



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



---

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS**

**PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS DE  
COMPOSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA [Fe – Polímero]**

**TESIS**

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

**PRESENTA: Carlos Ernesto Borja Soto**

**ASESOR: Dr. Jorge Alejandro Verduzco Martínez**

**MORELIA, MICH., FEBRERO DE 2012**

**A MIS PADRES**

VERÓNICA SOTO Y EDUARDO BORJA

**A MIS HERMANAS**

MÓNICA BORJA Y PAULINA BORJA

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por soporte económico brindado durante el desarrollo del este trabajo.

Al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, por las facilidades para continuar con mi formación académica.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, por las facilidades otorgadas durante la estancia académica para la realización de este trabajo.

Al Dr. Jorge Alejandro Verduzco Martínez, por su confianza y apoyo, para la realización del presente trabajo.

Al Dr. José Israel Betancourt Reyes, por su asesoría y colaboración, para llevar a cabo este proyecto.





# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b>	i
<b>LISTA FIGURAS</b>	iii
<b>LISTA DE TABLAS</b>	vi
<b>RESUMEN</b>	viii
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	ix
<b>OBJETIVOS</b>	x
<b>HIPOTESIS</b>	xi
<b>CAPITULO I: INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Materiales compuestos</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Materiales compositos magnético suaves</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Pérdidas de energía en materiales magnéticos suaves</b>	<b>4</b>
<b>2.4 Propiedades magnéticas y eléctricas de materiales compuestos magnéticos suaves</b>	<b>6</b>
<b>2.5 Aplicaciones de los materiales magnéticos suaves</b>	<b>15</b>
<b>2.6 Concentrador de energía magnética</b>	<b>17</b>
<b>CAPITULO III: EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Caracterización de materias primas</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Proceso de fabricación de compositos</b>	<b>21</b>
3.2.1 Plan de mezclas	22

---

3.2.2	Mezcla de componentes	23
3.2.3	Etapa de compactación	23
3.2.4	Curado	27
3.2.5	Ajuste de dimensiones	27
<b>3.3</b>	<b>Caracterización de los materiales compósitos</b>	<b>28</b>
3.3.1	Caracterización microestructural	28
3.3.2	Permeabilidad magnética	29
3.3.3	Curvas de histéresis de los materiales compuestos	31
<b>3.4</b>	<b>Resistividad eléctrica</b>	<b>32</b>
<b>3.5</b>	<b>Capacitancia eléctrica</b>	<b>33</b>
<b>3.6</b>	<b>Microdureza</b>	<b>34</b>
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterización de materias primas</b>	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterización de materiales compuestos</b>	<b>40</b>
4.2.1	Resistividad eléctrica de materiales compuestos	44
4.2.2	Permeabilidad magnética de materiales compuestos	49
4.2.3	Campo coercitivo de materiales compuestos	51
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES</b>		<b>52</b>
<b>RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO</b>		<b>53</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

<b>Fig. 2.1.</b> Partículas aisladas eléctricamente [10].	3
<b>Fig. 2.2.</b> Ciclo de histéresis ferromagnético [19].	4
<b>Fig. 2.3.</b> Efecto del tamaño de partícula en la permeabilidad magnética [24].	8
<b>Fig. 2.4.</b> Efecto de la frecuencia sobre la permeabilidad magnética [24].	8
<b>Fig. 2.5.</b> Efecto del tamaño de partícula en la resistividad eléctrica [24].	9
<b>Fig. 2.6.</b> Permeabilidad magnética de compositos reforzados con polvos de hierro. [26].	11
<b>Fig. 2.7.</b> Efecto del tiempo de molienda sobre la permeabilidad magnética [30].	14
<b>Fig. 2.8.</b> Permeabilidad magnética de compactos de Fe-Ni y Fe-Ni-Mo [31].	15
<b>Fig. 2.9.</b> Componentes de un sistema de calentamiento por inducción [32].	16
<b>Fig. 2.10.</b> Aplicación del sistema de calentamiento por inducción a materiales de diferentes geometrías [32].	16
<b>Fig. 2.11.</b> Distribución del campo magnético en una bobina: A) sin utilizar concentrador de flujo magnético y B) utilizándolo [33].	18

### CAPÍTULO III

<b>Fig. 3.1</b> Diagrama de flujo del desarrollo experimental.	22
<b>Fig. 3.2</b> Procesador ultrasónico.	23
<b>Fig. 3.3</b> Anillo para elaboración de bobina, forma requerida para ensayos de permeabilidad magnética.	24
<b>Fig. 3.4</b> Prisma rectangular, forma requerida para ensayos de magnetometría (curvas de histéresis magnética) y propiedades eléctricas.	24
<b>Fig. 3.5</b> Dado para obtención de anillos de material compuesto.	24
<b>Fig. 3.6.</b> Dado para obtención de anillos de material compuesto.	25
<b>Fig. 3.7</b> Prensa de compactación uniaxial marca Carver.	25

<b>Fig. 3.8.</b> Desecador de vidrio.	27
<b>Fig. 3.9.</b> Maquinado del largo de un anillo de material compuesto.	27
<b>Fig. 3.10.</b> Maquinado de sección cuadrada del prisma rectangular de material compuesto.	28
<b>Fig. 3.11.</b> Microscopio Electrónico de Barrido.	29
<b>Fig. 3.12.</b> Analizador de impedancia.	30
<b>Fig. 3.13.</b> Bobina con núcleo de material compuesto.	30
<b>Fig. 3.14.</b> Anillo embobinado, los triángulos representan las terminales a conectar en el analizador de impedancia.	31
<b>Fig. 3.15.</b> Toroide conectado a los bornes de conexión del analizador de impedancia.	31
<b>Fig. 3.16</b> Magnetómetro.	32
<b>Fig. 3.17</b> Circuito eléctrico para determinación de resistencia eléctrica.	33
<b>Fig. 3.18</b> Circuito eléctrico para determinación de resistencia eléctrica en corriente directa.	33
<b>Fig. 3.19.</b> Configuración general de equipos para ensayo de impedancias.	34
<b>Fig. 3.20.</b> Distribución de puntos de prueba en ensayo de dureza.	34

## CAPÍTULO IV

<b>Fig. 4.1.</b> Distribución diferencial de tamaño de partícula de polvo grueso de hierro.	35
<b>Fig. 4.2.</b> Distribución diferencial de tamaño de partícula de polvo fino de hierro.	36
<b>Fig. 4.3.</b> Polvo de hierro con tamaño de 7.µm en promedio.	37
<b>Fig. 4.4.</b> Polvo de hierro con tamaño de 109µm en promedio.	38
<b>Fig. 4.5.</b> Difractograma de rayos x. polvos de Fe 109µm (azul) y polvos de Fe 7 µm (rojo).	38
<b>Fig. 4.6.</b> Análisis DTA – TGA del polímero.	39
<b>Fig. 4.7.</b> Partículas de hierro con tamaño de 7 µm encapsuladas en resina, antes de ser compactadas. Se puede observar la formación de aglomerados.	40
<b>Fig. 4.8.</b> Partículas de hierro con tamaño de 109 µm encapsuladas por resina, antes de ser compactadas.	40
<b>Fig. 4.9.</b> Curvas de compresibilidad de materiales compuestos Fe – Polímero.	40
<b>Fig. 4.10.</b> Efecto de la presión de compactación sobre la dureza de los materiales compuestos Fe – polímero.	42

- Fig. 4.11.** Efecto de la presión de compactación sobre la densidad de los composites Fe – Polímero. 42
- Fig. 4.12.** Efecto de la presión de compactación y tamaño de partícula sobre la porosidad de los materiales Fe – Polímero. 43
- Fig. 4.13.** Materiales compuestos (94% Fe, 7 $\mu$ m) obtenidos a presiones (a) 156 KPa, (b) 468 KPa, (c) 936 KPa. 44
- Fig. 4.14.** Materiales compuestos (94% Fe, 109 $\mu$ m) obtenidos a presiones. (a) 156 KPa, (b) 468 KPa, (c) 936 KPa. 44
- Fig. 4.15.** Efecto de la presión de compactación, tamaño de partícula y concentración de polímero sobre la resistividad eléctrica de los materiales compuestos. 45
- Fig. 4.16.** Efecto de la presión de compactación, tamaño de partícula y concentración de polímero sobre la conductividad eléctrica de los materiales compuestos. 45
- Fig. 4.17.** Impedancia eléctrica mostrada por material compuesto (94%Fe, 7  $\mu$ m). 46
- Fig. 4.18.** Intensidad de corriente eléctrica mostrada por material compuesto (94%Fe, 7  $\mu$ m). 47
- Fig. 4.19.** Curvas de impedancia respecto a la frecuencia de los materiales compuestos (94%Fe, 7  $\mu$ m) obtenidos a diferentes presiones de compactación. 48
- Fig. 4.20.** Curvas de capacitancia respecto a frecuencia de los materiales compuestos (94%Fe, 7  $\mu$ m) obtenidos a diferentes presiones de compactación. 48
- Fig. 4.21.** Valores máximos de impedancia respecto a la presión de compactación de los materiales compuestos. 49
- Fig. 4.22.** Material compuesto (94% Fe, 7 $\mu$ m) obtenido a una presión de 468 KPa. 49
- Fig. 4.23.** Permeabilidad magnética inicial de los materiales compuestos. 50
- Fig. 4.24.** Coercividad magnética de los diferentes materiales compuestos Fe - Polímero. 51

## LISTA DE TABLAS

### CAPÍTULO II

<b>Tabla 2.1.</b> Comportamiento de propiedades magnéticas y eléctricas en función de la composición química y variables de procesamiento en materiales compuestos [21].	6
<b>Tabla 2.2.</b> Propiedades eléctricas y magnéticas de materiales sinterizados obtenidos por tecnología de polvos [22].	7
<b>Tabla 2.3.</b> Propiedades eléctricas y magnéticas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con polvos de hierro esponja [23].	7
<b>Tabla 2.4.</b> Permeabilidad magnética y resistividad eléctrica de composites de matriz polimérica [25].	10
<b>Tabla 2.5.</b> Efecto de la presión de compactación en frío y en caliente sobre la densidad y propiedades magnéticas [26].	10
<b>Tabla 2.6.</b> Efecto de la concentración de refuerzo ferromagnético sobre la resistividad eléctrica y permeabilidad magnética [27].	12
<b>Tabla 2.7.</b> Propiedades eléctricas y magnéticas de materiales sinterizados [28].	12
<b>Tabla 2.8.</b> Efecto de la temperatura de compactación y tratamiento térmico sobre la resistividad de compactos de hierro y composites Fe-Polímero [29].	13
<b>Tabla 2.9.</b> Propiedades eléctricas, magnéticas y mecánicas de materiales sinterizados Fe-Si obtenidos por tecnología de polvos [35].	20
<b>Tabla 2.10.</b> Efecto de la presión de compactación en materiales compuestos (Fe-Ni)- Polímero [34].	20

### CAPÍTULO III

<b>Tabla3.1.</b> Plan de mezcla para obtención de materiales compuestos Fe – Polímero.	22
<b>Tabla3.2.</b> Presiones de compactación aplicadas para la obtención de anillos.	26
<b>Tabla3.3.</b> Presiones de compactación aplicadas para la obtención de prismas rectangulares.	26

## CAPÍTULO IV

<b>Tabla 4.1.</b> Estadística de tamaño de partícula referente a polvo de mayor tamaño.	35
<b>Tabla 4.2.</b> Estadística de tamaño de partícula referente a polvo fino.	36
<b>Tabla 4.3.</b> Área superficial específica.	37
<b>Tabla 4.4.</b> Parámetro de red de las estructuras cristalinas del hierro [26].	39

## RESUMEN

El calentamiento por inducción ha sido un método muy utilizado en tratamientos térmicos debido a la reducción en tiempos de calentamiento, sin embargo una gran desventaja es la eficiencia (70% aproximadamente). Debido a ello se han desarrollado concentradores de energía magnética, los cuales son el estudio del presente proyecto. Los concentradores de energía magnética deben de poseer alta permeabilidad magnética inicial, baja fuerza coercitiva, alta saturación magnética y alta resistividad eléctrica; para mejorar la eficiencia, y como consecuencia un ahorro en el consumo de energía eléctrica.

En el presente trabajo se obtuvieron materiales compuestos de matriz polimérica obtenidos por compactación uniaxial a seis presiones de compactación que van de 1.5 kPa hasta 9.5 kPa, utilizando polvos de Fe con granulometría de  $\sim 7\mu\text{m}$  y  $\sim 109\mu\text{m}$ , con 2 concentraciones del polímero de 6% y 8% en peso.

Se encontraron valores de resistividad eléctrica que van de  $1\Omega\text{m}$  hasta  $210\text{ k}\Omega\text{m}$ . Observaciones por microscopía electrónica de barrido revelaron que al aumentar la presión de compactación las partículas comenzaban a estar más cercanas unas de las otras, de esta forma, las propiedades de conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, densidad y dureza, se incrementaban.

Los valores de resistividad eléctrica decrecieron al incrementar la presión de compactación, favoreciéndose así el transporte de carga eléctrica. La resistividad se incrementó con la disminución del tamaño de partícula de los polvos metálicos y el aumento en la concentración de polímero.

Mediante el análisis de impedancia se determinó que el mecanismo de transporte de carga es del tipo capacitivo, dado que la impedancia de los materiales disminuyó con el incremento de la frecuencia de la corriente alterna. Los valores de impedancia encontrados van de  $50\ \Omega$  a  $900\text{ k}\Omega$ ,

Los valores de permeabilidad magnética encontrados se encuentran en un rango de 100 hasta 400, los materiales compuestos Fe-polímero con menor resistividad exhibieron valores más altos de permeabilidad.

Mediante magnetometría se obtuvieron las curvas de histéresis de cada material compuesto y se determinó que todos los materiales obtenidos en este trabajo son del tipo “magnéticos suaves” (valores próximos e inferiores a  $100\text{Oe}$ ), también se observó que la coercividad se incrementa en materiales de alta resistividad eléctrica.

## JUSTIFICACION

Los concentradores de energía magnética en aplicaciones de calentamiento por inducción deben de poseer las siguientes propiedades magnéticas: alta permeabilidad magnética, baja fuerza coercitiva, alta magnetización y alta resistividad eléctrica, para aumentar la eficiencia del proceso de calentamiento e incrementar el ahorro en el consumo de energía eléctrica.

Se ha encontrado que algunos materiales compuestos de matriz polimérica metal – polímero obtenidos por tecnología de polvos pueden poseer las características mencionadas. Sin embargo, para completar la información referente a estos materiales hace falta realizar una investigación detallada en cuanto a las variables de presión de compactación, concentración del polímero y tamaño de partícula, manteniendo constante la frecuencia de agitación de los componentes durante la mezcla de los mismos.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO PRINCIPAL

Obtener materiales compuestos de matriz polimérica [Fe-Polímero] a seis diferentes presiones de compactación mediante tecnología de polvos, utilizando polvos de Fe de dos distintas granulometrías y dos concentraciones de polímero, con la finalidad de encontrar los valores más altos de permeabilidad magnética, resistividad eléctrica, para su posible uso en concentradores de energía magnética.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener valores de permeabilidad magnética superiores a 100 y de coercividad magnética inferiores a 100 Oe.
- Obtener valores de resistividad eléctrica superiores a 158 k $\Omega$ m y alta impedancia eléctrica para relacionarlos con la microestructura de los materiales obtenidos.
- Obtener baja porosidad y alta densificación, para observar su efecto en las propiedades eléctricas y magnéticas.

## HIPÓTESIS

Los materiales compuestos de matriz polimérica [Fe-Polímero] fabricados con polvo de hierro de menor tamaño de partícula y obtenidos a mayores presiones de compactación tendrán los valores más altos de permeabilidad magnética ( $\mu > 100$ ), debido al incremento del número de dominios magnéticos; manteniendo valores de resistividad eléctrica superiores a  $158 \text{ k}\Omega\text{m}$ , debido a la alta resistividad eléctrica de la matriz de polimérica.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la tecnología de la metalurgia de polvos tiene muchos campos de aplicación, principalmente en áreas especiales donde los procesos convencionales no cumplen con los requisitos necesarios, o porque serían más caros. Por otro lado, el ahorro de energía es también un tema importante debido a su impacto directo en la preservación del medio ambiente. En este sentido, los concentradores de flujo magnético que son producidos comercialmente [1,2], permiten un considerable ahorro de energía cuando se utilizan en las bobinas de inducción (refrigeradas con agua a temperaturas inferiores a 80 °C) ya sea para tratamientos térmicos o para la fundición de aleaciones metálicas.

Los componentes utilizados son metales y polímeros; Fe, Ni y Co (povos finos con tamaño de partícula que van desde la escala nanométrica [3] hasta micrométrica [4,5]) y resinas termoplásticas, respectivamente. Estos metales de transición aportan alta permeabilidad magnética (alrededor de 500) y las altas temperaturas de Curie (más de 300 ° C), junto con baja coercitividad (por debajo de 50 Oe), mientras que las resinas ofrecen una alta resistividad eléctrica, tales propiedades las deben poseer los concentradores de flujo magnético para su aplicación en las áreas específicas de tratamiento térmico o fundición de metales [1,2].

En esta tesis se presentan las propiedades eléctricas y magnéticas de materiales compuestos de matriz polimérica obtenidos por compactación uniaxial a seis presiones de compactación que van de 156 kPa hasta 936 kPa, utilizando povos de Fe con granulometría de  $\sim 7\mu\text{m}$  y  $\sim 109\mu\text{m}$ , concentraciones del polímero de 6% y 8% en peso. Se evaluó la permeabilidad magnética, coercitividad magnética, resistividad eléctrica, capacitancia y microdureza; para determinar el posible uso de estos materiales en aplicaciones de concentración de flujo de energía magnética.

# CAPÍTULO II

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATERIALES COMPUESTOS

De manera general a todas las combinaciones de materiales se les pueden llamar materiales compuestos o compositos, porque consisten en dos o más constituyentes identificables. Una definición más precisa de un composito podría ser: la combinación de un material de refuerzo en una matriz o material aglutinante. El término composito también implica que los materiales constituyentes son macroscópicamente identificables y mecánicamente separables. Esta definición excluye a muchos materiales, tales como: aleaciones metálicas, minerales, vidrios, maderas, entre otros [6]. Las matrices cumplen dos roles principales: transferir cargas a los componentes de refuerzo y proteger a los componentes de refuerzo de las condiciones medioambientales adversas.

Las propiedades de los materiales compositos dependen de las propiedades de los materiales que constituyan el material compuesto, proporción de componentes; también es importante la geometría y orientación del material de refuerzo, por su efecto en la anisotropía del sistema. Las aplicaciones de los materiales compuestos pueden ser del tipo estructural o funcional. Las aplicaciones del tipo estructura son aquellas donde interesan fundamentalmente las propiedades mecánicas y las funcionales son aquellas donde el material cumple una función específica en base a sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas u otras [7].

