas con el incremento en el contenido de silicio, tal y como se observa en la siguiente tabla. Estos valores son muy inferiores al mostrado por el Fluxtrol.

Tabla 3.3 Resistividad eléctrica de las aleaciones Fe – Si

Aleación	Resistividad Eléctrica (Ω -cm)
Fe – 1.0% Si	62
Fe – 3.0% Si	65
Fe – 5.0 % Si	66
FLUXTROL	500

3.3.4 Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética de las aleaciones Fe–Si son del mismo orden que las del Fluxtrol, a excepción de la de 5% Si, que es mayor ligeramente, como se observa en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Permeabilidad magnética de las aleaciones Fe-Si

Aleación	Permeabilidad Magnética
Fe – 1.0 % SI	21.32
Fe – 3.0 % Si	23.06
Fe – 5.0 % Si	25.72
FLUXTROL	23.74

3.3.5 Dureza Rockwell B

Los resultados del ensayo de dureza Rockwell B (tabla 3.5) realizado a las aleaciones de Fe-Si después del sinterizado, permiten establecer que para cualquiera de las aleaciones estudiadas, la dureza es mayor a la mostrada por el Fluxtrol. Lo anterior se debe al elemento de aleación de hierro que es diferente al empleado en las aleaciones estudiadas en el presente trabajo; así como al procedimiento de manufactura de aquél.

Tabla 3.5 Dureza Rockwell B de las aleaciones Fe – Si

Aleación	Dureza Rockwell B
Fe – 1.0 % Si	83
Fe – 3.0 % Si	83
Fe – 5.0 % Si	88
FLUXTROL	65

Estos resultados muestran también, el efecto sobre la dureza del incremento en el contenido de silicio de la aleación Fe-Si.

3.4 Resultados de aplicabilidad en máquinas de inducción

Las aleaciones estudiadas, una vez sometidas al proceso descrito en el procedimiento experimental, se emplearon en la manufactura de la geometría adecuada para acoplarse a la bobina y someter a tratamiento térmico de temple con calentamiento por inducción a un árbol de levas y así, determinar la eficiencia de dichas aleaciones.

El tratamiento se realizó en una máquina de inducción industrial contando con todo el herramental incluyendo la bobina de inducción, de acuerdo al siguiente criterio de comparación: inicialmente se realizó el tratamiento de temple sin utilizar los materiales concentradores de energía magnética, y realizando las mediciones operativas de tiempo de

calentamiento en segundos, kilowatts/segundo consumidos, profundidad de temple en milímetros y dureza obtenida en las levas tratadas.

Posteriormente se realizó el mismo tratamiento utilizando las aleaciones de Fe-Si estudiadas. De igual manera, se realizó el temple utilizando el material de referencia (Fluxtrol verde). En todos los casos se realizaron las mediciones respectivas.

Una vez instalada la bobina en la máquina de inducción, se posicionó la pieza con relación al inductor (bobina) y se inició el calentamiento por inducción a una temperatura de 880°C, medido con un pirómetro óptico integrado a la máquina de inducción por un tiempo determinado seguido de un temple mediante la aplicación de refrigerante hasta alcanzar la temperatura ambiente.

3.5 Resultados obtenidos en las levas templadas

En el caso de este dispositivo (árbol de levas), se requiere cumplir con los requisitos establecidos (ver figura 3.35) para la “cresta” de la leva y la especificación de “profundidad de temple”. La dureza en los puntos 1, 2 y 3 debe estar en el rango 33 – 55 HRc. Estas especificaciones metalúrgicas las solicita el cliente (en el caso de este trabajo, la "Kohler company") y son requerimientos secretos industrialmente.

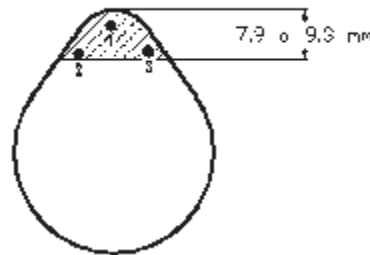


Figura 3.35 Profundidad de temple requerido en la leva

Las levas tratadas térmicamente (calentamiento por inducción y templadas) utilizando las aleaciones Fe-Si estudiadas, el Fluxtrol y sin uso de concentradores de

energía magnética; y preparadas metalográficamente, se observaron al microscopio a fin de visualizar el perfil de temple en la leva (ver figura 3.36) y especialmente en la cresta de la misma.



