

Síntesis y caracterización de un material compuesto Fe – Polímero obtenido mediante metalurgia de polvos para la concentración de campo magnético en altas frecuencias

Synthesis and characterization of an Fe-polymer composite material obtained via powder metallurgy for high-frequency magnetic field concentration

Carlos E. Borja Soto ^a, Justo F. Montiel Hernández ^b, José L. Rodríguez Muñoz ^c, Sugey G. Tapia Mata ^d, Jorge Zuno Silva ^e

Abstract:

This study presents progress in the synthesis and characterization of an Fe-polymer composite material produced via powder technology. Iron powder served as the reinforcement material, while epoxy resin formed the matrix phase. The composition of the Fe-polymer material consisted of 97 wt % Fe and 3 wt % epoxy resin. The iron powder used had an average particle size of 150 μm . The resin and powders were mixed and uniaxially compacted in a hydraulic press at a compaction stress of 128 kPa to produce a composite pellet measuring 15.13 mm in diameter and 4.32 mm in length. The density (4.669 g/cm³), electrical resistance (149.03 m Ω), and resistivity ($505 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$) of the resulting compact were determined. Density was calculated by comparing the pellet's volume to the theoretical volume of the fully densified material. A direct current (DC) source equipped with voltage, current, and power meters was used to determine the sample's electrical resistivity. Finally, an oscilloscope with a built-in signal generator (FNIRSI model 1014D) was used to determine the composite material's maximum operating frequency. The resulting composite material exhibits a maximum operating frequency of 1.4 MHz and a voltage drop of 17.6% when subjected to a 400 kHz signal.

Keywords:

Composite material, powder metallurgy, electrical properties, magnetic materials

Resumen:

El presente trabajo muestra avances para la síntesis y caracterización de un material compuesto Fe – Polímero obtenido mediante tecnología de polvos. Fue usado polvo de hierro como material de refuerzo y resina epóxica para la formación de la fase matriz en el material. La proporción de los materiales usados para obtener el material Fe- Polímero fue de 97% de Fe en peso y 3% resina epóxica en peso. El Fe en forma de polvo que fue usado tiene un tamaño promedio de partícula de 150 μm . La resina y los polvos fueron mezclados y prensados mediante compactación uniaxial en una prensa hidráulica a un esfuerzo de compactación de 128 kPa para la obtención de una pastilla de material compuesto de 15.13 mm de diámetro y 4.32 mm de longitud. Fueron determinados los valores de densidad (4.669 g/cm³), resistencia eléctrica (149.03 m Ω) y resistividad $\Omega \cdot \text{m}$ (505×10^{-4} del compacto obtenido. La densidad fue determinada a partir del volumen de la pastilla respecto al volumen teórico del material completamente densificado. Fue usada una fuente de corriente directa con medidores de voltaje, corriente y potencia, esto con la finalidad de determinar el valor de resistividad

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-6890-6069>, Email: justo_montiel@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0005-4783-9983>, Email: ta477719@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

eléctrica de la muestra. Finalmente, para determinar la frecuencia máxima de trabajo en el material compuesto fue usado un osciloscopio con generador de señal marca FNIRSI modelo 1014D. El material compuesto obtenido tiene una frecuencia máxima de trabajo de 1.4 MHz y una caída de tensión de 17.6% al aplicar una señal de 400 kHz.

Palabras Clave:

Material compuesto, metalurgia de polvos, propiedades eléctricas, materiales magnéticos

Introducción

Los materiales usados en la ingeniería tienen aplicaciones estructurales y funcionales. Los primeros, están destinados a estar bajo esfuerzos mecánicos como su principal función. Por otra parte, los materiales con aplicaciones funcionales son aquellos cuya función principal no es soportar esfuerzos mecánicos. Existen una gran variedad de materiales, los cuales son clasificados en metálicos, cerámicos, poliméricos, compuestos y conductores (Askeland, 2017). De manera general a todas las combinaciones de materiales se les pueden llamar materiales compuestos, 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 (Brend, 1989). 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. 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. La resistividad eléctrica de los polímeros es muy elevada comparada con la resistividad eléctrica exhibida por los metales. López et al. (López, 2006), indican que el valor de resistividad del hierro es de $10 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, el cual es menor en comparación al valor de resistividad de $5 \times 10^5 \Omega \cdot m$ 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. Ha sido reportado que los materiales compuestos constituidos por hierro y resina epóxica, los