En los materiales compuestos avanzados el tipo de matriz más común es la polimérica, entre las más demandadas son del tipo epoxi, las cuales son del tipo termoestables. Las resinas epóxicas han tenido un buen desempeño debido a su excelente adhesión, su baja viscosidad, también porque sirven como un medio de protección a la corrosión y la versatilidad en su procesamiento [6]. La resistividad eléctrica de los polímeros es muy elevada comparada con la resistividad eléctrica exhibida por los metales. J. Espí y colaboradores [8] indican que el valor de resistividad del hierro es de  $10 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ , la cual es muy pequeña en comparación al valor de resistividad de  $5 \times 10^5 \Omega\text{m}$  de las resinas epoxi.

Las ventajas de las matrices termoplásticas es que no requieren calentamiento, presión, enfriamiento subsecuente al ser formadas y no reaccionan químicamente con los sólidos de refuerzo. Esto conlleva a ahorros en el tiempo de procesamiento y costos de equipamiento.

## 2.2 MATERIALES COMPOSITOS MAGNÉTICOS SUAVES

H. Shokrohalli y colaboradores [9] reportan que los materiales compositos suaves CMS son usados en aplicaciones electromagnéticas, dichos materiales pueden ser descritos como partículas ferromagnéticas encapsuladas en una película no conductora de electricidad, como se indica en la figura 2.1.



**Fig. 2.1.** Partículas aisladas eléctricamente [10].

Los CMS son normalmente manufacturados por técnicas convencionales de metalurgia de polvos (tecnología de polvos), tales como la compactación en caliente, compactación biaxial, compactación isostática, los compactos finales pueden ser sinterizados o no sinterizados.

Algunos investigadores han estudiado los diferentes aspectos de procesamiento de los materiales magnéticos suaves, los cuales incluyen al hierro puro y sus aleaciones, por ejemplo: Fe-Ni, Fe-Co [11-12], también ferritas magnéticas suaves [13-15]. Los nuevos materiales, incluyendo a los materiales amorfos y las cintas amorfas son los últimos desarrollos en la historia de los materiales magnéticos suaves.

La idea de los materiales compuestos Fe-Polímero para aplicaciones magnéticas suaves no es nueva. Dichos materiales aparecieron hace cien años aproximadamente, pero los materiales Fe-polímero han sido raramente utilizados debido a que la tecnología de fabricación y las necesidades reales de dichos materiales no fueron suficientemente desarrolladas. Sin embargo estas limitaciones se han ido superando debido al desarrollo de mejores materias primas y nuevas tecnologías de formado [8]. Estos materiales se encuentran en uso creciente en motores eléctricos reemplazando a los materiales laminados existentes [16].

Los materiales Fe-polímero están siendo desarrollados para generar materiales con propiedades magnéticas competitivas, tales como la buena permeabilidad magnética y alta resistividad eléctrica [17]. En años recientes ha sido estudiado el tamaño de partícula, composición química y parámetros de compactación (compactación en caliente, presión de compactación, resinas y los

métodos para la creación de la película aislante). Los materiales compuestos tienen muchas ventajas entre estas se encuentra la reducción de peso y tamaño. En muchas aplicaciones de núcleos magnéticos y máquinas magnéticas han sido capaces de reemplazar a láminas de acero y ferritas [16].

### 2.3 PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN MATERIALES MAGNÉTICOS SUAVES

Existen dos factores principales en las pérdidas de energía en los materiales magnéticos suaves, las cuales son pérdidas de energía debidas a la histéresis magnética y a las corrientes de Eddy [18]. Las pérdidas por histéresis son debidas a la disipación de energía requerida para desplazar las paredes de los dominios magnéticos durante la imanación y desimanación del material. Estas pérdidas de energía aumentan por la presencia de impurezas, imperfecciones, precipitados, dislocaciones, etc., que actúan como barreras que impiden el desplazamiento de las paredes de dominios durante el ciclo de imanación. El área encerrada por la curva de histéresis es una medida de la energía perdida debida a la histéresis magnética.

Al variar el campo magnético exterior aplicado a un material ferromagnético, la imanación remanente produce la histéresis, que se puede entender como la resistencia natural de los materiales al cambio rápido en el sentido del flujo magnético. En la fig. 2.2 se muestra el ciclo de histéresis ferromagnético en la cual se representa el efecto del campo magnético aplicado sobre la inducción magnética.

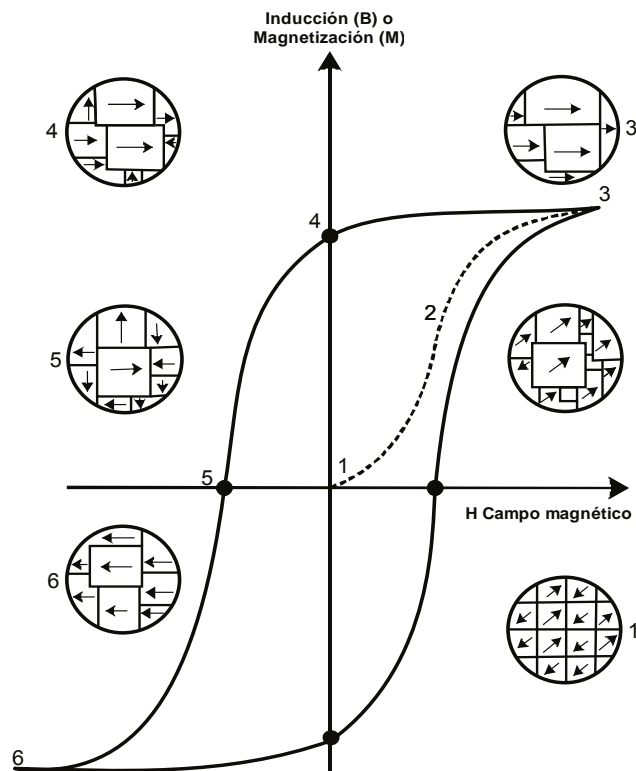


Fig. 2.2. Ciclo de histéresis ferromagnético [19].

Cuando a un material magnético se le aplica un campo magnético por primera vez, al principio la magnetización crece lentamente aumentando la velocidad conforme los dominios comienzan a crecer (punto 1 a 2). Posteriormente, la magnetización se vuelve más lenta, ya que finalmente los dominios deberán girar para poder llegar a la saturación o completo alineamiento (punto 3). 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 conocida como remanencia (punto 4). Si el valor de dicha magnetización es grande el material actúa como un imán permanente. Por otro lado, 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  $H_c$  (punto 5). Con incrementos adicionales en la intensidad del campo, finalmente se alinearán los dominios hacia la saturación en la dirección opuesta (punto 6).

Las corrientes de Eddy se producen cuando un conductor atraviesa un campo magnético o viceversa, la alternancia del campo eléctrico causa una circulación de electrones dentro del conductor, de tal forma que debido a estas corrientes se pueden generar magnetización incompleta y pérdidas de energía. Las corrientes de Eddy generan electroimanes con campos magnéticos que se oponen al campo magnético aplicado. Entre mayor sea la conductividad del material mayores serán las corrientes de Eddy. Las pérdidas de energía por estas corrientes se manifiesta por el incremento de temperatura del conductor por el efecto Joule. En un material compuesto reforzado con partículas se puede reducir el efecto de las corrientes de Eddy disminuyendo los caminos o rutas de transporte de carga eléctrica y adicionando materiales de baja conductividad. Las pequeñas distancias entre partículas actúan como zonas aislantes y no magnéticas, disminuyendo la permeabilidad magnética [9].

En los materiales constituidos por partículas de hierro, las impurezas de las partículas de hierro y sus regiones de esfuerzo generan zonas donde se dificulta el movimiento de las paredes de dominio magnético, así mismo la fuerza coercitiva puede verse aumentada por las mismas causas. El efecto anterior puede disminuirse utilizando hierro de alta pureza y mediante un tratamiento térmico después de la compactación, para eliminar las regiones de esfuerzo y así disminuir las pérdidas de energía por histéresis [9].

## 2.4 PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y ELÉCTRICAS DE MATERIALES COMPUESTOS MAGNÉTICOS SUAVES

Las propiedades magnéticas, eléctricas y magnéticas de los materiales compuestos magnéticos suaves dependen de la preparación y procesamiento de los componentes. En adición, la pureza de los materiales, forma y tamaño de las partículas influencia fuertemente a su respuesta magnética.

Las propiedades de los materiales compuestos suaves incluyen: isotropía térmica y magnética, generación de bajas pérdidas de energía debidas a corrientes de Eddy, alta permeabilidad magnética, baja coercividad y altas temperaturas de Curie [20]. Los materiales magnéticos suaves obtenidos por tecnología de polvos tienen ciertas limitaciones, por ejemplo: no se pueden obtener todas las formas geométricas [9]. La tabla 2.1 muestra de manera cualitativa el comportamiento de las propiedades de los materiales compuestos magnéticos suaves respecto a las variables de procesamiento.

**Tabla 2.1.** Comportamiento de propiedades magnéticas y eléctricas en función de la composición química y variables de procesamiento en materiales compuestos [21].

Propiedad	Comportamiento cualitativo				
	I	II	III	IV	V
Permeabilidad magnética	↑	↓	↓	↑	↑
Coercividad magnética	↑	–	–	↑	↓
Resistividad eléctrica	↓	↑	↑	↓	↓
<b>Leyenda</b>					
(I) Incrementando el tamaño de partícula.					
(II) Adición de lubricantes.					
(III) Adición de aislantes eléctricos.					
(IV) Incremento de la presión de compactación.					
(V) Tratamiento térmico.					

La densidad tiene un efecto significativo en el desempeño de las partes obtenidas por metalurgia de polvos, las piezas con alta densidad exhiben incremento de su permeabilidad y disminución de la fuerza coercitiva. Los métodos de compactación en caliente y compactación biaxial incrementan la permeabilidad magnética, la densidad y disminuye las pérdidas de energía por histéresis [9].

La tabla 2.2 muestra las propiedades de algunos materiales obtenidos por tecnología de polvos sinterizados, puede observarse los altos valores de permeabilidad magnética y bajos valores de coercividad magnética.

**Tabla 2.2.** Propiedades eléctricas y magnéticas de materiales sinterizados obtenidos por tecnología de polvos [22].

Aleación	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Permeabilidad magnética $\mu$	Coercividad magnética (Hc)	Resistividad ( $\mu\Omega\text{m}$ )
Fe	6.8-7.2	1800-3500	1.5-2.5	10
Fe-P	6.8-7.4	2500-6000	1.2-2.0	30
Fe-Si	6.8-7.3	2000-6000	0.8-1.2	60
50Ni- 50 Fe	7.2-7.6	5000-1500	0.2-0.5	45

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con partículas de hierro poseen diferentes propiedades dependiendo del contenido de polímero. La tabla 2.3 muestra el efecto del contenido de polímero en la permeabilidad magnética en un material compuesto reforzado con partículas de hierro esponja de materiales producidos comercialmente por la compañía Hoganas.

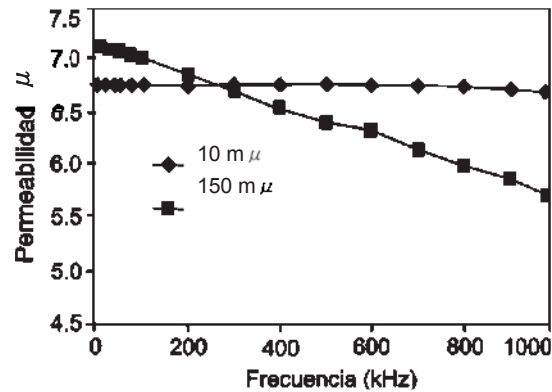
**Tabla 2.3.** Propiedades eléctricas y magnéticas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con polvos de hierro esponja [23].

Material	% en peso de polímero	Temperatura de compactación °C	Temperatura de curado °C	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Permeabilidad Magnética $\mu$	Coercividad magnética (Hc)
SC100	0.75	150-260	315	7.2	100	388
SC120	0.6	150-260	315	7.3	120	380
SC600	0.25	150-260	315	7.4	140	380

H. Taghvaei y colaboradores [24] han investigado acerca del efecto del tamaño de partícula y la presión de compactación sobre las propiedades de composites magnéticos suaves. Utilizaron polvo de hierro con tamaños de partícula de 10  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$  con pureza de 99% y el resto constituido por carbono, cobre, zinc y algunos óxidos. Dichos polvos fueron mezclados con resina epoxi Novolac y un agente catalizador endurecedor de la resina. Las concentraciones de resina utilizadas fueron de 0.7%, 1.5% y 2% en peso. Para asegurar el mojado de las partículas por la resina utilizaron acetona en la etapa de mezclado. La etapa de compactación fue llevada a cabo en dados metálicos cilíndricos por compactación uniaxial. Los valores de presión que utilizaron van de 400 MPa hasta 1200 MPa. La etapa de compactación se realizó después de la evaporación de la acetona. La etapa de curado de los composites fue llevada a cabo a 175°C en aire por 30 minutos.

H. Taghvaei indica que el valor de permeabilidad incrementa con menores concentraciones de polímero, mayores presiones de compactación. El valor óptimo de permeabilidad magnética lo obtienen con la menor concentración de polímero y mayor tamaño de partícula, es decir 0.7 % en peso de resina

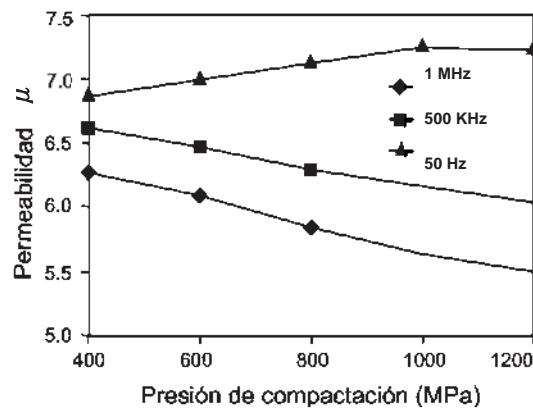
y tamaño de partícula de 150  $\mu\text{m}$ . La figura 2.3 muestra el efecto del tamaño de partícula sobre la permeabilidad magnética en los composites obtenidos por H. Taghvaei y colaboradores.



**Fig. 2.3.** Efecto del tamaño de partícula en la permeabilidad magnética [24].

H. Taghvaei y colaboradores reportan que la permeabilidad de los materiales compuestos tiende a disminuir con el incremento de frecuencia del campo aplicado, debido a las corrientes de Eddy que generan campo magnético opuesto al campo magnético aplicado. Estos mismos investigadores aseguran que la disminución del tamaño de partícula dificulta la formación de dominios magnéticos y por ello la permeabilidad magnética disminuye, debido a que la fracción volumétrica de material ferromagnético que se magnetiza es menor.

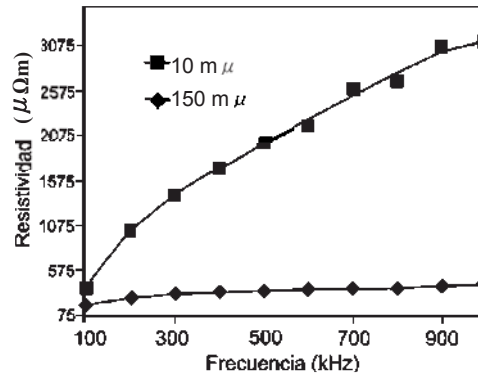
La fig. 2.4 muestra el efecto de la presión de compactación sobre la permeabilidad magnética en los composites obtenidos por H. Taghvaei y colaboradores.



**Fig. 2.4.** Efecto de la frecuencia sobre la permeabilidad magnética [24].

A la presión de 1000 MPa obtienen la máxima permeabilidad. Dado que el aumento de la presión de compactación incrementa la conductividad las corrientes de Eddy se ven favorecidas y con ello la permeabilidad del material disminuye para la presión de 1200 MPa.

La resistividad de los composites también varía en función de la frecuencia en circuitos de corriente alterna como lo indica la fig. 2.5.



**Fig. 2.5.** Efecto del tamaño de partícula en la resistividad eléctrica [24].

H. Taghvaei indica que al disminuir el tamaño de partícula contribuye a la resistividad y las corrientes de Eddy se ven disminuidas y consecuentemente las pérdidas de energía en el material, además hacen notar que la resistividad eléctrica de los materiales ferromagnéticos se incrementa debido a defectos, esfuerzos residuales, porosidad, disminución del tamaño de partícula y defectos de procesamiento.

Halit y colaboradores [25] han estudiado el efecto de la forma de partícula sobre las propiedades eléctricas y magnéticas en materiales compuestos Ni-Polímero. En su trabajo obtuvieron materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzos de diferentes formas, tales como fibras, hojuelas y polvos de níquel. El uso del níquel lo justifican debido a que es un material ferromagnético. Las fracciones volumétricas de refuerzo que utilizaron van de 20% a 67%. El aislante eléctrico utilizado fue polietileno de baja densidad. El mezclado de los componentes fue llevado a cabo a 150°C en un mezclador a 60 revoluciones por minuto. Los compuestos fueron obtenidos por compactación uniaxial de 2 MPa a 150°C.

Halit y colaboradores indican que los valores de permeabilidad magnética se ven incrementados a medida que se aumenta el contenido de material ferromagnético y la forma de las partículas de refuerzo no tienen influencia sobre la permeabilidad magnética de los composites.

La tabla 2.4 se muestran los valores de permeabilidad magnética y resistividad eléctrica en función de la forma de los refuerzos y fracciones volumétricas de estos en los materiales compuestos obtenidos por Halit y colaboradores.

**Tabla 2.4** Permeabilidad magnética y resistividad eléctrica de composites de matriz polimérica [25].

Material de refuerzo	Fracción volumétrica de refuerzo	Resistividad eléctrica ( $\Omega\text{m}$ )	Permeabilidad magnética
Ni polvo	0.2	$6 \times 10^9$	2.17
Ni polvo	0.67	< 0.05	5.8
Ni filamentos	0.2	$1.7 \times 10^5$	2.1
Ni filamentos	0.3	$3.4 \times 10^3$	2.57
Ni filamentos	0.38	< 0.05	3.45
Ni hojuelas	0.2	$1.3 \times 10^5$	2.04
Ni hojuelas	0.37	< 0.05	3.26

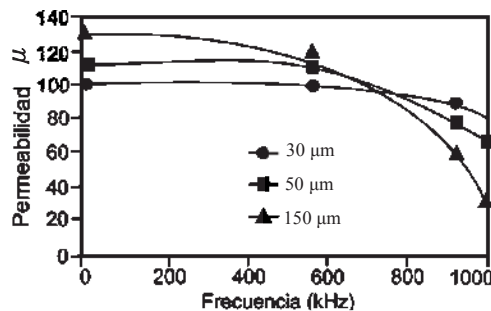
Shokrollahi y Janghorban [26] reportan el efecto de la compactación en frío, compactación en caliente, compactación biaxial y el tamaño de partícula sobre las propiedades magnéticas de compuestos hierro-polímero. Utilizaron polvo de hierro con tamaño de partícula de 150  $\mu\text{m}$  con pureza del 98% y el resto constituido por cobre, plomo, zinc y algunos óxidos, tales polvos fueron obtenidos por molienda mecánica. La cantidad de polímero tipo epoxi fue de 1.5% en peso y un agente catalizador de la resina. En la etapa de mezclado utilizaron acetona como solvente para facilitar la incorporación de los componentes metálicos a la mezcla. Después de la evaporación de la acetona procedieron a formar los compactos mediante compactación. Para observar el efecto de los parámetros de compactación sobre las propiedades eléctricas y magnéticas utilizaron compactación en frío con presiones que van de 400 MPa a 1200 MPa, compactación en caliente a 200°C y 1200 MPa y compactación biaxial a 1200 MPa. El curado de la resina en todas las muestras elaboradas fue realizado bajo una presión de 200 MPa a 180°C. En la Tabla 2.5 se observan los resultados obtenidos por dichos investigadores.