Figura 3.36 Secciones del árbol de levas que muestran el perfil de temple en la “cresta” de la leva.

Las lecturas de dureza HRC correspondientes a los puntos 1, 2 y 3, mostrados en la figura 3.35; se presentan en la tabla 3.6.

La dureza promedio obtenida en las levas tratadas térmicamente utilizando el concentrador de energía magnética comercial (Fluxtrol) es ligeramente mayor a la obtenida cuando se utilizaron como concentradores, las diferentes aleaciones de Fe-Si; la diferencia es aún mayor cuando el tratamiento se realizó sin el uso de un concentrador magnético.

En términos de la dureza HRC, la aleación Fe-Si que proporciona la dureza más cercana a la mostrada por el Fluxtrol es la aleación Fe-5.0%Si.

Tabla 3.6 Comparación en las durezas en la cresta de la leva en los puntos 1,2 y 3 cuando se usaron los diferentes concentradores de energía magnética

Concentrador de energía magnética	DUREZA HRc			Dureza HRc promedio
	1	2	3	
Fe - 1.0 Si	52	53	52	52.33
Fe - 3.0 Si	52	54	52	52.66
Fe - 5.0 Si	53	54	53	53.33
Fluxtrol	53	55	54	54
S/ concentrador	50	52	52	51.33

La tabla 3.7 muestra los parámetros operativos medidos en la máquina de inducción durante tres pruebas de tratamiento térmico en las levas. Las mediciones de éstos corresponden a: “tiempo de calentamiento (seg), energía consumida durante el tratamiento (KW/seg), profundidad de temple (mm).

A través de tratamientos térmicos previos (tabla 3.7) realizados sin el uso de concentradores de energía magnética, para encontrar la “profundidad de temple” se determinó que para lograrla se requieren de tiempos de calentamiento de 4.1 segundos, aproximadamente. Esta conclusión se desprende del hecho de que la profundidad de temple requerida varía entre 7.9 y 9.3 mm y esto se logra con los parámetros operativos utilizados en el tratamiento 2.

Las profundidades de temple obtenidas para todos los casos, aumenta al incrementar los contenidos de silicio en la aleación.

Tabla 3.7 Parámetros operativos obtenidos en la máquina de inducción después de los tratamientos térmicos de temple.

TRATAMIENTO 1

	S/concentrador	Fe-1%Si	Fe-3%Si	Fe-5%Si	Fluxtrol
Tiempo de calentamiento (seg.)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Energía consumida (KW/seg.)	110	105	100	95	92
Profundidad de temple (mm.)	6	6.5	6.8	7.4	7.2

TRATAMIENTO 2

	S/concentrador	Fe-1%Si	Fe-3%Si	Fe-5%Si	Fluxtrol
Tiempo de calentamiento (seg.)	4.1	3	3	3	3
Energía consumida (KW/seg.)	136	136	122	116	112
Profundidad de temple (mm.)	8	8.2	9	9.1	8.25

TRATAMIENTO 3

	S/concentrador	Fe-1%Si	Fe-3%Si	Fe-5%Si	Fluxtrol
Tiempo de calentamiento (seg.)	5	5	5	5	5
Energía consumida (KW/seg.)	160	155	135	138	136
Profundidad de temple (mm.)	10.7	11.5	12.3	12.7	11.6

Lo anterior se observa gráficamente en figuras 3.37 a 33.41 que muestran la relación entre el “tiempo de calentamiento” expresado en segundos y la “profundidad de temple” (mm) referentes a la leva tratada por medio del proceso de calentamiento por inducción.

Cuando no se utilizó concentrador de energía magnética, la profundidad máxima lograda fue de 10.7 mm a un tiempo de 5.0 segundos (figura 3.37).

