

## Materiales compuestos Fe - Polímero obtenidos mediante compactación uniaxial para la concentración del flujo magnético en procesos de calentamiento por inducción

### Composite materials Fe - Polymer obtained by uniaxial compaction for the magnetic flux concentration in induction heating processes

*Carlos Ernesto Borja-Soto<sup>a</sup>, José Sergio Pacheco-Cedeño<sup>b</sup>, Justo Fabian Montiel-Hernández<sup>c</sup>, Jorge Alejandro Verduzco-Martínez<sup>d</sup>, Francisco Vapeani Guerra-López<sup>e</sup>*

---

#### Abstract:

The article shows the magnetic and electrical properties of Fe-Polymer composite materials obtained by uniaxial compaction. A compaction die used in the experimental stage was designed and manufactured. The materials obtained are serious candidates to be used as magnetic flux concentrator materials in magnetic induction heating processes given their magnetic and electrical properties.

#### Keywords:

*Powder metallurgy, compaction die, composite materials, magnetic properties, electrical properties, mechanical design*

---

#### Resumen:

El artículo muestra las propiedades magnéticas y eléctricas de materiales compuestos Fe-Polímero obtenidos mediante compactación uniaxial. Fue diseñado y manufacturado un dado de compactación usado en la etapa experimental. Los materiales obtenidos son serios candidatos para ser usados como materiales concentradores de flujo magnético en procesos de calentamiento por inducción magnética, de acuerdo a los valores presentados de permeabilidad magnética, frecuencia de relajación y resistividad eléctrica.

#### Palabras Clave:

*Metalurgia de polvos, dado de compactación, materiales compuestos, propiedades magnéticas, propiedades eléctricas, diseño mecánico*

---

### Introducción

Los procesos de tecnología de polvos han sido usados en la obtención de materiales compuestos, los cuales presentan propiedades que no pueden ser alcanzadas por sus constituyentes en forma individual. Las características de un material obtenido por metalurgia de polvos dependen de las propiedades presentadas por sus constituyentes y la técnica de compactación usada. Las

propiedades más importantes de los materiales metálicos con forma de polvos para ser procesados por metalurgia de polvos son principalmente la forma y distribución de tamaño de partícula, entre otras. Respecto a las técnicas de compactación, estas incluyen a los procesos de compactación uniaxial, biaxial e isostática (Kreidler, 2016). Las técnicas de compactación pueden ser llevadas a cabo en procesos en frío y en caliente, dependiendo de las propiedades finales deseadas en los materiales obtenidos

---

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: [carlos\\_borja@uaeh.edu.mx](mailto:carlos_borja@uaeh.edu.mx)

<sup>b</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-3400-518X>, Email: [sergio\\_pacheco@uaeh.edu.mx](mailto:sergio_pacheco@uaeh.edu.mx)

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-6890-6069>, Email: [justo\\_montiel@uaeh.edu.mx](mailto:justo_montiel@uaeh.edu.mx)

<sup>d</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-5713-9025>, Email: [verduzco@umich.mx](mailto:verduzco@umich.mx)

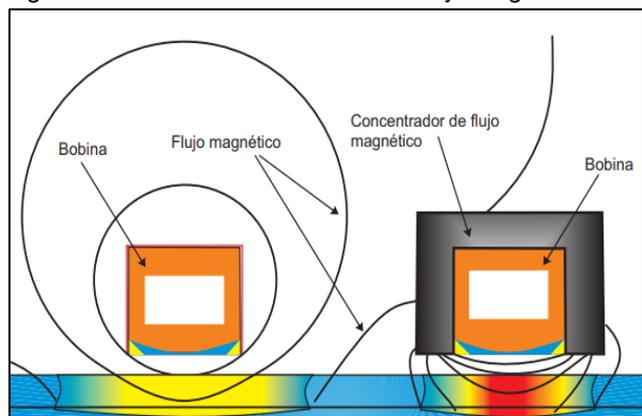
<sup>e</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-5975-286X>, Email: [francisco.guerra@umich.mx](mailto:francisco.guerra@umich.mx)

y las propiedades térmicas de las materias primas procesadas (Askeland, 2017).