**Tabla 2.5.** Efecto de la presión de compactación en frío y en caliente sobre la densidad y propiedades magnéticas [26].

Presión de compactación (MPa)	Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	Coercividad (Hc)	Permeabilidad magnética
Uniaxial 400	7.25	3	500
Uniaxial 800	7.42	2.99	510
Uniaxial 1200	7.5	2.94	540
Biaxial 1200	7.52	2.91	545
Uniaxial P=1200 MPa, T=200 °C	7.58	2.86	570

En la tabla 2.5 puede observarse que la permeabilidad magnética se favorece con incrementos de presión de compactación mientras que la fuerza coercitiva disminuye. La compactación biaxial favorece ligeramente la permeabilidad magnética, aunque la compactación a 200 °C promueve de manera más notoria el valor de permeabilidad magnética, debido a la relajación de una fracción esfuerzos residuales.

Shokrollahi y Janghorban también experimentaron con polvos de hierro 30  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ , para observar el efecto del tamaño de partícula sobre la permeabilidad magnética, dichos polvos obtenidos por molienda mecánica fueron mezclados con 1.5% en peso de resina y compactados en frío a 1200 MPa. La figura 2.6 muestra la dependencia del valor de permeabilidad magnética inicial (permeabilidad magnética a baja frecuencia) en función del tamaño de partícula.



**Fig. 2.6.** Permeabilidad magnética de composites reforzados con polvos de hierro. Puede observarse que los valores de permeabilidad magnética se favorecen con mayores tamaños de partícula [26]

En la figura 2.6 se puede observar que el material compuesto reforzado con partículas de menor tamaño (30 $\mu\text{m}$ ) posee el valor de permeabilidad magnética inicial más bajo y que éste puede interactuar con campos magnéticos de más alta frecuencia. El material compuesto reforzado con partículas de mayor tamaño (150  $\mu\text{m}$ ) posee la permeabilidad magnética inicial más alto aun que esta decrece a mayor velocidad al incrementarse la frecuencia del campo aplicado. Los valores de permeabilidad magnética inicial que obtuvieron Shokrollahi y Janghorban van de 100 a 135.

Shokrollahi y Janghorban indican que el valor de la permeabilidad magnética depende de varios factores, tales como la densidad, esfuerzos, el tipo de matriz y la conductividad eléctrica. También reportan que la disminución de la permeabilidad por el incremento de la frecuencia se debe a las corrientes de Eddy.

Halit y colaboradores [27] han investigado acerca de las propiedades eléctricas y magnéticas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con polvos ferromagnéticos. En la obtención

de los materiales utilizaron polvos de hierro con tamaño de partícula de 44  $\mu\text{m}$  y polvos de una aleación de Ni-Fe (Permalloy de 80% Ni y 20% Fe en peso) con tamaño de partícula de 150  $\mu\text{m}$ . En su estudio utilizan varias fracciones volumétricas del material de refuerzo. Los materiales compuestos fueron obtenidos mediante compactación uniaxial, los materiales reforzados con hierro fueron obtenidos a 4 MPa y los materiales reforzados con Permalloy fueron obtenidos a 16 MPa. La compactación en ambos casos se realizó a 100°C. En la tabla 2.6 se observan los resultados obtenidos por los investigadores mencionados.

**Tabla 2.6.** Efecto de la concentración de refuerzo ferromagnético sobre la resistividad eléctrica y permeabilidad magnética [27].

Material	Fracción volumétrica de refuerzo	Resistividad ( $\Omega\text{m}$ )	Permeabilidad magnética
Polietileno	–	$> 10^{15}$	1.0
Polvo de hierro	0.1	$3 \times 10^{14}$	2.0
Polvo de hierro	0.3	$7 \times 10^{12}$	3.6
Polvo de hierro	0.5	$3 \times 10^{10}$	6.0
Polvo Permalloy	0.1	$6 \times 10^{14}$	1.9
Polvo Permalloy	0.25	$4 \times 10^{10}$	4.1
Polvo Permalloy	0.4	$6 \times 10^7$	5.2

En la tabla 2.6 se observa que el valor de la resistividad del elastómero termoplástico es considerablemente grande  $10^{15} \Omega\text{m}$ . A medida que se incrementa el contenido de los materiales ferromagnéticos la resistividad eléctrica disminuye y la permeabilidad magnética se ve incrementada.

H. Rutz y colaboradores [28] realizaron un estudio acerca de la manufactura de componentes electromagnéticos mediante procesos de metalurgia de polvos. En la tabla 2.7 se muestran las propiedades magnéticas y eléctricas de materiales sinterizados obtenidos por metalurgia de polvos.

**Tabla 2.7** Propiedades eléctricas y magnéticas de materiales sinterizados [28].

Aleación	Rango de densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Permeabilidad magnética $\mu$	Coercividad magnética (Hc)	Resistividad ( $\mu\Omega\text{m}$ )
Hierro	6.8-7.2	1800-4000	1.5-2.5	10
Hierro - Fósforo	6.7-7.4	2500-6000	1.2-2.0	30
Hierro - Silicio	6.8-7.5	4000-10000	0.3-1.0	60
50%Fe - 50%Ni en peso	7.2-7.6	5000-15000	0.2-0.5	45

L. P. Lefebvre y colaboradores [29] investigaron acerca del efecto de la resistividad eléctrica sobre las pérdidas de energía en materiales compuestos magnéticos suaves constituidos por polvos de hierro en una matriz polimérica. Utilizaron polvos de hierro de alta pureza de 140  $\mu\text{m}$ , obtenidos mediante la técnica de atomización por agua. Las formas de los materiales compuestos obtenidos mediante compactación uniaxial fueron anillos y barras, tales geometrías obtenidas a 620 MPa. Las barras les fueron útiles para las mediciones de resistividad por la técnica de cuatro puntos y los anillos para las mediciones de permeabilidad magnética. Los contenidos de resina utilizados van de 0% y 0.4% en peso. Indican que las pérdidas de energía por histéresis magnéticas no son sensitivas a la resistividad ni a la densidad, por otro lado indican que las pérdidas por histéresis se deben a la composición química, microestructura de los materiales magnéticos y que en la práctica depende de los materiales de inicio y los esfuerzos residuales contenidos en los materiales después de su fabricación. En la tabla 2.8 se muestran los valores de las propiedades eléctricas y magnéticas respecto a las variables de procesamiento y materias primas.

**Tabla 2.8** Efecto de la temperatura de compactación y tratamiento térmico sobre la resistividad de compactos de hierro y composites Fe-Polímero [29].

Material de refuerzo	Temperatura de compactación ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tratamiento térmico	Resistividad ( $\mu\Omega\text{m}$ )
Polvo de hierro 140 $\mu\text{m}$	150	1 h a 175 $^{\circ}\text{C}$ en aire	0.6
Polvo de hierro 140 $\mu\text{m}$	150	–	1.2
Polvo de hierro 140 $\mu\text{m}$	65	–	4
Polvo de hierro (140 $\mu\text{m}$ ) + 0.2% en peso de resina	65	1 h a 175 $^{\circ}\text{C}$ en aire	22
Polvo de hierro (140 $\mu\text{m}$ ) + 0.4% en peso de resina	65	1 h a 175 $^{\circ}\text{C}$ en aire	44

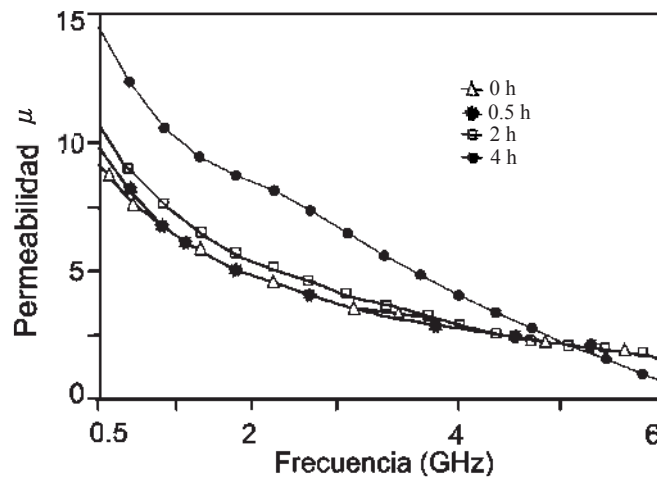
L. P. Lefebvre y colaboradores indican que no existe un notable efecto de la temperatura de compactación sobre los valores de pérdidas de energía en el rango de 22  $^{\circ}\text{C}$  a 144  $^{\circ}\text{C}$  y que las pérdidas de energía son directamente proporcionales al incremento de la frecuencia e inversamente proporcional a la resistividad eléctrica.

Sung – Soo Kim y colaboradores [30] han estudiado las propiedades magnéticas de composites de matriz polimérica a altas frecuencias (GHz). En su proceso experimental utilizan partículas de hierro con forma de hojuela, las cuales fueron encapsuladas en silicón. Las partículas fueron preparadas a partir de partículas esféricas mediante forja mecánica. El tamaño de partícula del material de inicio fue de 7  $\mu\text{m}$ . Las dimensiones aproximadas de las hojuelas que obtuvieron son de 30

$\mu\text{m}$  de diámetro y  $1 \mu\text{m}$  de espesor. El tiempo de molienda fue variado de 0.5 a 4 h. La cantidad de partículas en los compositos fue de 65% en volumen.

Sung – Soo Kim y colaboradores concluyen que los materiales obtenidos en su investigación poseen alta permeabilidad magnética a altas frecuencias y que tales resultados se deben a la reducción de las corrientes de Eddy.

La figura 2.7 muestra el comportamiento de la permeabilidad magnética en función del tiempo de molienda. El incremento de la permeabilidad se debe al incremento de tamaño de partícula por la unión de las partículas del material de inicio, por efecto de la forja mecánica.



**Fig. 2.7.** Efecto del tiempo de molienda sobre la permeabilidad magnética. Los valores de permeabilidad disminuyen con el incremento de la frecuencia [30].

J. Fuzer y colaboradores [31] midieron los valores de permeabilidad magnética de materiales magnéticos suaves elaborados a partir de aleaciones Fe-Ni y Fe-Ni-Mo, dichas aleaciones en forma de cinta fueron obtenidas por solidificación rápida y posteriormente molidas. Las partículas de las aleaciones obtenidas por la molienda poseen tamaño de partícula de 0.1  $\mu\text{m}$ , las mismas fueron compactadas en caliente a 800 MPa y 800  $^{\circ}\text{C}$ .

Los compactos cilíndricos obtenidos por compactación fueron barrenados y bobinados, para las mediciones de permeabilidad magnética. La figura 2.8 muestra los valores de permeabilidad magnética en función de la frecuencia. Los valores de permeabilidad magnética del material de la aleación Fe-Ni son mayores que el material de la aleación Fe-Ni-Mo debido a que el molibdeno no tiene propiedades ferromagnéticas.

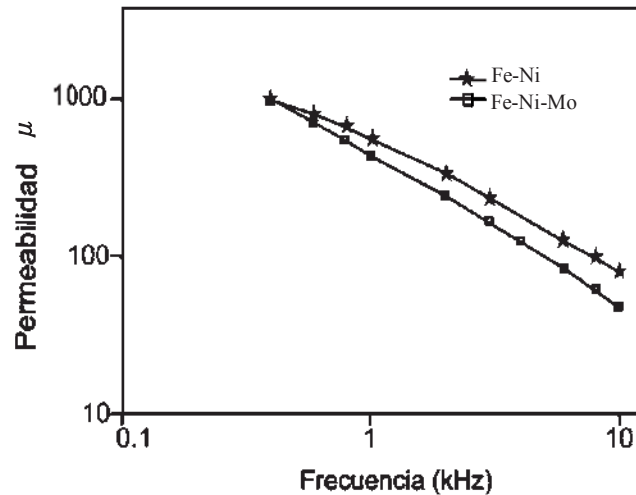


Fig. 2.8. Permeabilidad magnética de compactos de Fe-Ni y Fe-Ni-Mo [31].

## 2.5 APLICACIONES DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS SUAVES

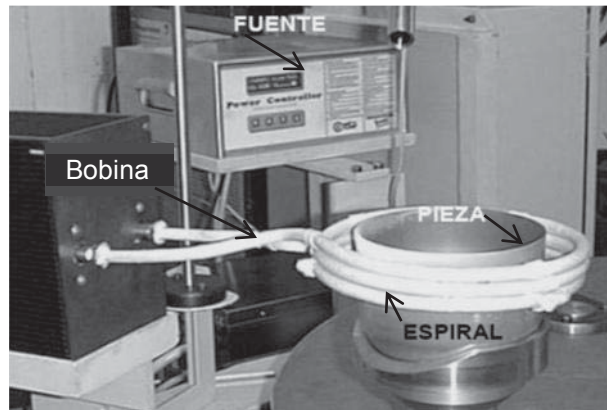
Los usos de los materiales magnéticos suaves son típicamente clasificados en aplicaciones de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA). Los parámetros importantes en aplicaciones de CA son: la permeabilidad y las pérdidas de energía que resultan de la alternancia del campo magnético. Estos materiales pueden ser utilizados en alternadores, generadores, motores eléctricos [9], en aplicaciones de concentración de energía magnética, entre otras.

El calentamiento por inducción depende de dos mecanismos de disipación de energía: las pérdidas de energía debido al calentamiento por efecto Joule y por pérdida de energía relacionada con la histéresis magnética.

Al colocar un elemento de material ferromagnético dentro de un campo magnético, se inducen corrientes eléctricas, mayormente concentradas hacia la superficie del elemento, denominadas corrientes parásitas o corrientes de Eddie. Parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido al choque que sufren los electrones con los átomos del conductor (material ferromagnético) elevando la temperatura del mismo (efecto Joule).

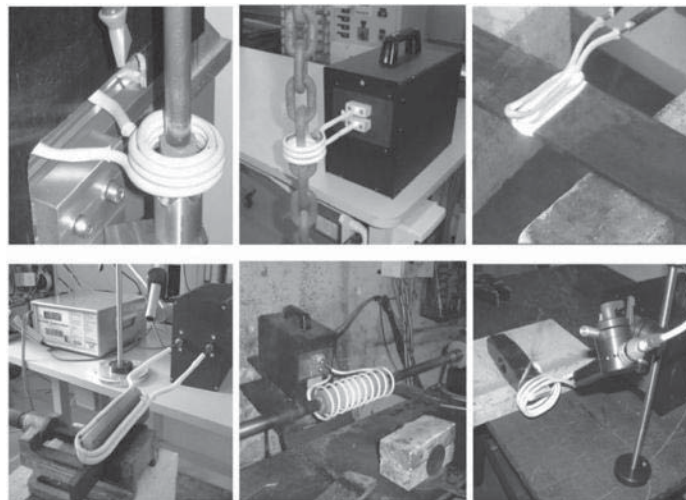
Una explicación cualitativa de las pérdidas por histéresis (segundo mecanismo de disipación de energía) establece que ésta es causada por fricción entre los átomos, o también llamadas dipolos magnéticos, cuando los metales ferromagnéticos son magnetizados primero en una dirección y después en otra. Los dipolos pueden ser considerados como pequeños magnetos, los cuales se alinean en dirección al campo magnético aplicado, la dirección del campo magnético está asociada con una corriente alterna que lo origina. La energía requerida para orientar los dipolos es disipada como calor.

Para generar calentamiento por inducción es necesario un sistema de calentamiento que consta de una fuente de energía eléctrica y bobina, como se puede observar en la figura 2.9. Existe una estrecha relación entre la frecuencia de operación de la corriente que genera el campo y la profundidad de penetración sobre la pieza o material. Como se ha indicado, la corriente inducida que fluye sobre la pieza es más intensa en la superficie, y decae rápidamente bajo la superficie. Por ello, el exterior se calentará más rápido que el interior: el 80% del calor producido en la pieza se concentra en la superficie [32].



**Fig. 2.9.** Componentes de un sistema de calentamiento por inducción [32].

La profundidad del calentamiento depende de la frecuencia de la corriente, potencia y el tiempo de aplicación de ésta. Mientras mayor es la frecuencia, menor es la profundidad calentada, de forma que: altas frecuencias (100 KHz a 1 MHz), y tiempos cortos (segundos), calientan espesores de 0,25 mm; en cambio, frecuencias menores (25 KHz), y tiempos más largos calientan espesores de 10 mm [32]. Algunas de las aplicaciones del calentamiento por inducción se muestran en la figura 2.10.



**Fig. 2.10.** Aplicación del sistema de calentamiento por inducción a materiales de diferentes geometrías [32].

El calentamiento por inducción es usado normalmente sobre materiales ferromagnéticos, es posible el calentamiento de materiales plásticos y otros no magnéticos, de manera eficiente y rápida, haciendo uso de materiales susceptibles que sean magnéticos. El material susceptible es utilizado para transferir el calor a la pieza o material a calentar por medio de la conducción y/o radiación térmica. Entre las aplicaciones más difundidas del calentamiento por inducción se encuentran las siguientes:

- Tratamientos térmicos: Recocido y temple superficial.
- Fusión.
- Forjado en caliente.
- Soldadura.

Todos los sistemas de calentamiento por inducción requieren la utilización de agua de enfriamiento, que circula en el convertidor de frecuencia y en la bobina. Algunas de las principales ventajas del calentamiento por inducción son:

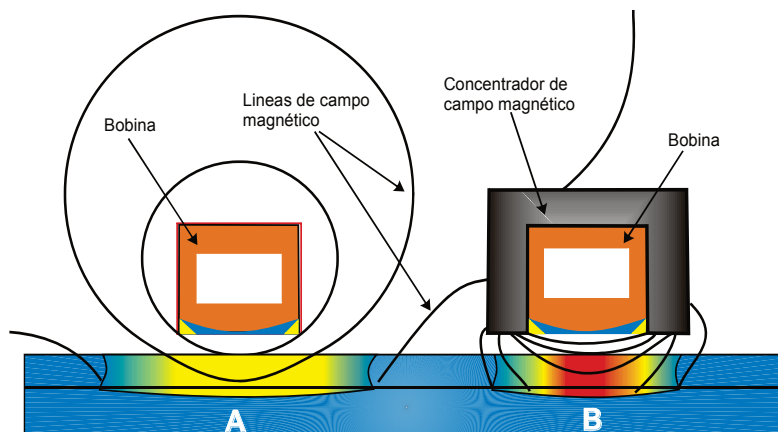
- Ausencia de contacto físico.
- Generación del calentamiento en el lugar requerido.
- Rapidez y precisión.
- Fácil automatización y control del ciclo de trabajo.