cuales tienen potenciales aplicaciones para la concentración de campo magnético en sistemas calentamiento por inducción para el tratamiento térmico de materiales metálicos (Dacpol, 2026). La concentración de energía magnética en tal aplicación es fundamental para lograr una mayor eficiencia para el aprovechamiento de energía magnética convertida a energía térmica (Inductronix, 2026). Existen materiales que han sido obtenidos a través de las técnicas de la metalurgia de polvos. Sin embargo, las propiedades físicas y químicas de estos materiales son estudiadas debido a las diferentes variables relacionadas al procesamiento; tales como, esfuerzo de compactación, tamaño de partícula, morfología de las partículas, composición química, entre otras variables. Cabe mencionar que las variables de procesamiento influyen en las propiedades finales de los materiales obtenidos, por ejemplo: densidad, dureza, esfuerzo máximo, resistencia al impacto, conductividad térmica, conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, magnetización, resistencia a la corrosión, entre muchas otras propiedades.

Han sido reportados materiales compuestos para su potencial uso en concentradores de energía magnética, los cuales deben de ser materiales magnéticos suaves. En este sentido Verduzco et al. (Verduzco, 2017) ha reportado un material compuesto basado en polvos de Fe, Ni y Co como partículas de refuerzo y resina epóxica como fase matriz. Los polvos de Fe, Ni y Co tuvieron un tamaño de partícula de 150, 10 y 2 μm . En dicho trabajo fue usada un esfuerzo de compactación de 91 MPa. En dicho trabajo fueron determinadas las propiedades magnéticas relacionadas a curvas de histéresis magnética, permeabilidad magnética y frecuencia de relajación, cuyos valores reportados permite que el material obtenido pueda trabajar en campos magnéticos de alta frecuencia a un valor máximo de 1×10^7 Hz, ya que en valores superiores la permeabilidad magnética se reduce a cero. Sin embargo, aun cuando los materiales compuestos de matriz polimérica pueden trabajar en altas frecuencias, resulta necesario estudiar los valores de resistividad eléctrica y máxima frecuencia de trabajo cuando estos son obtenidos a baja magnitud esfuerzo de compactación. Aunque los materiales magnéticos suaves pueden

presentar alta permeabilidad magnética también presentan alta conductividad eléctrica, lo cual los hace susceptibles al calentamiento por la formación de corrientes parásitas. La importancia del presente avance de investigación consiste en la obtención de este tipo de materiales a baja magnitud de esfuerzo de compactación, la determinación de la resistividad, caídas de tensión en función de la frecuencia y la frecuencia máxima de trabajo del material en circuitos de corriente alterna; esto permitirá ampliar la información reportada en la literatura acerca de este tipo de materiales ya que los avances más significativos han sido reportados por Shokrollahi et al. (Shokrollahi, 2007), quienes indican que los parámetros de procesamiento influyen en las propiedades finales de los materiales obtenidos mediante pulvimetalurgia, por ejemplo, la magnitud de la compactación, tamaño de partícula, cantidad de constituyentes, entre otras. Por lo tanto, el estudio de los materiales compuestos es de interés para lograr materiales con una combinación de propiedades de las cuales no podrían ser alcanzadas por sus constituyentes de forma individual. Los avances en la investigación de los materiales Fe- polímero en este trabajo no incluye la caracterización de otras propiedades físicas aparte de las mencionadas anteriormente, por lo tanto, queda pendiente la caracterización de propiedades magnéticas para trabajos futuros. Cabe mencionar que el presente trabajo también muestra la micro estructura del material estudiado para una identificación de las fases de refuerzo y matriz. Los resultados son presentados y discutidos a partir de los datos experimentales.