Por otra parte, el comportamiento mecánico de los dados de compactación debe ser adecuado para la obtención exitosa de materiales compuestos mediante la aplicación de la carga de compactación. Esta última, queda limitada por la curva de compresibilidad de la materia prima a procesar (Randall, 2005).

Los concentradores de flujo magnético han sido obtenidos mediante pulvimetalurgia para usarse en el proceso de calentamiento por inducción. Dichos dispositivos permiten ahorrar energía cuando el flujo del campo magnético generado por las bobinas de inducción es dirigido hacia el elemento a calentar por medio de materiales concentradores de flujo magnético, tal como muestra la Figura 1 (Heat treat México, 2016). El calentamiento de los materiales mediante inducción magnética es originado por la rotación de los dominios magnéticos del material al interactuar con el campo magnético generado por una bobina al ser energizada mediante corriente alterna de alta frecuencia, de acuerdo a la teoría de dominios magnéticos (Cullity, 2007).

Figura 1. Efecto del concentrador de flujo magnético.



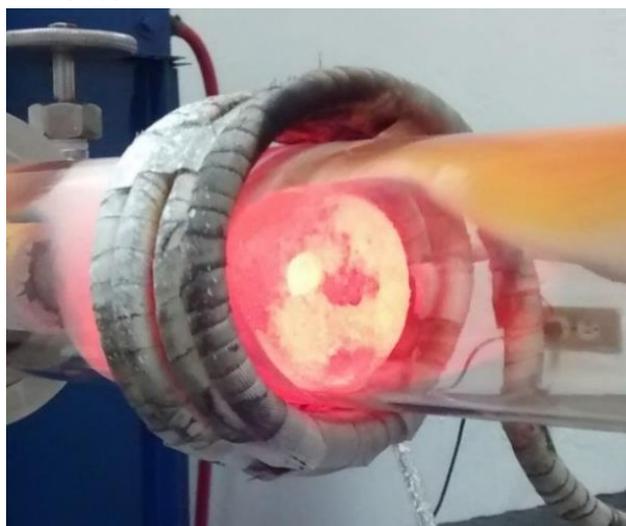
Fuente: Elaboración propia.

La técnica de calentamiento por inducción ha sido ampliamente usada en los procesos de tratamiento térmico, procesos de deformación en caliente, unión de materiales y fundición, entre otros (EFD induction, 2022). También ha sido usada para realizar uniones "brazing" de materiales metálicos en atmósfera controlada, tal como es mostrado en la Figura 2. Los componentes utilizados en la obtención de concentradores de flujo magnético son metales y polímeros; Fe, Ni y Co (polvos finos con tamaño de partícula que van desde la escala nanométrica hasta micrométrica) y resinas termoplásticas. La forma de las partículas depende de la ruta para obtención de polvos; estas incluyen procesos de molienda mecánica y atomización (Randall, 2005). Los metales pueden aportar

alta permeabilidad magnética hasta en valores próximos a 500; temperaturas de Curie por encima de 200 °C y coercitividad magnética por debajo de 50 Oe. Las resinas epóxicas ofrecen una alta resistividad por ser aislantes eléctricos (Borja, 2012).

Cualitativamente, los concentradores de flujo magnético deben de ser susceptibles a los campos magnéticos y tener alta resistividad eléctrica para reducir las corrientes parásitas (Verduzco, 2016).

Figura 2. Horno de inducción magnética con atmósfera controlada.



Fuente: Elaboración propia.