## **2.6 CONCENTRADOR DE ENERGÍA MAGNÉTICA**

Un concentrador de energía magnética es un material magnéticamente conductor que se coloca en un campo de alta frecuencia, para facilitar la trayectoria del flujo magnético. Los materiales concentradores magnéticos conducen el campo magnético más eficientemente que el aire. Los controladores de flujo magnético pueden jugar diferentes roles en sistemas de inducción, tales como:

- Mejoramiento de la eficiencia de la bobina.
- Control de la trayectoria de calentamiento debido a la posibilidad de controlar las distribuciones de campo magnético y corrientes.
- Protección de componentes de la máquina de calentamiento que pueden ser dañados por el calor.
- Mejor aprovechamiento de la energía usada en la bobina, proporcionada por la fuente de poder, y en la eficiencia del circuito.

Las ferritas y láminas de acero al silicio son los materiales tradicionales, para concentradores de flujo magnético. En años recientes, materiales magneto dieléctricos (MMD) han llegado a ser más empleados en aplicaciones de calentamiento por inducción, debido a su valiosa combinación de propiedades magnéticas, mecánicas, térmicas y químicas. Una función tradicional de los concentradores magnéticos ha sido mejorar la eficiencia de este proceso (fig. 2.11), además de producir un calentamiento selectivo en áreas específicas de la pieza.



**Fig. 2.11.** Distribución del campo magnético en una bobina: A) sin utilizar concentrador de flujo magnético y B) utilizándolo [33].

El desarrollo de concentradores a base de polvos metálicos de Fe, Ni y Co aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  de diámetro, han incrementado drásticamente la popularidad de los concentradores de energía magnética. En el tratamiento térmico por inducción, los materiales típicamente más utilizados como concentradores de flujo son de naturaleza magnética suave o blanda (imanes suaves), lo que significa que sólo se iman 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 (pérdida de energía por histéresis magnética). Una característica típica de este tipo de materiales es la de poseer una curva de histéresis alta, delgada y de área pequeña.

La selección del material para un concentrador está en función de factores tales como los que se enlistan a continuación:

- Magnetización de saturación alta.
- Permeabilidad magnética alta (Alrededor de 100 para bajas frecuencias y 30 para altas frecuencias).
- Campo coercitivo pequeño (material magnético suave)
- Resistividad eléctrica alta (1  $\text{k}\Omega\text{m}$ ).

- Resistencia al ataque químico debido a los medios adversos.

Una magnetización de saturación elevada permite que el material magnético pueda generar su autoinducción rápidamente, en tanto que una permeabilidad alta permite que se lleve a cabo el redireccionamiento del flujo magnético. Un campo coercitivo pequeño implica que se pueden reorientar los dominios con campos magnéticos inducidos pequeños y menos consumo de energía en la reorientación de los dominios magnéticos [34]. Los materiales para la manufactura de concentradores de flujo magnético son básicamente de dos tipos: láminas de acero al silicio usadas a bajas frecuencias, menores a 10 KHz y ferritas o combinaciones de hierro, para altas frecuencias desde nivel de los MHz hasta el orden de los GHz) incluyendo el intervalo de la radio frecuencia (RF), en aplicaciones de inducción.

Los materiales magneto dieléctricos (MMD) están manufacturados con partículas magnéticas y material dieléctrico que sirve como ligante y aislante eléctrico de las partículas magnéticas. Las partículas magnéticas deben ser de un material magnético suave con alta permeabilidad magnética. En la manufactura de materiales magnéticos suaves mediante la técnica de metalurgia de polvos se han empleado partículas de hierro, hierro-silicio, hierro-fósforo, hierro-níquel lográndose una adecuada relación entre la permeabilidad magnética y fuerza coercitiva. Las propiedades magnéticas de un material compuesto dependen de las propiedades de las partículas, su forma y empaquetamiento. Las características térmicas y mecánicas dependen principalmente del tipo y porcentaje del ligante. Estos materiales (MMD), presentan una combinación variable de propiedades electromagnéticas, térmicas y mecánicas en rangos de bajas permeabilidades magnéticas (6-25) con altas resistividades eléctricas (1-5 M $\Omega$ -cm), altas permeabilidades magnéticas (120-200) con bajas resistividades eléctricas (1-50 K $\Omega$ -cm.) como para satisfacer demandas particulares [34].

En aplicaciones de tratamientos térmicos superficiales se han utilizado los concentradores de flujo magnético. Recientemente, M. Equihua [35] estudió las propiedades magnéticas y eléctricas de una aleación Fe-Si obtenida mediante metalurgia de polvos para el diseño de un concentrador de energía magnética con el fin de aplicarlo en el tratamiento térmico de temple superficial. En la obtención de la aleación utilizó polvos de hierro de 97% de pureza con tamaño de partícula de 110  $\mu$ m y polvos de silicio de 99.3% de pureza con tamaño de partícula de 160  $\mu$ m. La concentración de silicio fue variada en 1%, 3% y 5% en peso de silicio. La presión de compactación utilizada fue de 140 MPa. Los compactos obtenidos fueron sinterizados a una temperatura de 1180 °C. La tabla 2.9 muestra los valores de las propiedades eléctricas, magnéticas y mecánicas de los materiales Fe-Si del estudio mencionado.

**Tabla 2.9.** Propiedades eléctricas, magnéticas y mecánicas de materiales sinterizados Fe-Si obtenidos por tecnología de polvos [35].

Material	Permeabilidad magnética $\mu$	Campo coercitivo (Hc)	Resistividad ( $\Omega$ m)	Dureza Vickers
Fe-1%Si en peso	21.32	67.3	620	170
Fe-3%Si en peso	23.06	61.9	650	166
Fe-5%Si en peso	25.72	59.6	660	187

Equihua indica que material Fe-5%Si posee las mejores propiedades para la concentración de flujo magnético en base al incremento de la profundidad de temple en piezas de acero y la reducción de tiempo de calentamiento. Los valores obtenidos se pueden considerar constantes para las tres composiciones. De acuerdo a la tabla 2.9 la resistividad eléctrica aumenta al igual que la permeabilidad magnética con mayor concentración de silicio, lo anterior resulta contradictorio dado que la permeabilidad magnética se comporta de manera inversa a la resistividad eléctrica según lo reportado por otros investigadores [21, 23,25 y 27].

J. C. Villaseñor [34] realizó un estudio acerca de las propiedades eléctricas y magnéticas de materiales compuestos de matriz polimérica para aplicaciones de concentración de flujo magnético, en el cual obtiene materiales compuestos a partir de polvos de hierro y níquel con tamaño de partícula de  $10 \mu$  m y resina epóxica. Utilizó 3% en peso de polímero y el resto de polvos metálicos. La relación de hierro y níquel las mantuvo constantes en 50%-50%, respectivamente. Obtuvo de pastillas cilíndricas de 20 mm de diámetro mediante un dado metálico. Los materiales compuestos fueron obtenidos a seis presiones de compactación uniaxial que van de 156 kPa hasta 936 kPa. La tabla 2.10 muestra que los valores de resistividad son muy bajos debido principalmente al bajo contenido de polímero y no los hace aptos para aplicaciones de concentración de energía magnética.

**Tabla 2.10** Efecto de la presión de compactación en materiales compuestos (Fe-Ni)- Polímero [34].

Material compuesto	Presión (kPa)	Permeabilidad magnética $\mu$	Resistividad ( $\Omega$ m)
[50%Fe-50%Ni] - Polímero	156	317	0.961
[50%Fe-50%Ni] - Polímero	312	586	0.296
[50%Fe-50%Ni] - Polímero	468	385	0.15
[50%Fe-50%Ni] - Polímero	624	382	48
[50%Fe-50%Ni] - Polímero	780	380	0.169
[50%Fe-50%Ni] - Polímero	936	449	1.22

# CAPÍTULO III

## EXPERIMENTACIÓN

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Se utilizaron polvos de hierro de 99.9% de pureza con dos tipos de granulometría, a los cuales se les determinó el tamaño de partícula por la técnica de dispersión láser, en un equipo Beckman Coulter, el cual provee información acerca de la distribución de tamaños de partícula. Posteriormente se analizaron por difracción de rayos X, para determinar su estructura cristalina. El tipo de forma de las partículas de los polvos fue observada en microscopio electrónico de barrido.

El polímero tipo epoxi se analizó por termogravimetría (TGA) y por análisis térmico diferencial (DTA), para determinar la curva de pérdida de peso respecto a la temperatura.

La densidad del polímero se determinó a partir de un cilindro rectificado de polímero, mediante la determinación de su peso en una balanza de precisión con capacidad máxima 200 g. con precisión 0.01 mg.) y la medición de las dimensiones del cilindro mediante un micrómetro de precisión con precisión de +/- 0.001”.

### 3.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DE COMPOSITOS

Se elaboraron materiales compuestos Fe - polímero con forma de anillo y prisma rectangular utilizando polvos de Fe con tamaño de partícula de  $\sim 7\mu\text{m}$  y  $\sim 109\mu\text{m}$ , dos concentraciones de polímero epoxi (6% y 8% en peso) y seis presiones de compactación uniaxial que van de 156 kPa hasta 936 kPa, mediante tecnología de polvos.

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de flujo que describe de manera general las etapas de la experimentación llevada a cabo.

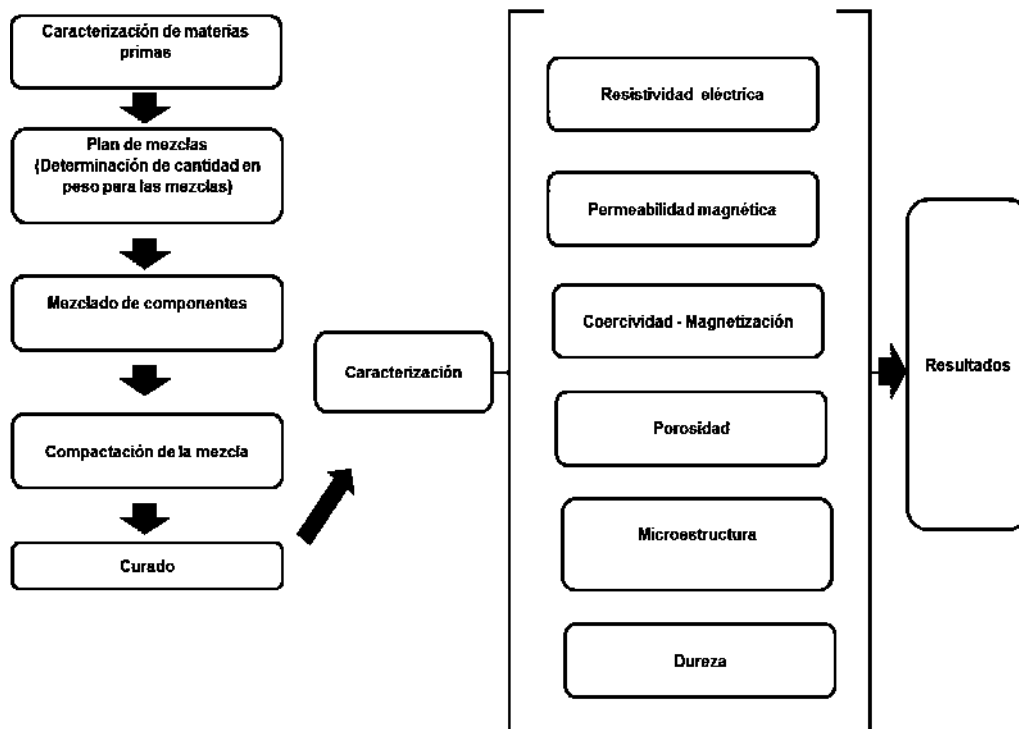


Fig. 3.1 Diagrama de flujo del desarrollo experimental.

En la fabricación de materiales compuestos se manejaron dos tipos de polvos, dos concentraciones de polímero, seis presiones de compactación, dos formas geométricas y dos probetas por condición; estas últimas para corroborar los datos obtenidos. En total se obtuvieron 96 piezas.

### 3.2.1 PLAN DE MEZCLAS

El plan de mezclas se realizó con la finalidad de que cada probeta pesara 4 g. En la tabla 2.1 se puede observar que las cantidades de resina y catalizador (endurecedor) suman los correspondientes 6% y 8% del peso de polímero; el resto 92% y 94% corresponden al polvo metálico.

El polímero epoxi es constituido por el 65% en peso una resina líquida del tipo Araldita EPN 1139 y 35% en peso de endurecedor amino alifático HY837. La temperatura teórica de distorsión de este polímero es de 238°C [36].

Tabla 3.1. Plan de mezcla para obtención de materiales compuestos Fe – Polímero.

Peso resina (g)	Peso endurecedor (g)	% Fe	Peso Fe (g)	Peso total de la mezcla (g)
0.156	0.084	94	3.76	4
0.208	0.112	92	3.68	4

### 3.2.2 MEZCLA DE COMPONENTES

Para llevar a cabo la mezcla de polvos de hierro y polímero, se usó un vibrador ultrasónico Horiba (ver fig.3.2) a una frecuencia de 20 KHz.



**Fig. 3.2** Procesador ultrasónico.

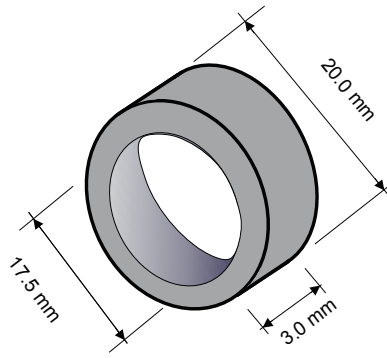
La mezcla de componentes se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. En un vaso de precipitados se agregan cantidades de resina y endurecedor, es agregado 1.5 mL de acetona.
2. Los componentes anteriores se diluye con el vibrador ultrasónico durante un minuto.
3. Se agregan los polvos metálicos y se adicionan 0.5 mL de acetona.
4. Se mezcla nuevamente con vibrador ultrasónico durante un minuto.

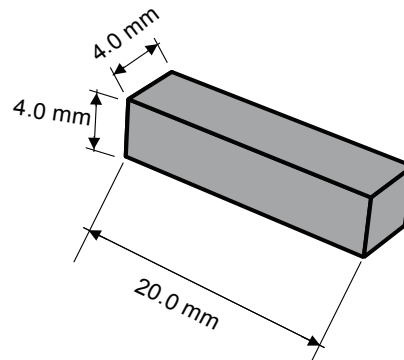
La acetona se agrega para disminuir la tensión superficial de la resina y el catalizador, y con esto asegurar el mojado de las partículas metálicas. Después de los pasos anteriores, la mezcla se deja reposar durante una hora, para permitir la evaporación de la acetona y proceder posteriormente con la etapa de compactación. El tiempo de evaporación de la acetona se determino mediante la balanza de precisión, midiendo la pérdida en peso.

### 3.2.3 ETAPA DE COMPACTACIÓN

Para llevar a cabo la compactación de las mezclas hierro-polímero, previamente se realizó el diseño de los dados de compactación de polvos, para la obtención de piezas con la geometría mostrada en las fig. 3.3 y 3.4.

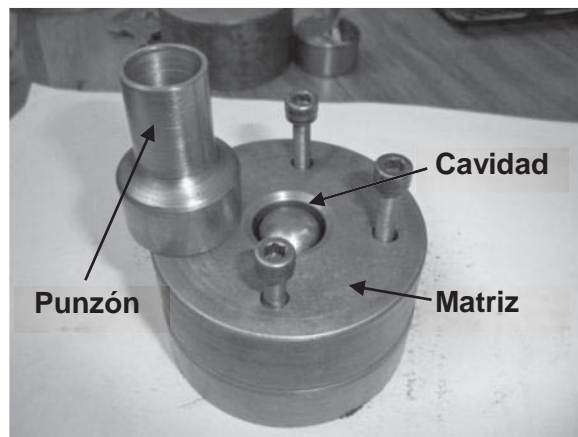


**Fig. 3.3** Anillo para elaboración de bobina, forma requerida para ensayos de permeabilidad magnética.

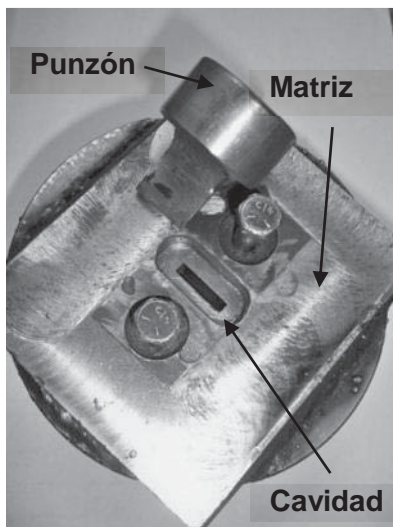


**Fig. 3.4** Prisma rectangular, forma requerida para ensayos de magnetometría (curvas de histéresis magnética) y propiedades eléctricas.

Para la compactación de los materiales se utilizaron dados metálicos, los cuales se muestran en las figuras 3.5 y 3.6, para obtención de anillos y paralelepípedos respectivamente.



**Fig. 3.5** Dado para la obtención de anillos de material compuesto.



**Fig. 3.6.** Dado para la obtención de anillos de material compuesto.

Los dados fabricados están constituidos por dos partes, la matriz y el punzón. La matriz contiene material y el punzón se desplaza en la cavidad de la matriz para ejercer la presión sobre el material. El medio para la aplicación de presión fue una prensa uniaxial Carver que se muestra en la fig. 3.7. La exactitud de los manómetros de la prensa hidráulica es del 98% aproximadamente.



**Fig. 3.7** Prensa de compactación uniaxial marca Carver.

En las tablas 3.2 y 3.3 se indican las presiones aplicadas a las mezclas Fe-Polímero, puede observarse que las cargas aplicadas para la obtención de anillos son mayores respecto a las cargas aplicadas para la obtención de prismas, esto es debido a la diferencia de áreas de compactación que presentan los dados.

**Tabla3.2.** Presiones de compactación aplicadas para la obtención de anillos.

P	Área de dado (cm <sup>2</sup> )	Presión (kPa)	Carga a aplicar (Ton)
P1	1.003	156	1.6
P2	1.003	312	3.2
P3	1.003	468	4.8
P4	1.003	624	6.4
P5	1.003	780	8
P6	1.003	936	9.6

**Tabla3.3.** Presiones de compactación aplicadas para la obtención de prismas rectangulares.

P	Área de dado (cm <sup>2</sup> )	Presión (kPa)	Carga a aplicar (Ton)
P1	0.8	156	1.6
P2	0.8	312	2.5
P3	0.8	468	3.8
P4	0.8	624	5.1
P5	0.8	780	6.3
P6	0.8	936	7.6

El procedimiento de compactación, se indica a continuación:

1. Limpiar las superficies del dado a usar, siendo más estrictos en la superficie interior.
2. Impregnar de vaselina el punzón, para disminuir la fricción con las paredes de la matriz del dado. Se debe de evitar el contacto del lubricante con el material a compactar.
3. El material previamente mezclado es depositado dentro de la cavidad del dado verificando que la mezcla queden bien distribuida.
4. Colocar el punzón en la cavidad de la matriz y asegurarse de que adopte una posición vertical, para evitar posibles daños al dado.
5. Aplicar la carga mediante la prensa hidráulica.
6. Dejar el material sometido a la presión requerida durante 5 minutos y expulsar el compacto.