Metodología

Fue obtenido un material compuesto Fe - Polímero con 97% de Fe en peso y 3% resina epóxica en peso con forma cilíndrica a partir de Fe en forma de polvo. El polvo usado presentó tamaño promedio de partícula de 150 μm . La pastilla cilíndrica fue obtenida mediante la técnica de compresión uniaxial cuyas dimensiones son las siguientes: 15.13 mm de diámetro x 4.32 mm de longitud. La magnitud del esfuerzo de compresión fue de 128 kPa al hacer uso de un dado metálico de cavidad cilíndrica para compactación y una prensa hidráulica. La pastilla cilíndrica de material compuesto fue usada para estimar la densidad del material a partir de la medición de sus dimensiones y su peso. Las dimensiones de la pastilla y el peso de la misma; fueron determinadas mediante un vernier digital y una balanza, respectivamente. Ambos instrumentos con precisión de cuatro dígitos. A partir de el volumen y el peso fue estimada la densidad del material. La cantidad de porosidad en el material fue calculada a partir de la diferencia del volumen teórico del material completamente densificado por medio de la regla de las

mezclas y el volumen calculado a partir de las dimensiones de la pastilla cilíndrica que fue obtenida experimentalmente. Con la finalidad de determinar la resistencia eléctrica del material se hizo pasar una corriente directa mediante una fuente voltaje e intensidad de corriente variable. El valor de la resistencia eléctrica del material fue estimado a partir de la aplicación de la ley de ohm. Fue usado un osciloscopio con generador de señales marca FNIRSI modelo 1014D con capacidad en rango de frecuencia de 200 kHz a 1.6 GHz. Dicho instrumento permitió medir las caídas de voltaje y la máxima frecuencia de funcionamiento del material al aplicar una corriente alterna en un rango entre 143 y 156 mV y frecuencias entre 200 kHz a 1.5 MHz. La precisión del instrumento es de $\pm 2\%$ en mediciones de voltaje y $\pm 0.01\%$ en mediciones de frecuencia. Finalmente, la muestra fue analizada en un microscopio óptico de la marca Nikon modelo Eclipse para observar la microestructura del material.

Resultados

La Tabla 1 muestra las cantidades en peso de los constituyentes para la obtención del material compuesto Fe – Polímero. La resina quedó constituida por resina (0.056 g) y catalizador (0.030 g) en 65% y 36% en peso, respectivamente.

Tabla 1. Cantidades de constituyentes del material compuesto. Fuente: Elaboración propia.

Constituyente	Cantidad %	Cantidad en peso g
Fe	97	2.880
Resina + catalizador	3	0.086

La figura 1 muestra el material compuesto con forma cilíndrica que fue obtenido mediante compactación uniaxial a un esfuerzo de compactación de 128 kPa.

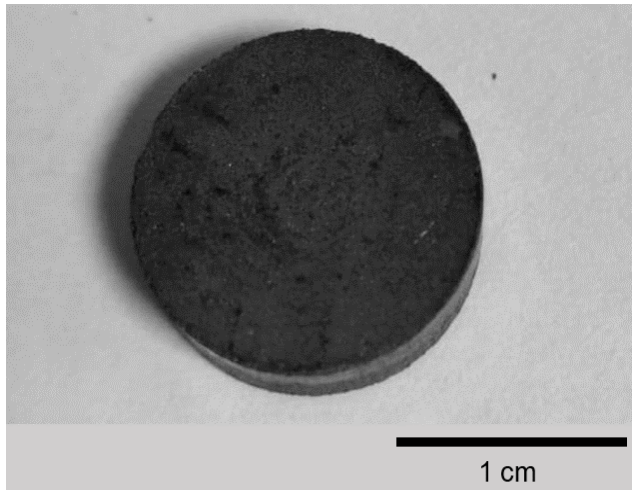


Figura 1. Muestra cilíndrica de material compuesto Fe – Polímero. Fuente: Elaboración propia

La magnitud de dicho esfuerzo es mucho menor en comparación con las magnitudes usadas en los procesos de compactación de polvos. Sin embargo, la aplicación de esfuerzos de compactación bajos permite promover la cantidad de porosidad en el material y la resistividad eléctrica. Una vez que la resina epóxica del material concluye el proceso de curado, el compuesto adquiere sus propiedades finales, por esto, el material compuesto que fue obtenido no requiere la aplicación del proceso de sinterización.