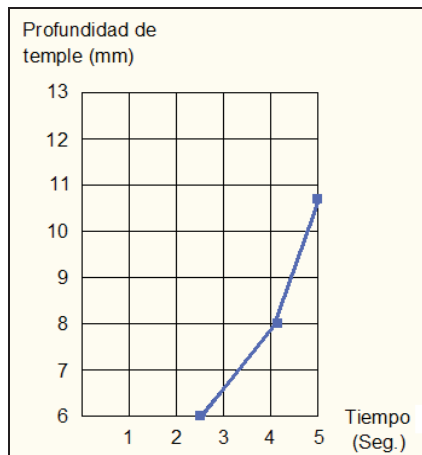


Figura 3.37 Profundidad de temple alcanzada al emplear una bobina sin concentrador de energía magnética.

Al utilizar, durante el tratamiento, una bobina de inducción cubierta con un concentrador de energía magnética de la aleación Fe-1.0%Si (figura 3.38), la profundidad de temple aumenta conforme se incrementa el tiempo de calentamiento, hasta alcanzar los 11.5 mm, con un tiempo de 5 segundos.

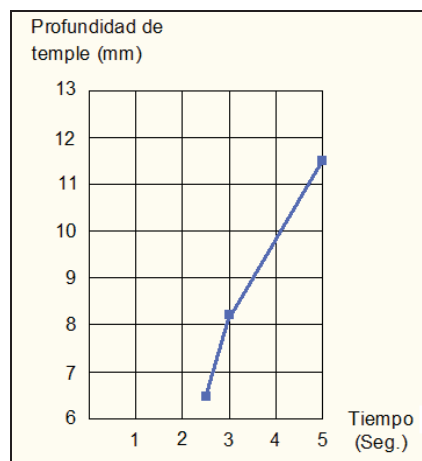


Figura 3.38 Profundidad de temple alcanzada al emplear una bobina con concentrador de energía magnética de Fe - 1%Si.

Al incrementar el contenido de silicio en el concentrador de energía magnética en un 2% en peso (figura 3.39), la profundidad de temple aumenta hasta alcanzar los 12.3 mm, utilizando un tiempo de calentamiento de 5.0 segundos.

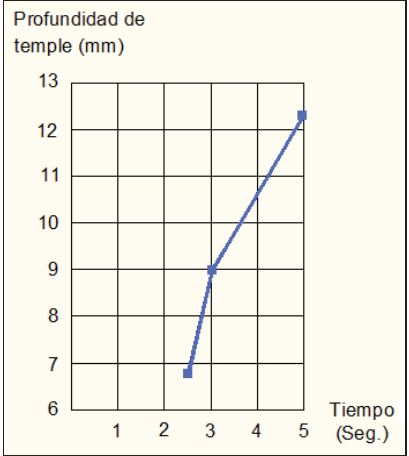


Figura 3.39 Profundidad de temple lograda al utilizar una bobina con contrador de energía magnética de Fe - 3%Si.

La figura 3.40 muestra que la profundidad de temple aumenta hasta los 12.7 mm. con un tiempo de 5 segundos. Estos resultados se obtuvieron al instalar concentradores de energía en la bobina de Fe – 5%Si.

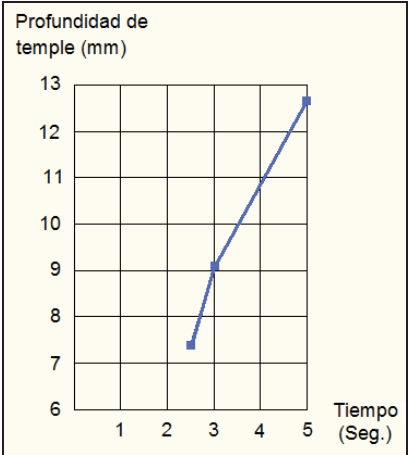


Figura 3.40 Profundidad de temple lograda al utilizar una bobina con contrador de energía magnética de Fe - 5%Si.

Al emplear en la bobina de inducción una cubierta de Fluxtrol verde (figura 3.41), la profundidad máxima alcanzada fue de 11.6 mm con un tiempo de 5.0 segundos.