El presente trabajo describe una ruta para la obtención de materiales compuestos Fe-polímero mediante metalurgia de polvos a partir de partículas de Fe y resina epóxica. Las propiedades magnéticas y eléctricas son discutidas en términos de la magnitud de esfuerzo aplicado en la etapa de compactación. El documento, también contiene la información relacionada al diseño y la simulación del comportamiento mecánico del punzón del dado de compactación que fue usado en el trabajo experimental.

## Metodología

### Síntesis de materiales compuestos Fe-Polímero

Fueron usados polvos de Fe de alta pureza ( $\geq 99\%$ ) Sigma - Aldrich con tamaño promedio de partícula esférica de 7  $\mu\text{m}$  y resina epóxica Araldite EPN 1139. Los materiales fueron mezclados con un lápiz ultrasónico en un vaso de precipitados (pírex) de acuerdo a las cantidades indicadas en la Tabla 1. Fue agregado 1 mL de acetona para lograr el mezclado completo de los polvos y la resina. Los materiales fueron dejados en reposo por 20 minutos

para permitir la evaporación de la acetona y después fueron compactados uniaxialmente en un dado de compactación que fue diseñado y manufacturado para dicho propósito. Los valores de los esfuerzos aplicados al material para la obtención de los materiales compósitos fueron establecidos en función de la curva de compresibilidad del material Fe-Polímero en 1.5, 3.1, 4.6, 6.2, 7.9 y 9.1 MPa. Las características geométricas del dado de compactación fueron establecidas para obtener anillos cilíndricos con diámetro interior,  $\Phi_{int} = 17.5$  mm, diámetro exterior,  $\Phi_{ext} = 20$  mm y altura  $h \geq 3$  mm. Las muestras fueron colocadas en un desecador durante 24 horas para asegurar el curado de la resina epóxica y que el material alcanzara sus propiedades finales. También, fue realizado un análisis de la resina mediante termogravimetría, TGA, en un equipo marca TA.

Tabla 1. Materias primas

Resina (g)	Catalizador (g)	% peso Fe	Fe (g)
0.156	0.084	94	3.76

Posteriormente, la altura de los anillos fue calibrada a  $h = 3$  mm, mediante el uso de un torno paralelo y un esmerilador con disco abrasivo de corte. Los anillos fueron devanados con alambre de Cu para la realización de ensayos de caracterización magnética en un analizador de impedancias marca Agilent, los resultados fueron usados para determinar los valores de permeabilidad magnética ( $\mu$ ) y la frecuencia de relajación ( $\omega_{rel}$ ) de los materiales obtenidos. Finalmente, los materiales fueron analizados en un circuito de corriente directa (cd) para determinar su resistividad eléctrica.

#### Diseño y manufactura del dado de compactación

El diseño y simulación de esfuerzos del dado de compactación fue llevado a cabo en el programa informático Solidworks versión 2016. La simulación de esfuerzos fue realizada al punzón del dado de compactación al ser la pieza más susceptible a falla mecánica por ser la pieza que transfiere la carga mecánica al material y tener el espesor de pared más delgado. La simulación de esfuerzos fue realizada en el programa informático mencionado anteriormente. En el diseño del dado de compactación y la simulación de esfuerzos del punzón fueron realizadas al considerar al acero AISI D3 tratado térmicamente con una dureza de 62 HRC. Después de determinar el diseño del dado de compactación y la simulación de esfuerzos en el punzón; el dado fue manufacturado mediante procesos de remoción de material, tratado térmicamente, ajustado dimensionalmente mediante el uso de abrasivos y finalmente, usado para la obtención de materiales