La Tabla 2 muestra los valores determinados de densidad, resistencia eléctrica y resistividad eléctrica del material investigado. El valor de la densidad del material es 4.669 g/cm^3 , el cual es menor a la densidad del hierro que corresponde a 7.87 g/cm^3 ; por lo tanto, la diferencia es 3.201 g/cm^3 que en porcentaje equivale a 40.6%. Dicha diferencia de densidades es debida a la resina epóxica que tiene una baja densidad, la cual es de 1.2 g/cm^3 y la presencia de porosidad en el material al haber sido obtenido a bajo esfuerzo de compactación.

De acuerdo a Hanejko (Hanejko, 1996) existen materiales sinterizados a partir de polvos de Fe, Fe-P, Fe-Si, 50Ni-50Fe; tales materiales tienen valores de densidad en el rango de $6.8 - 7.6 \text{ g/cm}^3$. Tales materiales sinterizados son más densos que el material Fe – polímero (4.669 g/cm^3), principalmente porque la sinterización permite suprimir parcial o totalmente la porosidad en el compacto y por la presencia de la resina epóxica en los materiales Fe-polímero, esta última presenta baja densidad respecto al Fe.

Tabla 2. Propiedades físicas del material compuesto Fe – Polímero. Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Magnitud
Densidad, g/cm^3	4.669
Resistencia eléctrica, $\text{m}\Omega$	149.03
Resistividad, $\Omega\cdot\text{m}$	505×10^{-4}

La porosidad del material fue determinada a partir de la diferencia entre el volumen teórico del material completamente densificado en ausencia de porosidad (0.338 cm^3) y el volumen de la pastilla de material compuesto que fue obtenido experimentalmente (0.776 cm^3); por lo tanto, el volumen de porosidad en la muestra cilíndrica de material compuesto fue de 0.438 cm^3 . De acuerdo a lo anterior, el porcentaje de porosidad en el material estudiado equivale a un 56%. El valor estimado de resistividad eléctrica para el material Fe – Polímero fue de $505 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{m}$, el cual es un valor mayor respecto al valor de resistividad eléctrica del hierro ($8.90 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$); también resulta mayor a los materiales sinterizados, tales como Fe ($10 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$), Fe - P ($30 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$), Fe - Si ($60 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$) y 50Ni – 50Fe ($45 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$) Hanejko (Hanejko, 1996). Por su parte, Villaseñor (Villaseñor, 2006) obtuvo y caracterizó materiales compuestos Fe – Ni – Polímero a bajo esfuerzo de compactación en un rango de 156 a 936 kPa, esto al usar polvos de Fe y Ni con tamaño de partícula de $10 \mu\text{m}$ y 3% en peso de resina epóxica. El valor de resistividad a 156 kPa fue de $961 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{m}$, es de esperar que es posible que los valores de resistividad puedan ser incrementados con la disminución del tamaño de partícula al generarse una mayor cantidad del área superficial de las partículas de polvo cubiertas por la resina epóxica, por esto, dificulta el paso de corriente eléctrica a través del material. Al estimar el valor de resistividad eléctrica del material completamente densificado por medio de la regla de las mezclas este correspondería a $3.97 \times 10^{12} \Omega\cdot\text{m}$. Sin embargo, el valor de dicha propiedad es consecuencia de distintas variables de procesamiento, tales como la magnitud del esfuerzo de compactación, tamaño de partícula, morfología de las partículas y composición química del material, principalmente. De acuerdo a Randall (Randall, 2005), la magnitud del esfuerzo de compactación influye en la resistencia en verde, la densificación del material y la cantidad de porosidad. También indicó que la morfología y el tamaño de partícula influye en el empaquetamiento, porosidad y compresibilidad de los polvos a ser compactados. En el caso del tamaño de partícula, este parámetro es relevante porque está directamente con el área superficial mediante la cual interactúan los diferentes constituyentes en un material compuesto. Respecto a la composición química de los materiales compuestos, esta influye notablemente en las propiedades de los materiales

compuestos a partir de la combinación de sus propiedades. A través de la pulvimetalurgia es posible la obtención de materiales con propiedades que no pueden alcanzadas por los materiales que los constituyen de manera individual.

Las Figuras 2-3 muestran la microestructura del material compuesto Fe - Polímero.