En la etapa de compactación se obtuvieron las curvas de compresibilidad para cada mezcla mediante la ecuación 3.1

$$C_T = V_L / V_C \quad (3.1)$$

Donde,  $V_L$  es el volumen de los polvos sin compactar,  $V_C$  es el volumen del polvo compactado.

### 3.2.4 CURADO

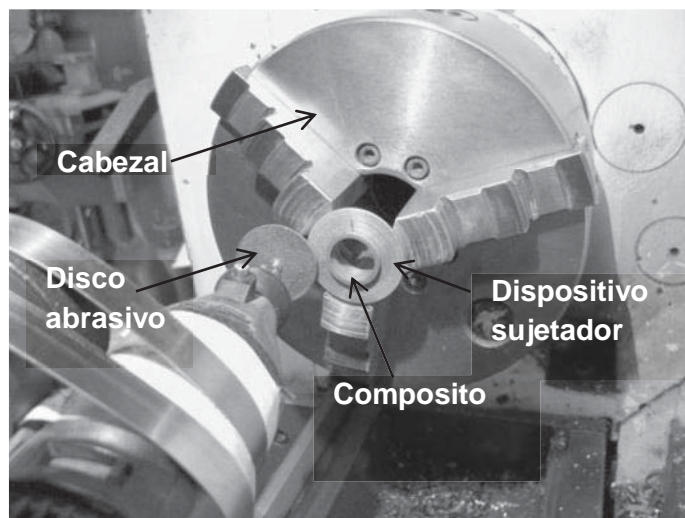
La etapa consiste en dejar reposar el material compuesto recién compactado a temperatura ambiente por nueve horas dentro de un desecador (ver fig.3.8). La finalidad del curado es dar tiempo suficiente a que se lleve a cabo la reacción de polimerización [37] y así el material compuesto logre alcanzar sus propiedades finales.



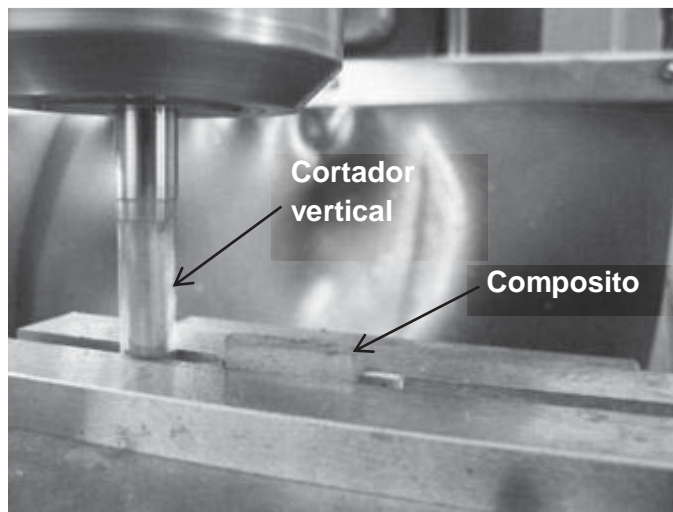
**Fig. 3.8.** Desecador de vidrio.

### 3.2.5 AJUSTE DE DIMENSIONES

Se calibro la sección transversal de los anillos en un torno horizontal mediante corte con disco abrasivo para obtener el largo requerido de las piezas. La sección longitudinal de los prismas fue maquinada con una fresadora universal mediante un cortador vertical, para calibrar la sección cuadrada. Como se muestra en las figuras 3.9 y 3.10, respectivamente.



**Fig. 3.9.** Maquinado del largo de un anillo de material compuesto.



**Fig. 3.10.** Maquinado de sección cuadrada del prisma rectangular de material compuesto.

La velocidad de corte en el torno fue de 0.08 mm/s, la velocidad del cabezal del torno fue de 75 revoluciones por minuto y la velocidad del disco abrasivo fue de 1000 revoluciones por minuto. En relación los maquinados en fresadora la velocidad de corte fue de 0.08 mm/s, la velocidad del cortador vertical de fresadora fue de 75 revoluciones por minuto y la profundidad de corte fue de 0.2 mm. Se determinaron los anteriores parámetros con la finalidad de no elevar la temperatura de las muestras. Para el maquinado de las piezas se diseñaron dispositivos de sujeción, de tal forma que la presión de sujeción fuese mínima y distribuida.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPOSITOS

La caracterización de los materiales compuestos permite relacionar las variables de fabricación en la obtención de estos (composición química, presión de compactación, tamaño de partícula, etc.) con la microestructura, propiedades magnéticas, eléctricas y mecánicas.

#### 3.3.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Se obtuvieron fotografías, mediante un microscopio electrónico de barrido (fig. 3.11), para observar la distribución de las fases, porosidad de los materiales compuestos y para observar el recubrimiento polimérico en las partículas metálicas antes de ser compactadas.



**Fig. 3.11.** Microscopio electrónico de barrido.

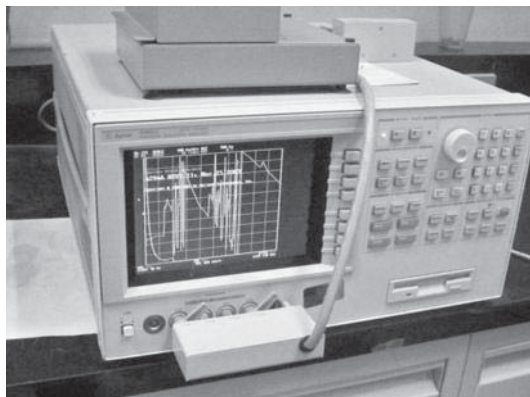
Procedimiento para la preparación de muestras para su análisis en microscopio electrónico de barrido.

1. Lijado secuencial de la superficie con lijas numero 600, 1500 y 2000, respectivamente.
2. Enjuague en limpiador ultrasónico.
3. Baño de alcohol.
4. Secado con aire a presión.
5. Pulido con pasta de diamante de  $1\mu\text{m}$ .
6. Enjuague en limpiador ultrasónico.
7. Baño con alcohol.
8. Secado con aire a presión.

### 3.3.2 PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

Para analizar las muestras respecto a permeabilidad magnética, se utilizó un analizador impedancias de precisión (fig. 3.12) con capacidad de 40 Hz a 110 MHz.

Las mediciones de esta propiedad se realizaron en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México, (IIM-UNAM).



**Fig. 3.12.** Analizador de impedancia.

Los materiales compuestos para el análisis de permeabilidad magnética cumplieron con los siguientes requerimientos:

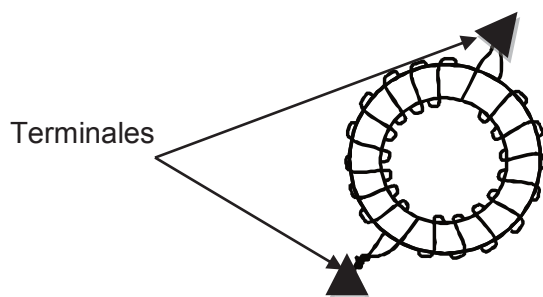
- Deben de poseer la forma de anillo y tener las dimensiones planteadas en el diseño, dimensiones ya descritas con anterioridad.
- Elaborar un bobinado formado por 24 devanados con alambre de cobre de (0.3 mm de diámetro y 150 mm de largo) con núcleo de material compuesto como se muestra en la figura 3.13.



**Fig. 3.13.** Bobina con núcleo material compuesto.

- Se procede a colocar las terminales (representadas por triángulos en fig. 3.14) del toroide en los bornes (ver fig. 3.15) del analizador. Se debe tener la certeza de que las terminales y los bornes tengan contacto, con la finalidad de que el circuito eléctrico quede cerrado.

En caso de que el alambre tenga recubrimiento, este debe ser retirado de las terminales que van a tener contacto con los bornes del equipo.



**Fig. 3.14.** Anillo embobinado, los triángulos representan las terminales a conectar en el analizador de impedancia



**Fig. 3.15.** Anillo embobinado conectado a los bornes de conexión del analizador de impedancia.

### 3.3.3 CURVAS DE HISTÉRESIS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los datos para graficar las curvas de histéresis se obtuvieron por magnetometría, mediante un magnetómetro de muestra vibrante.

El magnetómetro consiste en un electroimán, fuente de potencia, interface y computadora (ver fig. 3.16). La muestra a analizar se coloca en el espacio de trabajo del electroimán. La obtención de las curvas de histéresis por este método se basa en la distorsión del campo magnético aplicado, proporcionando curvas de magnetización respecto al campo magnético aplicado. Estas mediciones se realizaron en el Instituto de investigaciones en materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México, (IIM-UNAM).



**Fig. 3.16** Magnetómetro.

### 3.4 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad eléctrica se calculó a partir de la resistencia eléctrica en corriente directa, utilizando la ecuación de resistencia eléctrica y resistividad eléctrica [38] como lo indican las ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

Donde I es la intensidad de corriente y V es la diferencia de potencial.

La resistividad esta dada por la ecuación 3.2.

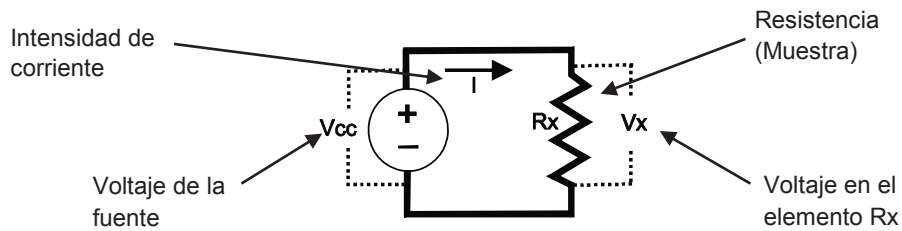
$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (3.3)$$

Donde R es la resistencia eléctrica, A es el área de la sección transversal y L es la longitud del conductor.

La medición de resistencia eléctrica consistió en hacer circular por el material compuesto una corriente eléctrica (ver fig.3.17) de intensidad conocida (I) y un voltaje conocido (Vcc).

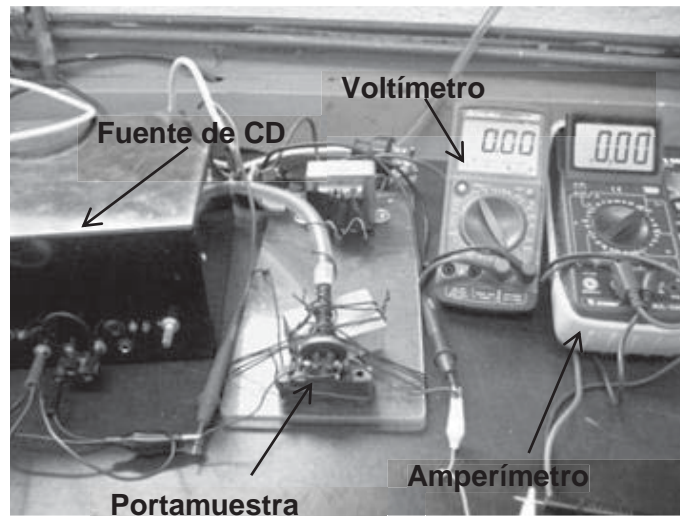
En el presente trabajo los voltajes manejados fueron menores a un Volt y la intensidad de corriente en el orden de microamperios. Al circular la corriente a través del elemento de material

compuesto, se genera una caída de voltaje ( $V_x$ ), el cual sirve para aplicar la formula 3.2 (ley de ohm) y posteriormente aplicar la ecuación de resistividad eléctrica 3.3



**Fig. 3.17** Circuito eléctrico para determinación de resistencia eléctrica.

La figura 3.18 muestra los equipos utilizados para la obtención de los valores de resistencia eléctrica.



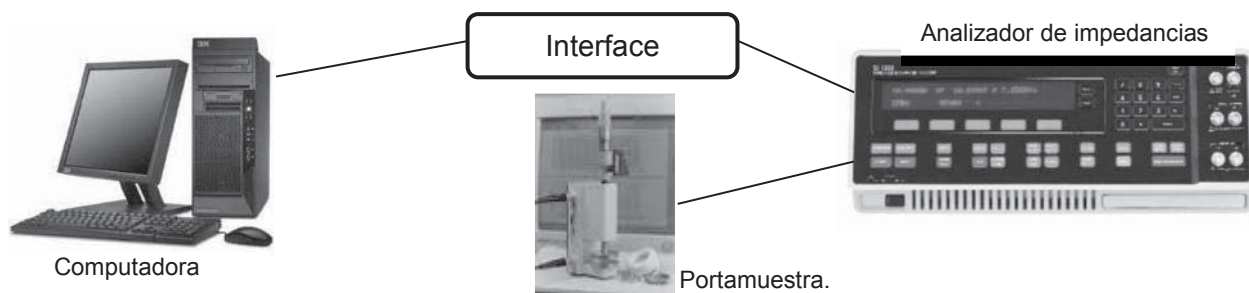
**Fig. 3.18** Circuito eléctrico para determinación de resistencia eléctrica en corriente directa.

En el ensayo se utilizó pintura conductora de carbón en las conexiones a la muestra, para evitar el efecto de resistencia de contacto.

### 3.5 CAPACITANCIA ELECTRICIA

Se midió la capacitancia en un circuito de corriente alterna a diferentes frecuencias que van de  $10\mu\text{Hz}$  hasta 30 MHz y el voltaje aplicado fue de un volt; mediante un analizador de impedancias Solartron 1260 equipado con portamuestra, interface y computadora (fig. 3.19). Para evitar el efecto de la resistencia de contacto se aplicó pintura conductora de carbón a las zonas de contacto de los anillos de material con el porta muestra. Este análisis se realizó para saber si el material tenía un

comportamiento equivalente a una resistencia eléctrica, capacitor eléctrico o una inductancia, es decir el mecanismo de conducción de carga.



**Fig. 3.19.** Configuración general de equipos para ensayo de impedancias. Además de los valores de impedancias de las muestras, esta prueba proporciona los valores de capacitancia, entre otros.

Estos ensayos de las propiedades eléctricas fueron realizados en el Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### 3.6 MICRODUREZA

Se realizaron 3 mediciones de dureza por cada muestra con forma de prisma rectangular. La zona de prueba (fig. 3.20) corresponde a una de las secciones más grandes del prisma, la cual se formo en contacto con la superficie de la matriz durante la compactación. En dicha zona se realizaron tres mediciones de dureza que corresponden al centro y extremos de la superficie.



**Fig. 3.20.** Distribución de puntos de prueba en ensayo de dureza.

El equipo utilizado fue un durómetro y la carga aplicada fue de cinco kilogramos.

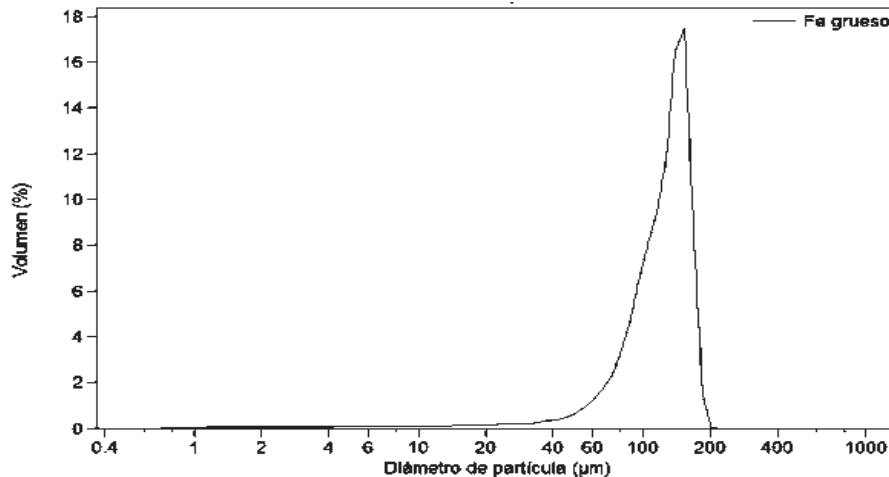
# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como parte de los resultados obtenidos, este capítulo comienza con la caracterización de las materias primas utilizadas en la obtención de los materiales compuestos, tales como son los polvos de hierro y la resina epoxi. Finalmente se presentan los resultados de las mediciones de las propiedades eléctricas y magnéticas en relación a la microestructura.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

La distribución de tamaños de partícula depende del proceso de obtención de polvos y el control de las variables de proceso. En la figura 4.1 se muestra la distribución de tamaño de partícula para el polvo metálico con mayor tamaño de partícula. Puede identificarse el rango de tamaños que van desde 4  $\mu\text{m}$  hasta 200  $\mu\text{m}$ . En la tabla 4.1 se indican algunos parámetros estadísticos relacionados a dicha distribución.



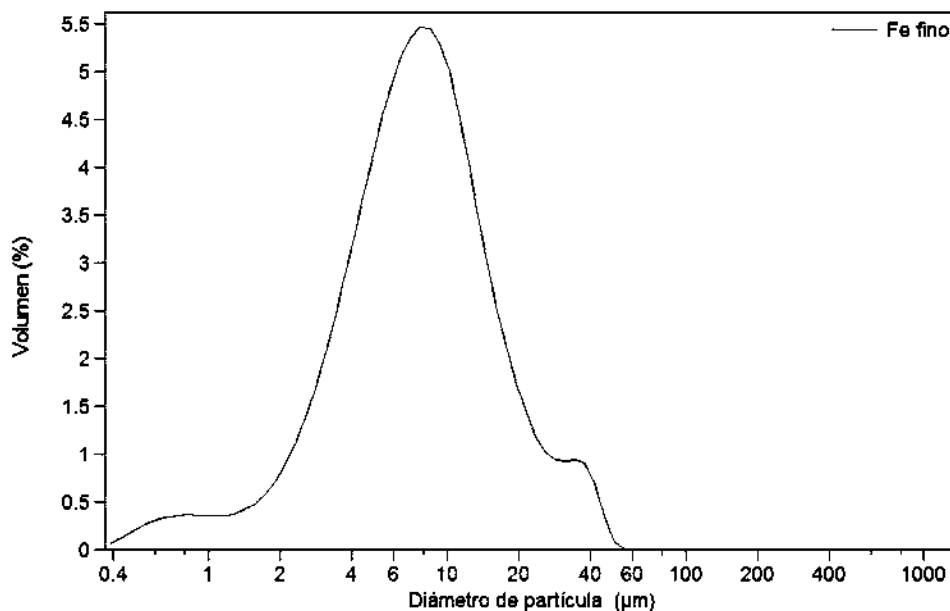
**Fig. 4.1.** Distribución diferencial de tamaño de partícula de polvo grueso de hierro.

**Tabla 4.1.** Estadística de tamaño de partícula referente a polvo de mayor tamaño.

Parámetro	Valor
Promedio	109 $\mu\text{m}$
Media	128.2 $\mu\text{m}$
Moda	153.8 $\mu\text{m}$
Desviación estándar	1.841
Varianza	3.39

La distribución de tamaño de partícula para polvo de hierro de menor tamaño se puede observar en la figura 4.2. Puede identificarse el rango de tamaños que van desde 0.4  $\mu\text{m}$  hasta 60  $\mu\text{m}$ , tal distribución es mas ancha comparada con los polvos de mayor tamaño de la figura 4.1

En la tabla 4.2 se indican algunos parámetros estadísticos relacionados a dicha distribución.