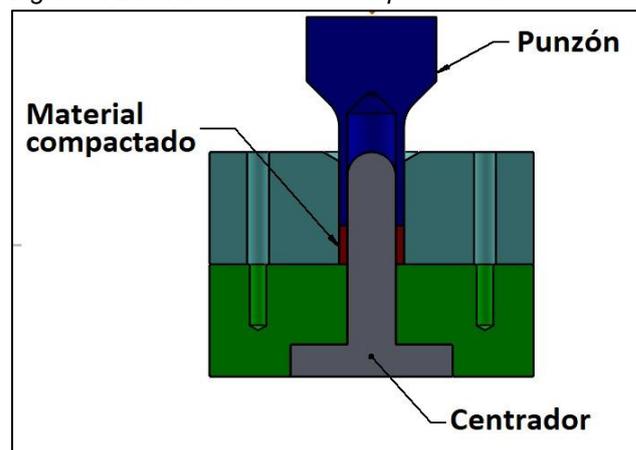
compuestos metal – polímero. La simulación del comportamiento mecánico del punzón fue llevada a cabo a temperatura ambiente (25°C), ya que la degradación de la resina Araldite inicia a la temperatura de 80°C de acuerdo al análisis térmico gravimétrico de la resina Araldite EPN 1139. Por lo tanto, un proceso de compactación en frío para preservar las propiedades de la resina.

#### Análisis y discusión de los resultados

##### Diseño y fabricación del dado

La Figura 3 muestra las características geométricas del dado de compactación uniaxial, el cual está constituido por 4 piezas. El centrador fue implementado para asegurar el centrado del punzón y generar el diámetro interior en las piezas obtenidas por la compactación uniaxial.

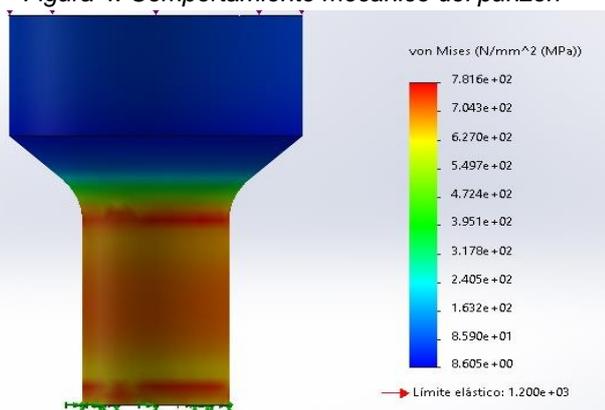
Figura 3. Diseño del dado de compactación.



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4 muestra el comportamiento mecánico del punzón del dado de compactación por ser la parte más crítica, esto porque tiene paredes delgadas y ser elemento principal para la transferencia de carga mecánica al material a procesar y la matriz del dado.

Figura 4. Comportamiento mecánico del punzón



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al criterio de Von Mises, la estabilidad mecánica del dado es conservada para cargas  $\leq 9.8$  kN. Debido a que los esfuerzos máximos en el punzón corresponden a 781.6 MPa, los cuales no superan el límite elástico del material, 1200 MPa.

La Figura 5 muestra el dado de compactación obtenido mediante procesos de remoción de material que incluyen operaciones de torneado, barrenado, roscado y rectificado con abrasivos en las superficies de contacto entre el punzón y la matriz del dado de compactación. El dado de compactación manufacturado mostró estabilidad mecánica al ser expuesto a las cargas mecánicas uniaxiales establecidas para el trabajo experimental.

Figura 5. Dado de compactación uniaxial

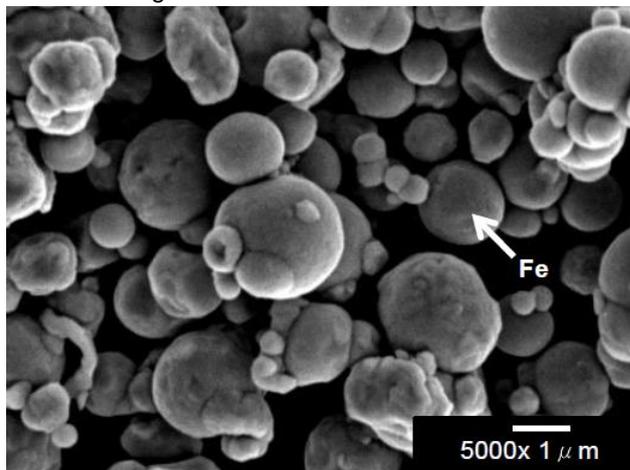


Fuente: Elaboración propia

La Figura 6 muestra las partículas del polvo de Fe, la forma de estas indica que fueron obtenidas por la técnica de atomización con gas. Cabe mencionar que los polvos

presentan una distribución de tamaños de partícula en un rango de 0.4 – 60  $\mu\text{m}$ .