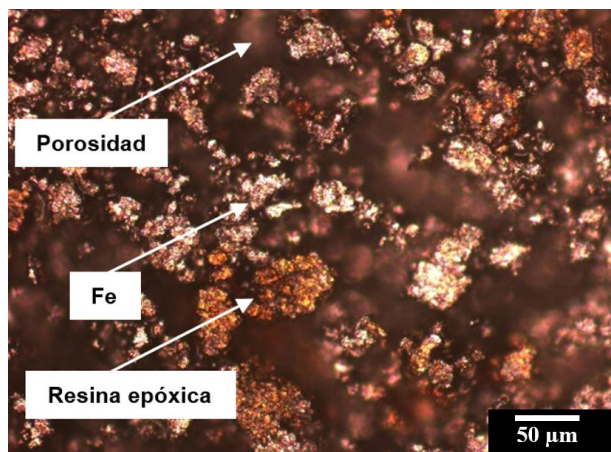


Figura 2. Material compuesto Fe – Polímero. Imagen obtenida a 20X. Fuente: Elaboración propia

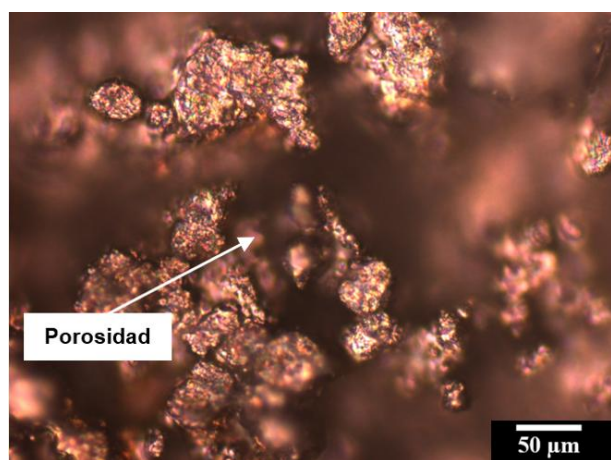


Figura 3. Material compuesto Fe – Polímero. Imagen obtenida a 50X. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 es posible observar lagunas de las partículas de Fe cuya superficie se encuentra libre de resina epóxica debido al lijado realizado durante la preparación metalográfica. También es posible observar superficies con tonalidad naranja las cuales corresponden a la resina epóxica que forma un recubrimiento en la superficie de las partículas metálicas. Las Figuras 2-3 muestran la presencia de porosidad en el material. De acuerdo a Randall (Randall, 1994), la forma de las partículas es resultado de la técnica usada para la

obtención de polvos para su obtención. Las partículas esféricas son obtenidas mediante la técnica de atomización por gas y las partículas con morfología irregular son obtenidas mediante la técnica de atomización por agua. Esta última corresponde a la forma de las partículas del polvo usado para la síntesis del material compuesto. Sin embargo, las partículas no presentan de óxido en su superficie, esto debió a que son procesadas mediante reducción química durante su producción.

La Figura 4 muestra el comportamiento eléctrico del material compuesto cuando una corriente eléctrica alterna pasa a través del mismo.

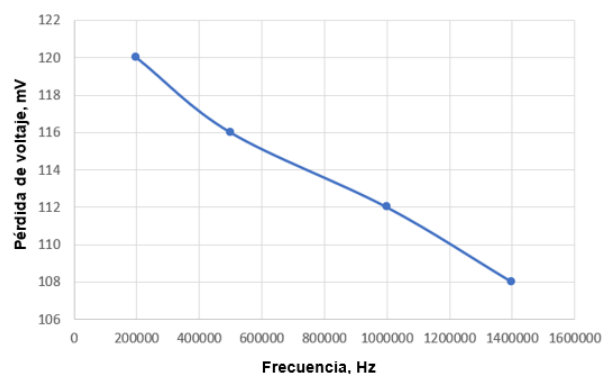


Figura 4. Caída de voltaje vs Frecuencia. Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar que la caída de voltaje es mayor a una frecuencia de 200 kHz a un voltaje de 120 mV. Por otra parte, para una frecuencia de 1.4 MHz la caída de voltaje es de 108 mV, por lo tanto, la caída de voltaje es menor a mayor frecuencia. La Figura 5 muestra las señales analizadas en la pantalla del osciloscopio que fue usado para determinar las caídas de tensión. La señal en color amarillo es la señal de referencia correspondiente al canal 1 en color amarillo y la señal de salida que resulta al pasar por el material en color azul que corresponde al canal 2 del osciloscopio.