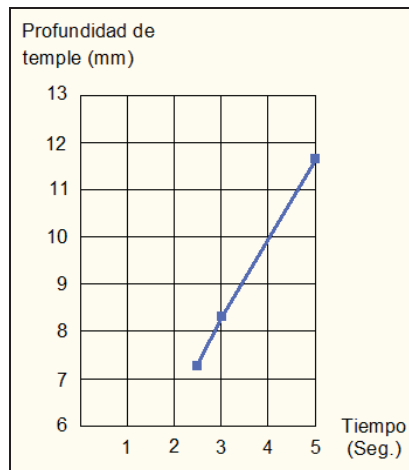


Figura 3.41 Relación del tiempo de calentamiento con respecto a la profundidad de temple lograda al utilizar el producto Fluxtrol verde.

De los resultados presentados en esta sección, se pueden destacar los siguientes aspectos: a) al aumentar el tiempo de calentamiento, aumentan tanto la energía consumida como la profundidad de temple, este comportamiento se presenta en todos los casos, con o sin concentrador de energía magnética; sin embargo, b) El uso de las aleaciones de Fe-Si permite aumentar la profundidad de temple, c) El incremento en la cantidad de silicio influye en un aumento en la profundidad de temple y d) con el uso de concentradores de energía magnética, el consumo de energía es menor.

En síntesis, el uso de este tipo de materiales en los tratamientos térmicos de temple por inducción, permite obtener la profundidad de temple y las propiedades mecánicas adecuadas en la pieza con un consumo menor de energía, lo que repercute en la economía del proceso.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el trabajo de investigación realizado en relación con el diseño y manufactura de materiales concentradores de energía magnética y fundamentalmente con el objetivo de producir este tipo de productos (de importación y de alto costo) en el país, utilizando materias primas nacionales para disminuir costos de adquisición, así como aumentar la eficiencia del proceso de tratamiento térmico de temple por inducción al disminuir tiempos de proceso y por ende, costos de producción.

4.1 Conclusiones

Las conclusiones se presentan en dos apartados diferentes:

- a) En relación con la manufactura del material concentrador de energía magnética
- b) En función de los resultados de aplicabilidad en máquinas de inducción.

a) En relación con la manufactura del material concentrador de energía magnética.

1.- Las 3 aleaciones de Fe-Si producidas, cumplieron con la característica que debe presentar todo material magnético suave como una fuerza coercitiva y remanencia pequeñas; saturación magnética alta. Es decir un ciclo de histéresis delgado y una resistividad eléctrica alta.

2.- La permeabilidad magnética; una de las más importantes en los magnetos suaves; en las aleaciones estudiadas con contenidos de 1% y 3% de silicio en peso, es del mismo orden que la mostrada por el Fluxtrol verde. La aleación con el mayor contenido de silicio (5%) mostró una permeabilidad magnética de un 8.34% mayor.

3.- La dureza HR_B en las aleaciones hierro-silicio estudiadas fue en todos los casos mayor a la del fluxtrol verde. Para la aleación con 1% de silicio el incremento fue de 18 puntos HR_B ; mismo incremento se presentó para la aleación con 3% de silicio. En la aleación Fe-5%Si el incremento correspondiente fue de 23 puntos HR_B .

4.- De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que el silicio es un elemento sustituto aceptable del fósforo en la manufactura de materiales concentradores magnéticos comerciales de importación como lo es el Fluxtrol verde.

a) En función de los resultados de aplicabilidad en máquinas de inducción:

1.- La dureza promedio que se obtuvo en las levas tratadas térmicamente cuando se utilizaron las diferentes aleaciones producidas de hierro con 1, 3 y 5 % silicio, fueron entre 3 y 1 % menores a la dureza obtenida utilizando el concentrador magnético “Fluxtrol verde”.

2.- Las profundidades de temple obtenidas para todos los casos, aumenta al incrementar los contenidos de silicio de la aleación.

3.- La aleación Fe-5%Si, es la que muestra mejores resultados de aplicabilidad en el proceso de temple por inducción. Para un tiempo de calentamiento de 3 segundos se logró una profundidad de temple de 9.1 mm. Esta profundidad de temple es 10.3% mayor que la obtenida cuando se utilizó el Fluxtrol verde.