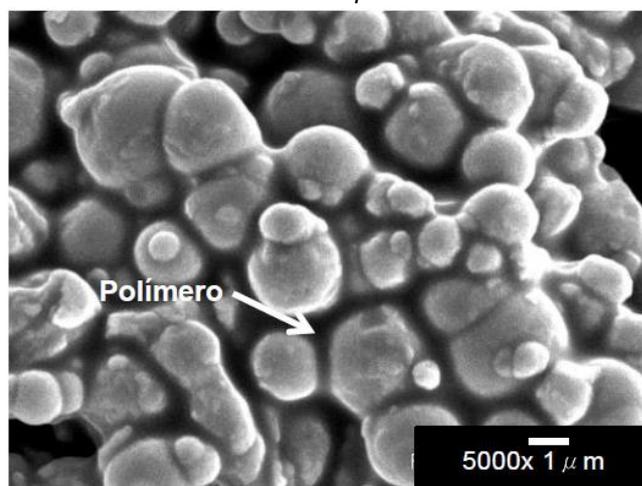
Figura 6. Partículas esféricas de Fe



Fuente: Elaboración propia

La Figura 7 muestra partículas metálicas de Fe cubiertas por la resina Ardite EPN 1139 antes de ser compactadas mediante el dado de compactación mostrado en la figura 5.

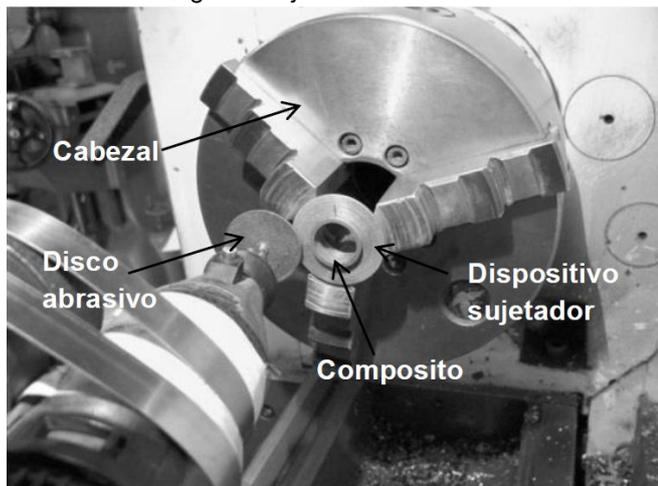
Figura 7. Partículas de Fe 7  $\mu\text{m}$  en promedio embebidas en resina epóxica



Fuente: Elaboración propia

La Figura 8 muestra el maquinado que fue realizado para el ajuste a 3 mm en la altura de los materiales compuestos, el cual fue llevado a cabo después del curado de la resina epóxica.