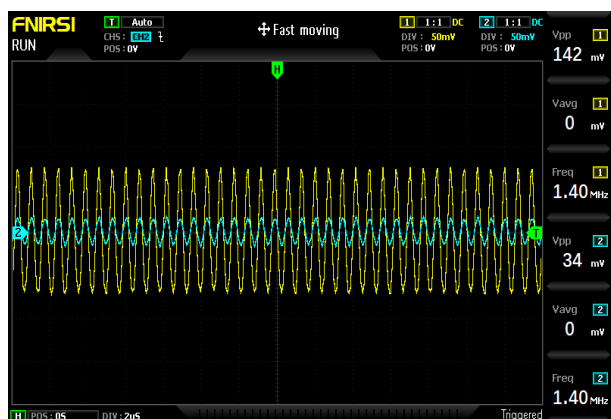


Figura 5. Caída de tensión a 1.4 MHz. Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar la frecuencia en valores superiores a 1.4 MHz el material deja de responder y la señal de salida queda interrumpida, esto es debido a que el material deja de comportarse como un capacitor y comienza a actuar como una bobina; esto al alcanzar su frecuencia de resonancia propia. Por lo tanto, este fenómeno bloquea el paso de señales de alta frecuencia al generarse corrientes parásitas o corrientes de Eddy.

Por esto, son incrementadas las caídas de tensión; cuando la señal alcanza 1.4 MHz la diferencia de voltaje entre la señal de entrada y salida al material compuesto es de 108 mV, por lo tanto, una caída de tensión del 76.05%. Potencialmente material estudiado podría ser usado como concentrador de campo magnético ya que los equipos para calentamiento por inducción trabajan en un rango de frecuencias entre 1 kHz a 400 kHz, que de acuerdo a Figura 3, la caída de tensión a 400 kHz correspondería a 17 mV (17.6%). Es importante que el material que el material se mantenga a una temperatura que no supere 80 °C (353.15 K) ya que en valores superiores se promueve la degradación de la resina epóxica.

Conclusiones

Fue posible realizar la síntesis del material compuesto Fe – Polímero mediante la técnica de compactación uniaxial al aplicar un esfuerzo de compactación de 128 kPa de acuerdo al tamaño de partícula del polvo de hierro y la cantidad de resina epóxica para la consolidación de una muestra cilíndrica. También, determinar algunos valores de propiedades eléctricas del material estudiado y observar la microestructura del mismo e identificar la fase matriz, refuerzo y porosidad. El material estudiado presenta una porosidad de 56%. Finalmente, fue posible

determinar la caída de voltaje en el material en función de la frecuencia la señal eléctrica suministrada y la frecuencia máxima de trabajo. Potencialmente, el material compuesto podría ser usado como concentrador de energía magnética debido a que puede operar en el rango de frecuencias de trabajo de los equipos de calentamiento por inducción magnética.

Referencias

- Concentradores de campo magnético. (s/f). DACPOL. Recuperado el 17 de agosto de 2026, de <https://www.dacpol.eu/es/magnetic-field-concentrators-180/product/concentradores-de-campo-magnetico>
- Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods, and applications". Ed. Society of manufacturing engineers. (s/f).
- German, R. M. (1994). Powder Metallurgy Science (2a ed.). Metal Powder Industries Federation.
- Hanejko, F. G., & Phan, H. G. (1996). Powder metallurgy materials for AC magnetic applications. En PM TEC.
- López, J. E. (2006). Muñoz Marí y G. Camps Valls.
- Shokrollahi, H., & Janghorban, K. (2007). Soft magnetic composite materials (SMCs). Journal of Materials Processing Technology, 189(1–3), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034>
- Verduzco, J. A., Borja, C. E., López, V. H., Olmos, L. R., Betancourt, J. I., & Figueroa, I. A. (2017). Magnetic properties of metal - polymer composites for ac applications at high frequencies. Journal of the Mexican Chemical Society, 60(2). <https://doi.org/10.29356/jmcs.v60i2.73>