**Fig. 4.2.** Distribución diferencial de tamaño de partícula de polvo fino de hierro.

**Tabla 4.2.** Estadística de tamaño de partícula referente a polvo fino.

Parámetro	Valor
Promedio	7 $\mu\text{m}$
Media	7.549 $\mu\text{m}$
Moda	7.775 $\mu\text{m}$
Desviación estándar	2.251
Varianza	5.068

Por cuestiones prácticas, en adelante se les referirá a los polvos de hierro por su tamaño de partícula promedio.

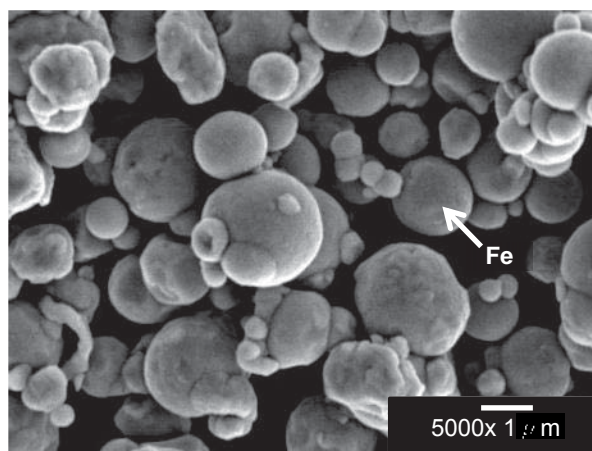
En la tabla 4.3 se muestran los valores de área superficial específica de los polvos metálicos, tales valores obtenidos por la técnica de adsorción de gas.

**Tabla 4.3.** Área superficial específica.

Polvo Fe	Área superficial específica m <sup>2</sup> /g
109µm	0.03
7µm	0.23

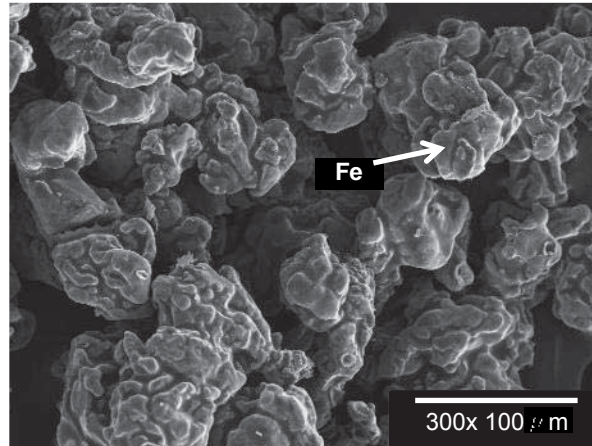
La tabla 4.3 indica que las partículas de menor tamaño exhiben mayor área superficial específica en comparación a las partículas de mayor tamaño, de acuerdo a Mikell [39] el tamaño menor de polvo produce una mayor aglomeración de las partículas, debido a cargas estáticas.

La figura 4.3 muestra una fotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido, se puede observar que en general las partículas de 7 µm son esféricas.

**Fig. 4.3.** Polvo de hierro con tamaño de 7 µm en promedio.

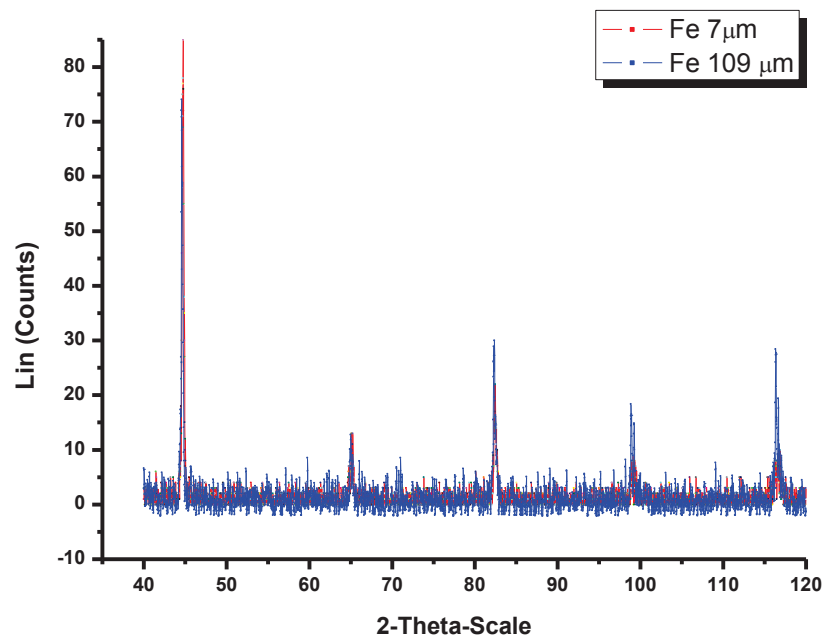
De acuerdo con Randall M. German [40] la morfología de las partículas es influenciada por el método de obtención de polvos y de acuerdo a este investigador estas partículas fueron obtenidas por la técnica de aspersión por gas. También, se puede observar que algunas de estas se encuentran unidas, esto es debido al choque entre estas antes de solidificar completamente.

Las partículas obtenidas por atomización son esféricas y poseen una amplia distribución de tamaños. En dicho proceso se puede controlar la geometría del producto mediante el control de temperatura del metal. En la figura 4.4 se muestran partículas irregulares de hierro que de acuerdo a Randall son producidas por la técnica de aspersión por agua.



**Fig. 4.4.** Polvo de hierro con tamaño de 109  $\mu\text{m}$ .

La estructura cristalina de los polvos metálicos fue analizada por la técnica de difracción de rayos X. En la figura 4.5 se muestra el difractograma de rayos X, para los polvos de 7  $\mu\text{m}$  (rojo) y 109  $\mu\text{m}$  (azul); en ambos casos la estructura cristalina corresponde a la estructura cristalina cúbica de cuerpo centrado. Además no se encuentran picos que tengan relación a la presencia de otros elementos.



1 - File: 1.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 120.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 0.6 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1291406720 s - 2-Theta: 5.000 ° -  
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import  
 01-087-0722 (A) - Iron - Fe - Y: 95.91 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 2.86080 - b 2.86080 - c 2.86080 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Body-centered - Im

**Fig. 4.5.** Difractograma de rayos X. polvos de Fe 109  $\mu\text{m}$  (azul) y polvos de Fe 7  $\mu\text{m}$  (rojo).

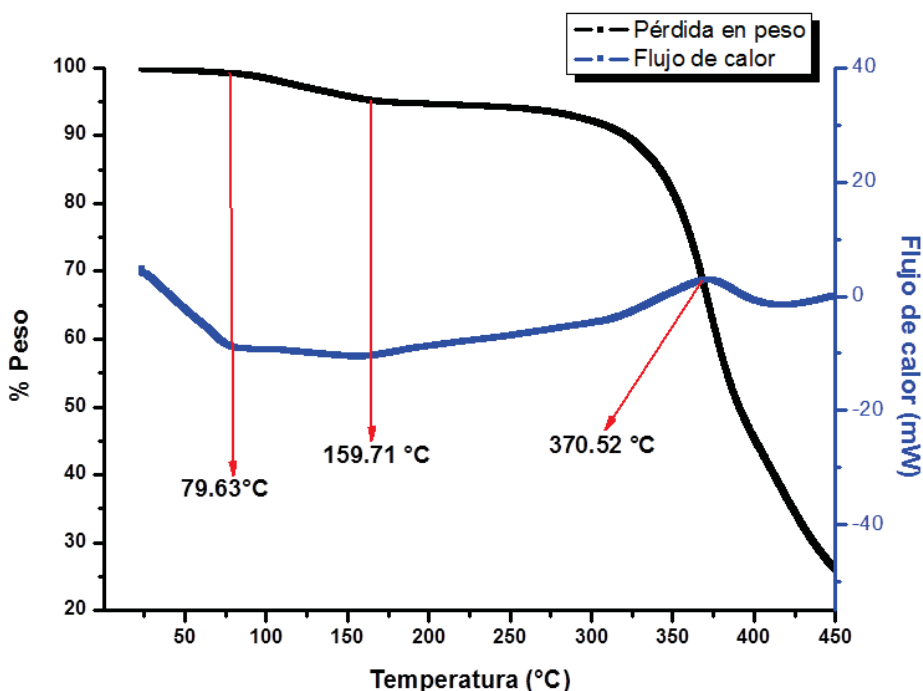
En la tabla 4.4 se puede observar que los picos indexados corresponden a la estructura alfa cúbica de cuerpo centrado.

**Tabla 4.4.** Parámetro de red de las estructuras cristalinas del hierro [41].

Propiedad	Fe Alfa BCC	Fe Beta FCC	Fe Gama BCC
Parámetro de red (Å)	0.2867	0.3647	0.2932

Respecto a la caracterización de la resina epoxi, se le realizó los análisis termogravimétrico (TGA) y térmico diferencial (DTA), en la figura 4.6 se observa que a la temperatura de 79.63° comienza la degradación del polímero, esto reflejado por una ligera pérdida en peso (0.5%). A la temperatura de 159.71°C se observa que la velocidad de degradación comienza a incrementarse y a la temperatura de 370.52°C se da la máxima velocidad de descomposición del polímero y la máxima velocidad de desprendimiento de calor por la muestra. La temperatura de 370.52 °C es muy próxima a la temperatura de 420 °C reportada por Zhen [42] para varios tipos de resinas epoxi. Una de las desventajas de las resinas epoxi es que son termoestables y se degradan con el incremento de la temperatura, en comparación a los polímeros termoplásticos que se comportan de manera plástica [43].

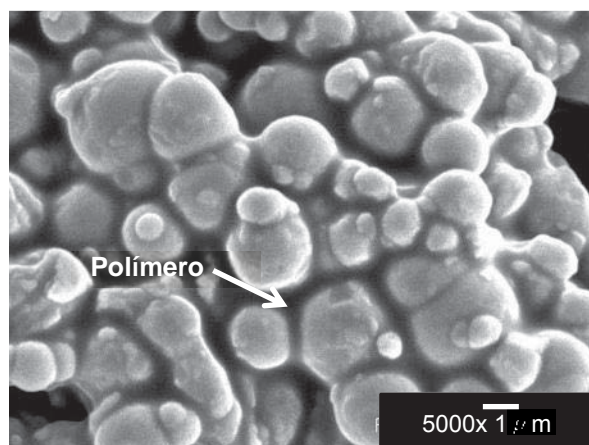
Debido a que el material compuesto Fe-polímero no requiere temperaturas en servicio mayores a 80°C, este puede resistir al calor transferido por conducción proveniente de la bobina inducción, ya que estas últimas son refrigeradas por agua [32].



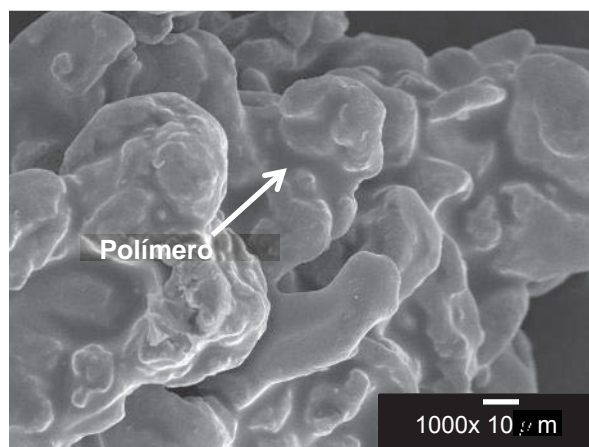
**Fig. 4.6.** Análisis DTA – TGA del polímero.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

En las figuras 4.7 y 4.8 se observan las partículas de hierro de 7  $\mu\text{m}$  y 109  $\mu\text{m}$ , respectivamente; están perfectamente cubiertas por la resina. Tales fotografías se obtuvieron con la finalidad de corroborar el mojado de las partículas por la resina, y se puede observar que en ambos casos, las resinas fueron cubiertas perfectamente por el polímero.



**Fig. 4.7.** Partículas de hierro con tamaño de 7  $\mu\text{m}$  encapsuladas en resina, antes de ser compactadas. Se puede observar la formación de aglomerados.

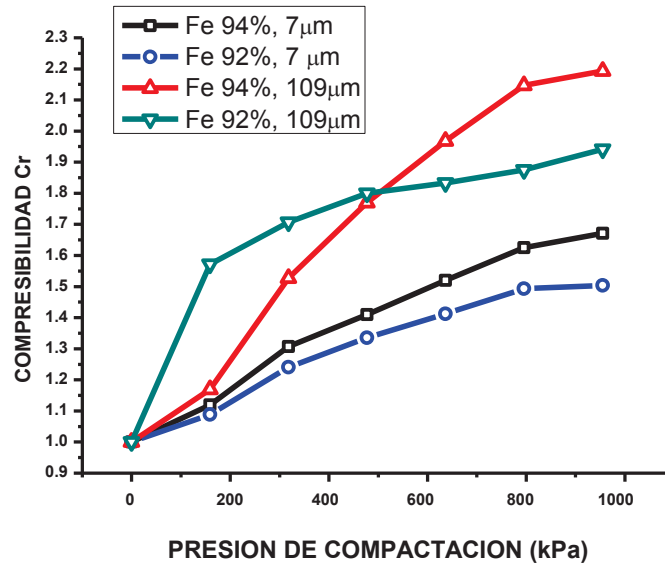


**Fig. 4.8.** Partículas de hierro con tamaño de 109  $\mu\text{m}$  encapsuladas por resina, antes de ser compactadas.

En la figura 4.9 se muestran las curvas de compresibilidad de los materiales compuestos fabricados. Se observa que los materiales compuestos Fe-Polímero reducen su volumen al incrementar la presión de compactación, por consecuencia el índice de compresibilidad ( $C_r$ ) aumenta. También, se puede notar el efecto del tamaño de partícula sobre  $C_r$ . La concentración de polímero tiene efecto sobre la compresibilidad, debido a que interactúa como un lubricante, disminuyendo la fricción entre las

partículas y la fricción de las partículas con las paredes el dado metálico y además las partículas esféricas poseen mayor habilidad para compactarse respecto a partículas irregulares.

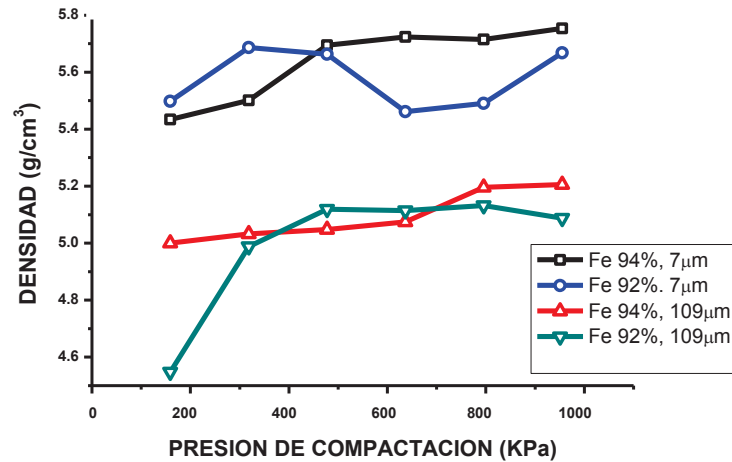
De acuerdo las curvas mostradas en la figura 4.9 el material 92% Fe con partículas con tamaño de  $7 \mu\text{m}$  (azul) posee mayor habilidad para compactarse. También puede apreciarse que la curva verde que corresponde a 92% Fe con partículas de  $109 \mu\text{m}$  queda por encima del material de 94% Fe con partículas de tamaño de  $109 \mu\text{m}$  hasta la presión de 468 kPa, dado que debería estar por debajo, esto se debe a la irregularidad en el acomodamiento inicial de las partículas al inicio de la compactación. El comportamiento de Cr respecto a la presión de compactación es correcto para presiones superiores 468 KPa. La tendencia de los valores de Cr para los materiales con tamaño de partícula de  $7 \mu\text{m}$  (curvas negra y azul) es muy clara.



**Fig. 4.9.** Curvas de compresibilidad de materiales compuestos Fe – Polímero.

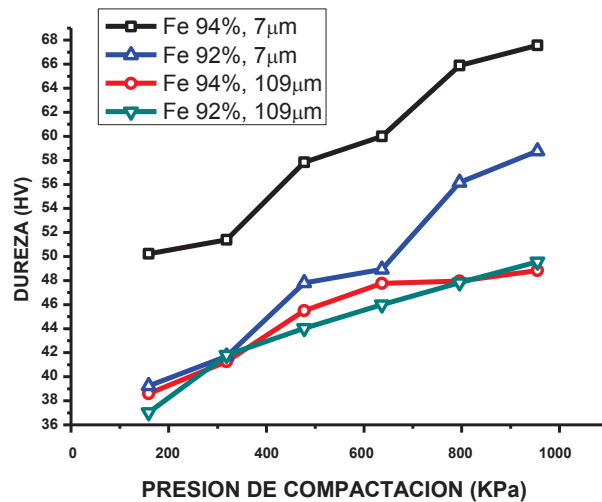
La figura 4.10 muestra los valores de densidad obtenidos para los materiales Fe-Polímero. Los valores de densidad de los materiales Fe-Polímero se ven incrementados con el incremento de la presión de compactación. Los valores de densidad más altos se encuentran en los materiales de menor tamaño de partícula, a la presión de compactación de 936 KPa, tales materiales poseen un valor de  $5.70 \text{ g/cm}^3$  en promedio, mientras que el valor de densidad para los materiales reforzados con partículas con tamaño de  $109 \mu\text{m}$  obtenidos a 936 KPa poseen densidad de  $5.13 \text{ g/cm}^3$  en promedio. Los materiales obtenidos en la experimentación son menos densos en comparación a aleaciones sinterizadas obtenidas por tecnología de polvos [22] y también respecto a materiales compuestos de matriz epoxi con menor concentración de polímero en su composición. Otra variable que influye en la densidad es la presión de

compactación utilizadas en otros estudios en la obtención de materiales compuestos de matriz polimérica, en los cuales las magnitudes de presión de compactación se encuentran en el rango de 2 MPa hasta 1200 MPa [24,26 y 27] y en el presente trabajo la presión de compactación no se excede 1 MPa.