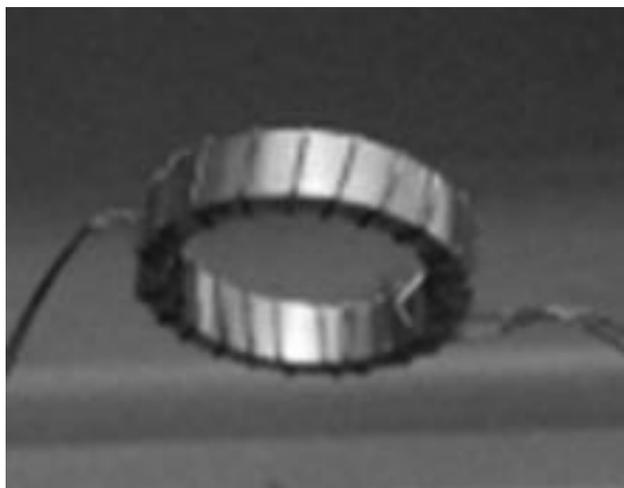
Figura 8. Ajuste dimensional



Fuente: Elaboración propia

La Figura 9 muestra una pieza de material compuesto con forma de anillo cilíndrico que fue devanado para la determinación de propiedades magnéticas en el analizador de impedancias. Los anillos fueron obtenidos con regularidad geométrica y libres de oxidación.

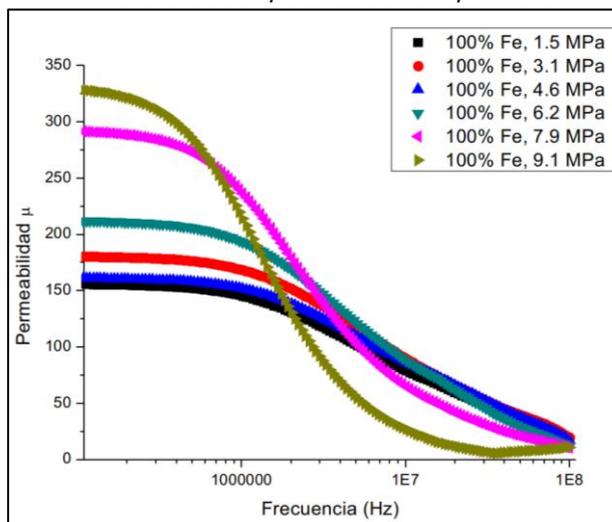
Figura 9. Anillo cilíndrico de material compuesto Fe – Polímero



Fuente: Elaboración propia

La Figura 10 muestra los valores de permeabilidad magnética de materiales compuestos de matriz polimérica. Las magnitudes de la permeabilidad magnética inicial son obtenidas a bajas frecuencias y los valores más bajos de esfuerzo de compactación en la síntesis de los materiales obtenidos en el presente trabajo.

Figura 10. Permeabilidad magnética vs frecuencia en materiales compuestos de Fe – polímero