4.- Con esta información se puede concluir que: utilizando el material concentrador de energía magnética correspondiente a la aleación Fe-5% en peso de silicio, se obtiene una mayor eficiencia en el proceso industrial del calentamiento por inducción y temple.

4.2 Recomendaciones

- 1.- Fabricar concentradores de energía magnética utilizando compactaciones de polvos con presiones mayores a 10 ton/in^2 (140 MPa), para aumentar la densidad en verde de los polvos.
- 2.- Utilizar una doble aplicación de presión con 2 punzones en la fabricación de magnetos suaves, para hacer un compactado más uniforme.
- 3.- Realizar un estudio sobre las variables del tratamiento del sinterizado: tiempo, temperatura y atmósfera protectora endotérmica, para determinar su influencia en las propiedades magnéticas del material concentrador de energía.
- 4.- Utilizar el concentrador de energía magnética (Fe-5%Si) en diferentes geometrías de bobinas para analizar el comportamiento de las variables de la máquina de inducción.
- 5.- Fabricar concentradores con otro tipo de materias primas, como son las aleaciones amorfas de base cobalto, para mejorar la permeabilidad magnética.
- 6.- Analizar el comportamiento de la aleación Fe-5%Si, en temple por inducción de piezas de acero de medio carbono.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - Apraiz Barreiro José “Tratamientos térmicos de los aceros” 8ª. Edición, reimpresión, Editorial Dossat, S.A. 1981.
- [2] - Fluxtrol Inc. “Guía para la tecnología por inducción” 2006, Fluxtrol Inc.
- [3] - Ruffini Robert T, Nemkov Valentin S. “Magnetic Field Control and Concentration in Induction Heating Coils”. Fluxtrol Manufacturing, 1996.
- [4] - Groover Mikell P. “Fundamentos de Metalurgia Moderna” Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, 1998.
- [5] - E. Paul Degarmo, J. T. Black, Ronald A. Kohser. “Materials and Processes in Manufacturing”, 8 Th. Edicion, Editorial Prentice Hall. 1997.
- [6] - S. Kalpakjian. “Manufacturing Processes for Engineering Materials”. Ed. World Student Series Addison-Wesley. 1991.
- [7] - Metals Handbook, Volume 7, “Powder Metallurgy”, Ninth Edition, 1984.
- [8] - Norman H. Crowhurts “Física Electrónica”, 1985.
- [9] - Askeland Donald R. “Ciencia e ingeniería de los materiales” 3ª. Edición, 1998.
- [10] - Smith William F. “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales” 2ª. Edición. Mc Graw Hill, 1992.
- [11] - Tudbury Chester A. “Basics of induction heating Vol. 1”, IPE Cheston, 1980.
- [12] - Chester A. Tudbury and S. L. Semiantin. “ASM International, course 60 Induction Heating”. 1995.
- [13] - Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook, Micah Black. “Handbook of Induction Heating”. Ed. Marcel Dekker, Inc.2003.
- [14] - Valery Rudnev, R. Cook “Magnetic Field Concentrators: Mhyths, Realities and Profits” Metal Heat Treating . March/April. 1995.
- [15] - Ruffini Robert S. “Induction Heating Coil Technology for the 21 Century” 1996.
- [16] - Ruffini Robert S. “Flux control and concentration in induction heating process” 1996.
- [17] - Lamonte J. S. and Black M. R. “How flux field concentrators improve inductor efficiency”, 1989.

- [18] - Waring Walter. "Electromagnetic Induction and Electric Conduction" 1a. Edición. Centre Francais de l'Electricite, 1997.
- [19] - Becker William T. "Metalurgia para no metalurgistas", 1987.
- [20] - Berber T. Rigoberto. "Diseño de una bobina inductora empleada en tratamientos térmicos de temple para levas automotrices", 2002.
- [21] - http://ghe.es/espanol/aplicaciones_s.htm.
- [22] - Warburton-Brown, "Induction Heating Practice" Odhams Press, Ltd., London, 1956.
- [23] - Welduction "The induction treat process and equipment guide", 2000.
- [24] - Avner S. H. "Introducción a la metalurgia fisica", Mc Graw Hill, 1975.
- [25] - Rudnev Valery I. "Induction Heat Treatment" Marcel Dekker, 1997.