**Fig. 4.10.** Efecto de la presión de compactación sobre la densidad de los composites Fe – Polímero.

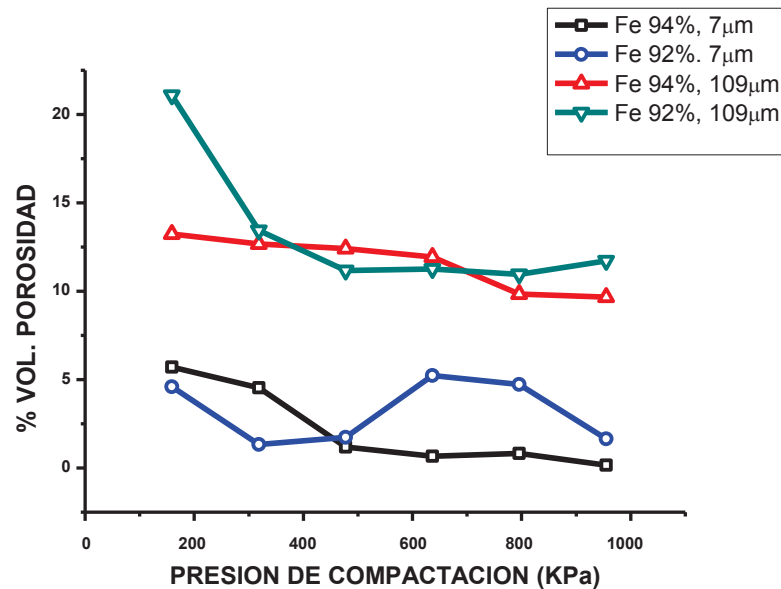
En la figura 4.11 se puede observar que los valores de dureza más altos se presentan en los materiales con mayor densificación, dado que se disminuye la porosidad y las distancias entre partículas son se vuelven más pequeñas.



**Fig. 4.11.** Efecto de la presión de compactación sobre la dureza de los materiales compuestos Fe – polímero.

El material compuesto 94% Fe reforzado con partículas de 7  $\mu\text{m}$  obtenido a 936 kPa exhibe un valor en dureza de 67.5 HV, además es el material con la mayor dureza de todos los materiales obtenidos. Los materiales reforzados con partículas de 109  $\mu\text{m}$  obtenidos a la presión de compactación de 936 kPa muestran valores de dureza de 49.05 HV en promedio. También en la figura 4.11 se puede observar el incremento en la concentración de la resina disminuye la dureza de los composites Fe-Polímero dado que esta es más suave que el hierro.

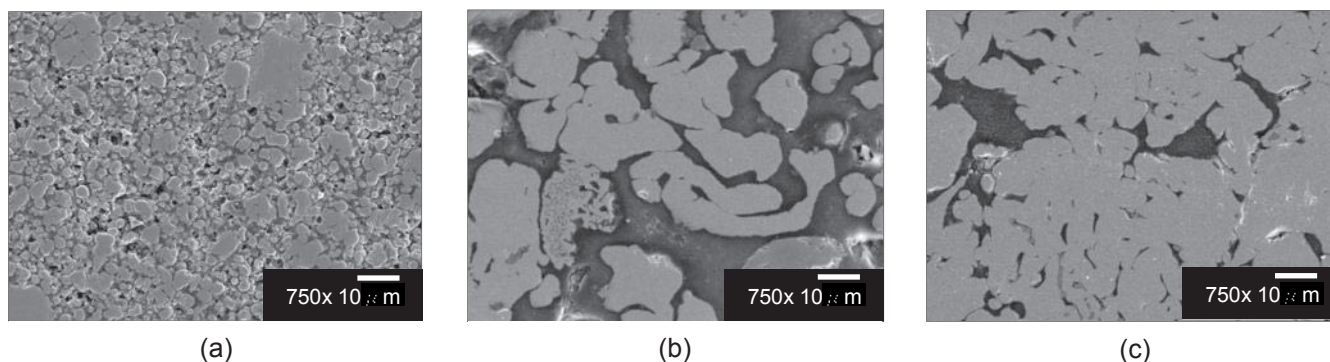
En la figura 4.12 se observa que la porosidad tiende a disminuir con los incrementos de presión de compactación y ésta se encuentra en mayor proporción en aquellos materiales con mayor tamaño de partícula, las variaciones se deben a las distribuciones de tamaños de partícula y a la distribución de las partículas en el dado de compactación. La porosidad encontrada en los materiales Fe-Polímero es del tipo cerrada, ya que la resina sella las superficies durante la compactación debido a que fluye por su consistencia pastosa.



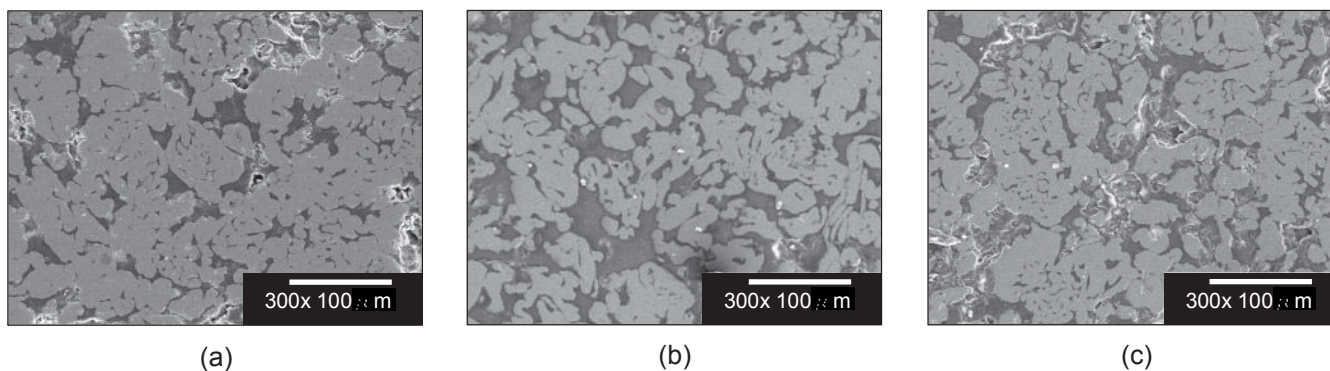
**Fig. 4.12.** Efecto de la presión de compactación y tamaño de partícula sobre la porosidad de los materiales Fe – Polímero.

Los valores de porosidad en los materiales de los materiales reforzados con partículas de 109  $\mu\text{m}$  obtenidos a la presión de compactación de 936 KPa poseen un porcentaje en volumen de porosidad del 10% y los materiales reforzados con partículas de 7  $\mu\text{m}$  obtenidos a esa misma presión poseen un valor de porosidad del 1% en volumen.

Comparando las figuras 4.13 (a) a (c) y 4.14 (a) a (c) se puede observar de manera cualitativa disminución gradual de la porosidad debido al incremento de la presión de compactación, para los materiales compuestos preparados con los dos tamaños de partícula, respectivamente.



**Fig. 4.13.** Materiales compuestos (94% Fe, 7 $\mu$ m) obtenidos a presiones. (a) 156 KPa, (b) 468 KPa, (c) 936 KPa



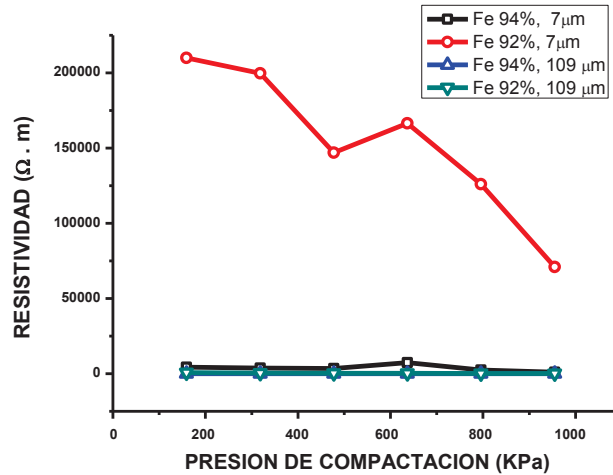
**Fig. 4.14.** Materiales compuestos (94% Fe, 109 $\mu$ m) obtenidos a presiones. (a) 156 KPa, (b) 468 KPa, (c) 936 KPa

#### 4.2.1 RESISTIVIDAD ELECTRICA DE MATERIALES COMPUESTOS

Shokrollahi y colaboradores [9], indican que el valor de la resistividad se ve influenciado por el tamaño de la partícula del polvo, presión de compactación y por la adición de aislantes.

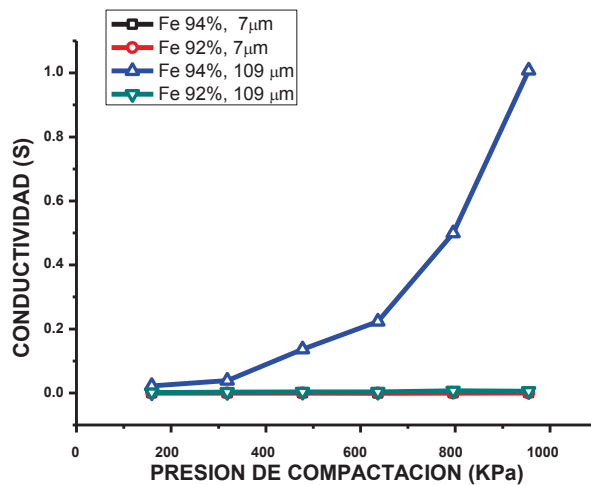
En la figura 4.15 se muestran las curvas de resistividad de los materiales compositos en corriente directa en función de la presión de compactación. En la misma gráfica se observar claramente que la resistividad del material Fe 92% reforzado con partículas de tamaño de 7  $\mu$ m obtenido a 156 KPa es mayor respecto a los demás materiales (210 K $\Omega$ m), debido en gran medida a la concentración de polímero y el área superficial aislada es mayor respecto al área superficial de las partículas de

tamaño de partícula de 109  $\mu\text{m}$ . El incremento de la presión de compactación disminuye la resistividad, dado que se promueve el transporte de carga eléctrica a través de las partículas, dado que se elimina porosidad, la cual actúa como una resistencia eléctrica y a que la distancia entre partículas conductoras de carga se hace más pequeña. El análisis de rayos X mostrado con anterioridad indica que en los polvos metálicos se encuentran libres de otros elementos u óxidos en su composición química, por lo cual los valores de resistividad se deben en gran medida a la concentración de polímero, tamaño de partícula y presión de compactación.



**Fig. 4.15.** Efecto de la presión de compactación, tamaño de partícula y concentración de polímero sobre la resistividad eléctrica de los materiales compuestos.

La figura 4.16 muestra los valores de conductividad eléctrica de los materiales compuestos obtenidos.

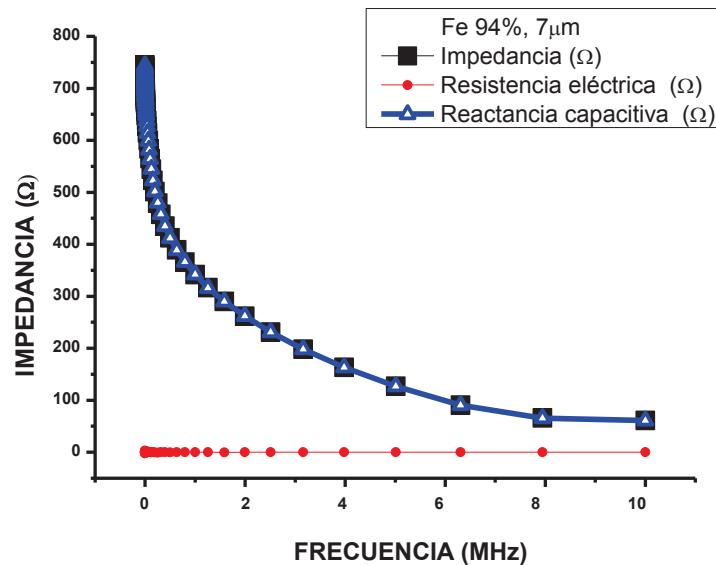


**Fig. 4.16.** Efecto de la presión de compactación, tamaño de partícula y concentración de polímero sobre la conductividad eléctrica de los materiales compuestos.

En la figura 4.16 se puede observar que el comportamiento de la conductividad es inverso a la resistividad. El material con mayor conductividad Fe 94% reforzado con partículas de tamaño de 109  $\mu\text{m}$  obtenido a la presión de compactación de 936 KPa el cual presenta una resistividad de 4  $\Omega\text{m}$  y una conductividad de 1S.

De acuerdo a los valores de resistividad los materiales aptos para aplicaciones de concentración de flujo magnético son los siguientes: todos los materiales compuesto reforzados con partículas de tamaño de 7  $\mu\text{m}$  y el material compuesto 92% Fe reforzado con partículas de 109  $\mu\text{m}$ , debido a que los valores de resistividad encontrados van de 723.5  $\Omega\text{m}$  a 210 k $\Omega\text{m}$ .

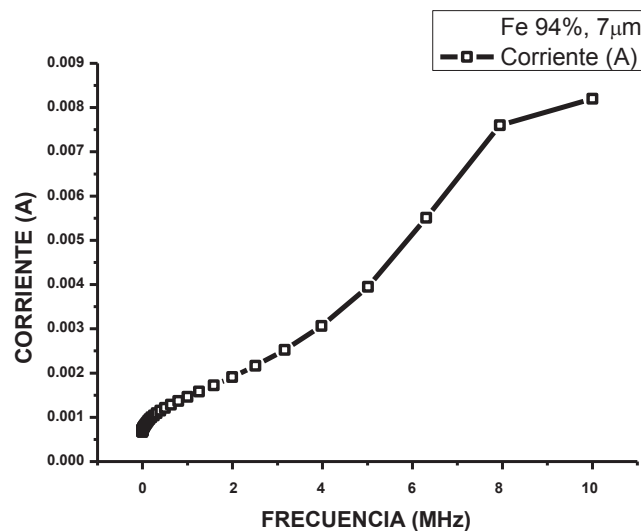
La impedancia (resistencia eléctrica total en corriente alterna) de los materiales obtenidos se debe a la reactancia capacitiva en mayor parte y en forma mínima por resistencia pura de sus componentes. En la figura 4.17 se observa la disminución de la impedancia de los materiales respecto al incremento de la frecuencia, de acuerdo a Donate [44] esto debido a que el material se va cargando y descargando eléctricamente más fácilmente con los cambios de polaridad de la señal eléctrica. Este comportamiento se observó en todos los materiales fabricados.



**Fig. 4.17.** Impedancia eléctrica mostrada por material compuesto (94%Fe, 7  $\mu\text{m}$ ) obtenido a 1.5 kPa.

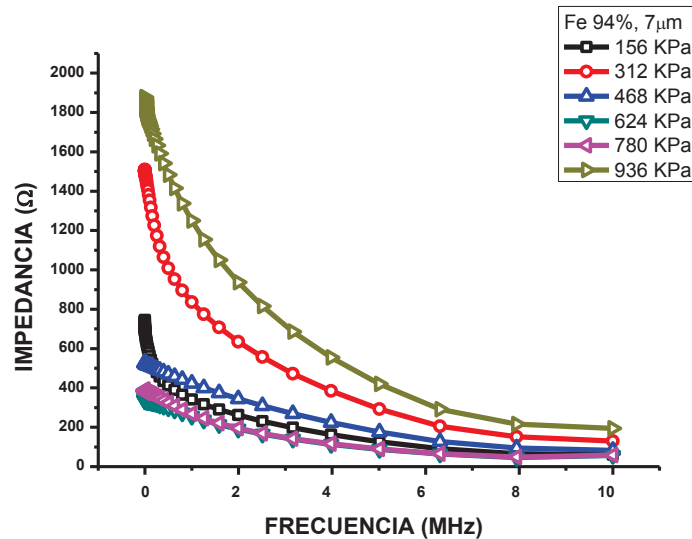
En aplicaciones de concentración de flujo magnético se requiere que el material posea alta resistividad, ya que este es sometido a corrientes inducidas por la bobina. En caso de presentar baja resistividad el material se calentaría debido a la disipación de energía por histéresis magnética y corrientes de Eddy.

Los materiales compuestos fabricados están constituidos por material conductor y material dieléctrico, el mecanismo de conducción de carga predominante es del tipo capacitivo, aunque si consideramos la resistencia eléctrica pura, la conducción estaría dada por un arreglo en serie resistencia – capacitor. La forma de la curva de impedancia respecto a la frecuencia es característica de un elemento capacitivo [44]. La disminución en los valores de impedancia al incrementar la frecuencia se relacionan al incremento de la intensidad de corriente. Como puede ser observado comparando las figuras 4.17 y 4.18, respectivamente. Este comportamiento se observó en todos los materiales fabricados.

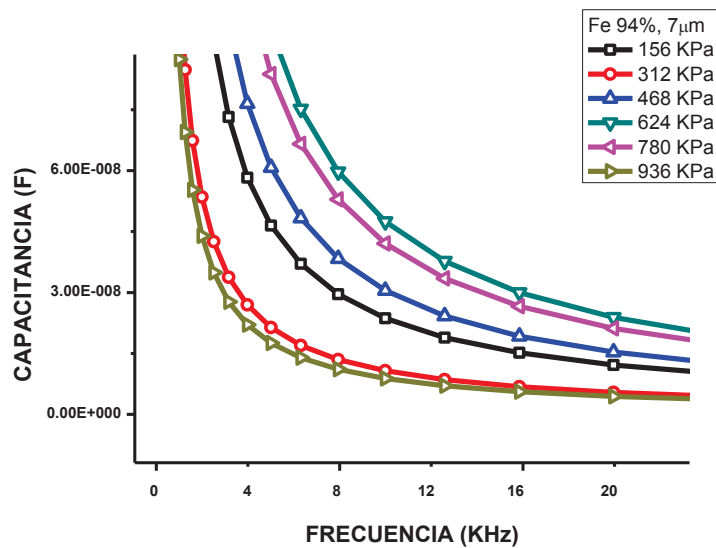


**Fig. 4.18.** Intensidad de corriente eléctrica mostrada por material compuesto (94%Fe, 7  $\mu\text{m}$ ) obtenido a 156 KPa.

La impedancia está también relacionada a la capacitancia, dado que la impedancia se comporta de manera inversa a la capacidad de almacenamiento de carga [45]. Tal comportamiento lo mostraron todos los materiales compuestos y se hace evidente comparando las figuras 4.19 correspondiente al cambio de impedancia respecto a la frecuencia y 4.20 correspondiente al cambio de capacitancia respecto a la frecuencia. También puede observarse que los valores de impedancia y capacitancia son independientes de la presión de compactación, por lo tanto tales valores son fuertemente influenciados por la distribución aleatoria de las partículas en el material y también por defectos en el material, tales como la aglomeración de partículas finas.

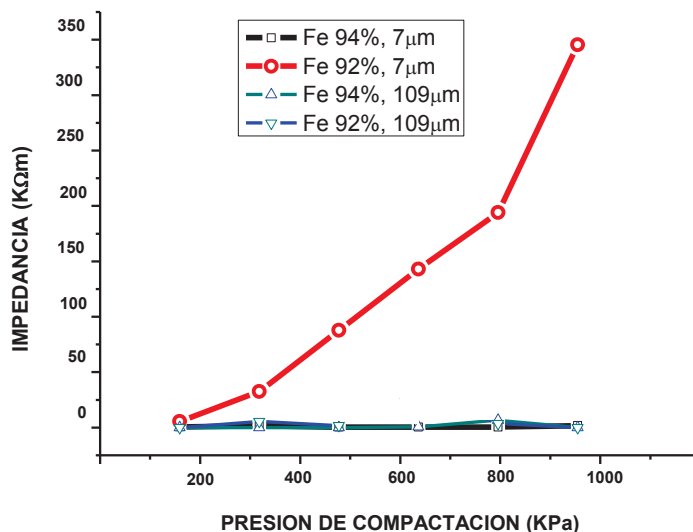


**Fig. 4.19.** Curvas de impedancia respecto a la frecuencia de los materiales compuestos (94%Fe, 7  $\mu\text{m}$ ) obtenidos a diferentes presiones de compactación.