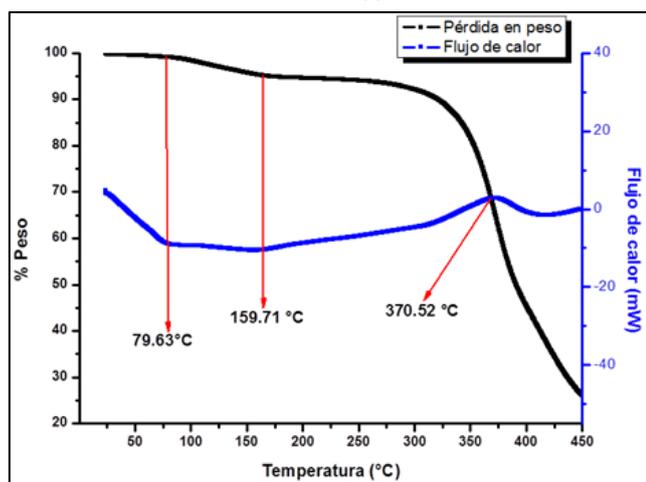


Fuente: Elaboración propia

A bajas frecuencias el material obtenido a 9.1 MPa tiene la permeabilidad más alta  $\mu = 360$ . La frecuencia de relajación ( $\mu = 0$ ) ocurre a 100 MHz en todos los materiales obtenidos con esfuerzos  $\leq 7.9$  MPa, aproximadamente. En el caso del material compuesto obtenido a 9.1 el valor de la frecuencia de relajación ocurre antes de 100 MHz,  $\omega_{rel} = 55$  MHz. De acuerdo a lo anterior, los materiales obtenidos con esfuerzos  $\leq 7.9$  MPa, pueden funcionar a mayores frecuencias en comparación al material obtenido a 9.1 MPa. El valor de resistividad eléctrica más alto fue  $R = 200$  k $\Omega$ m, el cual fue medido en el material compuesto obtenido a 1.6 MPa. Por otra parte, un valor de resistividad de  $R = 75$  k $\Omega$ m corresponde al material obtenido a 9.1 MPa. De acuerdo a la ruta de síntesis, las propiedades magnéticas y eléctricas de los composites pueden ser controladas a través de la magnitud de esfuerzo aplicado en la etapa de compactación, lo cual es importante para el diseño de materiales compuestos con propiedades magnéticas específicas. Villaseñor (2006) 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 Fe y Ni con tamaño de partícula de 10  $\mu$ m y resina epóxica. Dicho investigador, uso 3% en peso de polímero y una relación de Fe y Ni de 1:1. Obtuvo de pastillas cilíndricas de 20 mm de diámetro mediante un dado metálico y barrenado en torno paralelo. El valor máximo de  $\mu$  en un material Fe – Ni – Polímero, obtenido en compactación uniaxial de 936 kPa fue de  $\mu = 449$  y una resistividad,  $R = 1.22$   $\Omega$ m. Sin embargo, a pesar de presentar alta

permeabilidad magnética; el bajo valor de resistividad eléctrica del material lo hace susceptible a incrementos de temperatura por corrientes parásitas y por consiguiente la degradación de la resina termoestable. Por lo tanto, resulta necesario que en los materiales compuestos metal – polímero permanezcan a temperaturas menores a 80°C, debido a que la velocidad en la degradación de la resina se incrementa con el aumento de temperatura, esto de acuerdo a la pérdida en peso respecto a la temperatura de la resina indicado en los resultados del análisis termogravimétrico mostrado en la Figura 11.

Figura 11. Análisis térmico, TGA, de la resina Araldite EPN 1139



Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

Fue posible la obtención y caracterización de materiales compuestos Fe – Polímero. El funcionamiento del dado de compactación que fue manufacturado mostró estabilidad mecánica durante su uso y resultó adecuado para la obtención de composites Fe – Polímero, esto de acuerdo al diseño y el comportamiento mecánico del punzón. Los valores de las propiedades magnéticas y eléctricas de los materiales obtenidos tienen aplicación potencial como concentradores de flujo magnético en bobinas energizadas a bajas y altas frecuencias para su uso en procesos de calentamiento por inducción.

## Referencias

Askeland D.R., Wendelin J.W. (2017) Science and engineering of materials, 7 Ed. Cengage Learning.

Borja, C.E. (2012). Propiedades eléctricas y magnéticas de composites de matriz polimérica Fe-Polímero (Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo [Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales] Michoacán, México).

Cullity B.D., Graham C.D. (2007) Introduction to magnetic materials, Wiley.

EFD Induction (2022). <https://www.efd-induction.com/>

Heat treat México (2016).

<https://www.asminternational.org/documents/10192/26880189/DIAZ+-+ASM+Mexico+2016+Presentacion+-+Fluxtrol.pdf/03d6d175-90d4-4f85-b3a1-6c2a2fff4828>

Kreidler. Martín A.M., Oliveira Jr., Osmir B. (2016) Influencia del tipo de sinterización en bloques cerámicos para Cad-Cam Odovtos. International journal of dental Sciences, 8, 91-98.

Randall, M. G. (2005) Powder metallurgy and particulate materials processing. Metal powder industry.

Verduzco, J. A., Borja, C. E., López, V. H., Olmos, L. R., Betancourt, J. I., Figueroa, I. A. (2016) Magnetic properties of metal-polymer composites for ac applications at high frequencies. Journal of the Mexican Chemical Society, 60, 58-61.

Villaseñor J.C. (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 (Tesis de licenciatura [Instituto Tecnológico de Morelia] Michoacán, México).