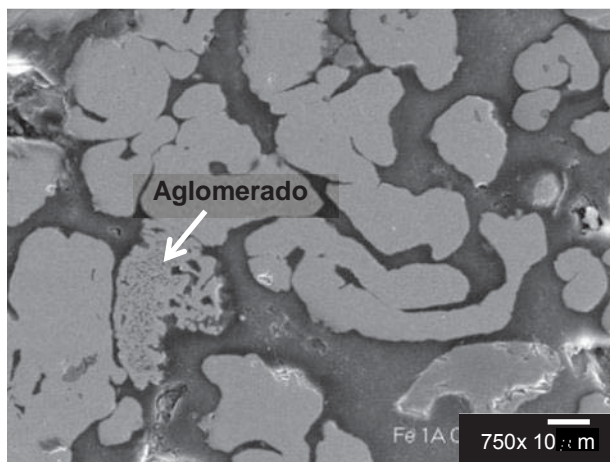


**Fig. 4.20.** Curvas de capacitancia respecto a frecuencia de los materiales compuestos (94%Fe, 7  $\mu\text{m}$ ) obtenidos a diferentes presiones de compactación.

La impedancia de los materiales obtenidos no muestra una tendencia respecto a la presión de compactación (fig. 4.21), dado que es más sensible a la composición química, tamaño de partícula y a la anisotropía de los materiales (fig. 4.22).



**Fig. 4.21.** Valores máximos de impedancia respecto a la presión de compactación de los materiales compuestos.

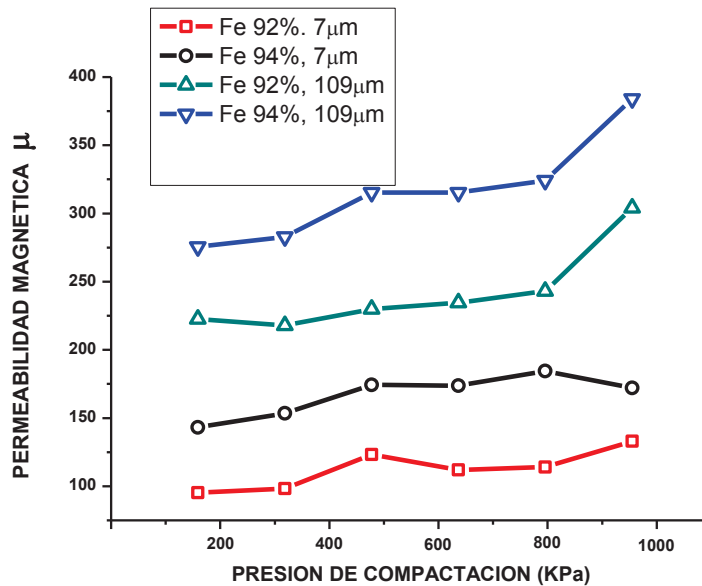


**Fig. 4.22.** Material compuesto (94% Fe, 7 $\mu$ m) obtenido a una presión de 468 KPa. Se puede observar que la distribución de fases no es homogénea y también la aglomeración de partículas finas. La anisotropía se presenta en todos los materiales compuestos fabricados.

#### 4.2.2 PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DE MATERIALES COMPUESTOS

Shokrollahi y colaboradores [9] indican de forma general que la permeabilidad magnética disminuye con la adición de algún tipo de aglutinante, también menciona que esta misma propiedad se ve incrementada aumentando el tamaño de partícula y la presión de compactación. Efectivamente esto

se confirma en la figura 4.23, donde se presentan los valores de permeabilidad magnética inicial en función de la concentración de polímero, tamaño de partícula y presión de compactación.



**Fig. 4.23.** Permeabilidad magnética inicial de los materiales compuestos.

Los valores de permeabilidad magnética que muestran los materiales compuestos en la figura 4.23 obtenidos en la experimentación van de 100 hasta 385 en comparación con algunos materiales sinterizados obtenidos por metalurgia de polvos estos valores resultan considerablemente bajos [22,28 y29] y superiores respecto al material sinterizado obtenido por Equihua [35]. Los valores de permeabilidad también son superiores respecto a algunos materiales compuestos de matriz polimérica [23,25-27]. Los valores de permeabilidad obtenidos por J. C. Villaseñor [34] son mayores que los obtenidos en este trabajo, pero tienen la desventaja (igual los materiales sinterizados) de que su resistividad se encuentra por debajo de  $1 \Omega\text{m}$ , esto los hace susceptibles a calentamiento por inducción y no aptos para aplicaciones de concentración de energía magnética.

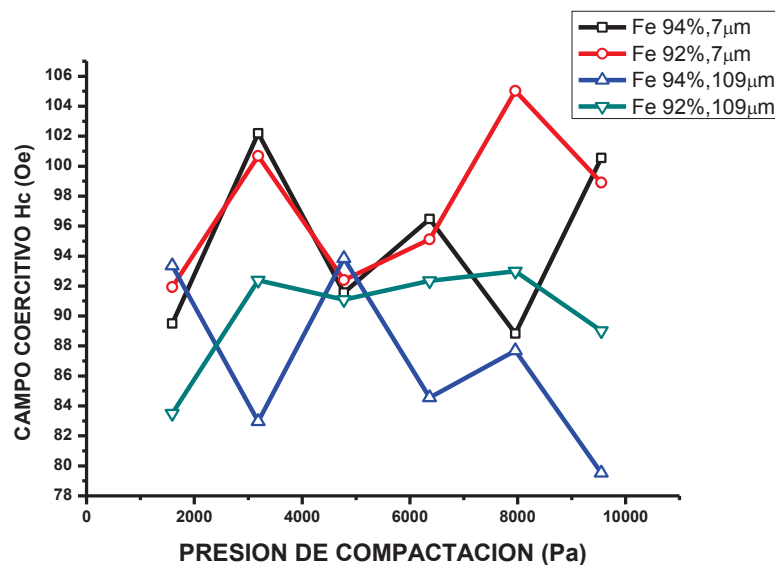
La permeabilidad magnética de los materiales compuestos Fe-Polímero cambia en función de la frecuencia del campo aplicado. A medida que la frecuencia de campo magnético aplicado se incrementa la permeabilidad disminuye; esto se debe a que el tiempo para que los dominios magnéticos se orienten a una determinada posición es más corto, a tal punto que los dominios magnéticos quedan inmóviles y el material deja de responder a los estímulos del campo magnético aplicado. En los materiales obtenidos la frecuencia de relajación es de 5 MHz aproximadamente, lo cual los hace aptos para trabajar en campos magnéticos de alta frecuencia.

La resistividad eléctrica está relacionada a la permeabilidad eléctrica, porque se comportan de manera inversa. La permeabilidad magnética depende fuertemente de la inducción magnética entre

partículas. La inducción magnética entre partículas depende de los siguientes factores tales como la distancia entre partículas ya que a menor distancia se favorece formación de dominios magnéticos, la presencia de porosidad que actúa como zona de desmagnetización ( $\mu=1.0$ ) que impide la formación rápida de dominios magnéticos y el tamaño de partícula influye notablemente porque las partículas de menor tamaño exhiben un área superficial aislada mayor respecto a partículas de mayor tamaño. Los materiales compuestos de mayor resistividad poseen los valores más bajos de permeabilidad magnética.

#### 4.2.3 CAMPO COERCITIVO DE MATERIALES COMPUESTOS

Los valores de coercividad son sensibles a la composición química de los materiales compuestos y a la introducción de esfuerzos residuales durante la etapa de compactación, los cuales se incrementan a mayores presiones de compactación. Los esfuerzos residuales generan incremento de pérdidas de energía por histéresis magnética. La figura 4.24 se muestran los valores de campo coercitivo ( $H_c$ ) respecto a la presión de compactación.



**Fig. 4.24.** Coercividad magnética de los diferentes materiales compuestos Fe - Polímero.

Los valores de coercitividad magnética se mantienen constantes para cada grupo de materiales compuestos, ya que depende de la composición química y de la microestructura. Los valores más altos de resistencia a la desimantación los obtienen aquellos materiales que se encuentran con mayor cantidad de material ferromagnético aislado, es decir los materiales con mayor concentración de polímero y mayor área superficial aislada; ya que los dominios magnéticos que deben inducirse entre ellos para generar un cambio en la orientación de los dominios magnéticos [19]. Los materiales magnéticos suaves tienen valores de coercividad próximos a  $10^{-1}$  T o 100 Oe [30], por lo tanto, los materiales compuestos fabricados entran dentro de tal categoría.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES

Fue posible la obtención de materiales compuestos de matriz polimérica Fe – Polímero mediante tecnología de polvos a las presiones de compactación de 156 KPa a 936 KPa, con concentraciones metal/polímero de 94/6 y 92/8 % en peso, con tamaños de partícula de 7  $\mu$  m y 109  $\mu$  m.

Se pudo observar que los materiales obtenidos son anisotrópicos, dado que la distribución de las fases es irregular y la aglomeración de finos. Aun así los materiales no presentaron fallas de agrietamiento o distorsión geométrica al ser expulsados del dado de compactación.

Las magnitudes de permeabilidad magnética mayor  $\mu = 385$ , se obtienen en el material 94% Fe reforzado con partículas de tamaño de 109  $\mu$ m obtenidos a 9.5 KPa.

En las aplicaciones de concentración de flujo magnético se requiere altas permeabilidades magnéticas y alta resistividad eléctrica. En lo que respecta a los materiales obtenidos en el presente trabajo, ambas propiedades no pueden ser incrementadas al mismo tiempo, debido a que se comportan de manera inversa.

Los materiales Fe-Polímero obtenidos son del tipo magnético suave.

Se encontró que los materiales reforzados con partículas de 7  $\mu$ m y en el material 92% Fe reforzado con partículas de 109  $\mu$ m obtenido a 156 MPa, son aptos para aplicaciones de concentración de flujo magnético. Los valores de permeabilidad van de 100 hasta 350 y los de resistividad eléctrica van de 723.5  $\Omega$ m hasta 210 k  $\Omega$ m.

La coercividad de los materiales Fe-Polímero es susceptible a esfuerzos residuales y a la concentración de polímero. La coercividad se puede controlar de mejor manera con una mejor distribución de los polvos en la etapa de compactación.

## RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO

- Disminuir la concentración de polímero o aumentar el tamaño de partícula en la obtención de materiales compuestos, para que respondan más fácilmente a los campos magnéticos y disminuya la coercividad magnética.
- Obtener mediciones de propiedades eléctricas y magnéticas hasta 80°C.
- De ser posible, obtener los compactos mediante prensado biaxial e isostático.
- Implementar un mezclador de polvo con el fin de obtener la misma distribución de tamaño de partícula de los polvos a procesar.
- Realizar un estudio de corrosión.
- Determinar la pérdida de energía total, debida a las corrientes de Eddy y por histéresis magnética.

## CITAS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] www.fluxtrol.com (13 Diciembre 2011).
- [2] www.alpha1induction.com (15 Diciembre 2011).
- [3] L.A Dobrzanski, R. Noweosielski, J. Konieczny, A. Przybyl, J. Wyslocki, (2005). “*Magneto-elastic characterization and thermal stability of the composite materials made of magnetic and non-magnetic constituents*”. J. Mag. Magn. Mater, No. 1510, 290-291.
- [4] L. A. Dobrzanski, R. Noweosielski, A. Przybyl, J. Konieczny, (2005). “*Soft magnetic properties of compacted powder alloys*”. J. Mater. process technol. No. 20, 162-16.
- [5] R. Nowosielski, J.J. Wyslocki, I. Wnok, P. Gramatyka. “*Soft magnetic composite based on nanocrystalline  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$  and Fe powders*”. J. Mater. Process. Technol. (in press)
- [6] A. Brend Strong, (1989). “*Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods, and applications*”. Ed. Society of manufacturing engineers, pp. 1 – 74.
- [7] Eduardo A. Mari, (2011). “*Los materiales cerámicos*”. Ed. Alsina, pp. 7.
- [8] J. Espí López, J. Muñoz Marí y G. Camps Valls, (2006). “*Análisis de circuitos*”. Ed. Universidad de Valencia, pp. 28.
- [9] H. Shokrollahi, K. Janghorban, (2007). “*Soft magnetic composite materials (SMCs)*”. J. Materials processing Technology, No. 189, pp. 1- 12.
- [10] L. Pennander, A. Jack, (2003). “*Soft magnetic iron powder material AC properties and their applications in electrical machines*”. Mag. Mater., Euro PM.
- [11] J. A. Verduzco, I. Betancourt, N. Ortiz, L.R. Olmos, J. Garcia, (2006). “*Electric and magnetic properties of Fe-Ni powders-polymeric matrix composites*”. Mater. Lett. No. 60, pp. 2033-2037.
- [12] T. Sourmail, “*Near equiatomic Fe-Co alloys: constitution, mechanical and magnetic properties*”. Prog. Mater Sci., in press
- [13] M. Godec, (2001). “*Development of Fe-Si-B powders for soft magnetic applications*”. Mater. Technol. No. 35, pp. 325-330.
- [14] M. I. Rosales, E. Amano, M. P. Cautle, R. Valenzuela, (1997). “*Impedance spectroscopy studies of Ni- Zn ferrites*”. Mater. Sci. and Eng. No. 49, pp. 221-226.
- [15] I. Nanlin, R. K. Mishra, G. Thomas, (1986). “*Controlled atmosphere annealing of high permeability Mn-Zn ferrite*”. IEEE transactions of magnetic 22.
- [16] F. Roozeboom, P. J. H. Bloemen, W. Klaassens, E. G. J. Van de Riet, J. J. T. M. Donkers, (1998). “*Soft magnetic fluxguide materials*”. Philips J. Res. No. 51, pp. 59-91.

- [17] G.A. V. Sowter, (1987). "Soft magnetic materials for audio transformers: history, production and applications". J. Audio Eng. Soc. No 35, pp. 760-777.
- [18] M. Drofenik, (1998). "Influence of addition of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  on the grain growth and magnetic permeability of Mn-Zn ferrites". J. Am. Ceram. Soc. No. 81, pp. 2841-2848.
- [19] B. D. Cullity and C. D. Graham (2009). "Introduction to magnetic materials". Ed. IEEE, pp. 1-477.
- [20] K. Asaka, C. Ishihara, (2005) "Technical trends in soft magnetic parts and materials". Hitachi powdered metals technical report, No. 4, pp. 3-9.
- [21] H. Skarrie, (2001). "Thesis Outline, "Design of powder core inductors". Universitetstryckeriet, Lund University.
- [22] F. G. Hanejko, H. G. Phan, (1996). "Powder metallurgy materials for AC magnetic applications". Presented at PM TEC, Washington, DC, World Congress.
- [23] K. S. Karasimhan, M. L. Marucci, (2003). "Innovative electric devices using iron-polymer materials". Mag. Mater, Euro PM, pp. 207-212.
- [24] A. H. Taghvaei, H. Shokrollahi, M. Ghaffari and K. Janghorban, (2010). "Influence of particle size and compaction pressure on the magnetic properties of iron-phenolic soft magnetic composites". J. of Physics and Chemistry of solids, No. 71, pp. 7-11.
- [25] Halit S. Gokturk, Thomas J. Fiske, Dilhan, M. K. Kalyon (1993). "Effects of particle shape and size distributions on the electrical and magnetic properties of nickel/polyethylene composites". Journal of applied polymers Sci. No. 50, pp. 1891-1901.
- [26] H. Shokrollahi, K. Janghorban, (2006). "The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites". Mater. Sci. and Eng. No. 134, pp. 41-43.
- [27] Halit S. Gokturk, Thomas J. Fiske, Dilhan, M. K. Kalyon (1993). "Electric and magnetic properties of a thermoplastic elastomer incorporated with ferromagnetic powders". IEEE transactions on magnetics No. 6, pp. 4170-4176.
- [28] H. G. Rutz, F. G. Hanejko, G. W. Ellis, (1997). "The manufacture of electromagnetic components by the powder metallurgy process". International conference on powder metallurgy and particulate materials. Chicago, IL. USA.
- [29] L. P. Lefebvre, S. Pelletier, C. Gélinas, (1997). "Effect of electrical resistivity on core losses in soft magnetic iron powder materials". J. of magnetism and mag. Mater. No. 176, pp. 193-196.
- [30] Sung-Soo Kim, Sun-Tae Kim, Yeo-Choon Yoon, Kyung-Sub Lee, (2005). "Magnetic, dielectric, and microwave absorbing properties of iron particles dispersed in rubber matrix in gigahertz frequencies". Journal of applied physics No. 97 10F901-10F905
- [31] J. Fuzer, P. Kollar, D. Oleksakova, S. Roth, (2009). "AC magnetic properties of the bulk Fe-Ni and Fe-Ni-Mo soft magnetic alloys prepared by warm compaction" Journal of alloys and compounds No. 483, pp. 557-559.
- [32] <http://www.emmafiorentino.com.ar/VIII%20SEMINARIO/APLICACIONES.PDF> (10 Septiembre 2011).

- [33] Robert Ruffini, T. Nemkov, (1996). "*Magnetic field control and concentration in induction heating coils*". Ed. Heat treating society, pp. 125-133.
- [34] Juan Carlos Villaseñor Guillen, (2006). "*Permeabilidad magnética y resistividad eléctrica de polvos de Fe y Ni en una matriz polimérica, para su posible uso en concentradores de energía magnética*" Instituto Tecnológico de Morelia, pp. 18-19.
- [35] Miguel Equihua León, (2011). "*Diseño de un concentrador de energía magnética utilizado en templates superficiales por inducción*" Instituto de Investigaciones Metalúrgicas UMSNH, PP. 67-114
- [36] H. Hansmann, H. Wismar, (2003). "*Composites Epoxy Resins*". ASM Handbook, pp. 30.
- [37] Fred W. Billmeyer, Jr., (1975). "*Ciencia de los polímeros*". Ed. Reverté, pp. 474.
- [38] Jerry D. Wilson y Antony J. Buffa, (2003). "*Física*". Ed. Pearson educación, pp. 577-585.
- [39] Mikell P. Groove, (1997). "*Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas*". Ed. Prentice Hall, pp. 398.
- [40] Randall M. German, (1994). "*Powder metallurgy science*". Ed. Metal industries powders federation, pp. 17 – 211
- [41] Eugene A. Irene, (2005). "*Electronic materials science*". Ed. Wiley-interscience, pp. 26.
- [42] Zhen Dai, Yanfang Li, Shuguang Yang, Ning Zhao, Xiaoli, Zhang. Jian Xu, (2009). "*Kinetics and thermal properties of epoxy resins based bisphenol fluorine structure*" European polymer journal No. 45, pp. 1940-1948.
- [43] Askeland, D. R. y Phule, (2004). "*Ciencia e ingeniería de los materiales*". Ed. Thomson, pp. 449-517.
- [44] Antonio Hermosa Donate, (2003). "*Principios de electricidad y electrónica*". Ed. Marcombo, vol. 3, pp.6.
- [45] Morris Slurzberg y William Osterheld, (1987). "*Fundamentos de electricidad – electrónica*". Ed. McGraw Hill, pp. 163-585.