

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRIA EN INGENIERÍA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES**



**CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE UN  
MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ EPOXICA REFORZADO  
CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

**Tesis para optar el grado académico de:  
Magister en Ingeniería y Ciencia de los Materiales**

**Presentado por:  
José Enrique Farfán Lira**

**Asesor:  
Dr. Ing. Paul Lean Sifuentes**

**Jurado:  
Msg. Ing. Aníbal Rozas Gallegos  
Dr. Ing. Julio Acosta Sullcahuaman**

**Lima-Perú**

**2017**

## RESUMEN

La electricidad es uno de los pilares en los que se cimienta la sociedad actual, principalmente por la alta eficiencia obtenida en el transporte de esta energía, lo que permite su reparto y utilización en lugares lejanos a la fuente. Las máquinas eléctricas forman parte importante de esta realidad, pues permiten la transformación de esta energía en movimiento, lo cual se utiliza en diversos aspectos desde los electrodomésticos hasta los motores industriales, todos ellos combinan fenómenos electromagnéticos y hacen uso de materiales conductores de campo eléctrico y magnético para su funcionamiento. El presente trabajo se ubica en el campo de los materiales magnéticos y pretende iniciar la investigación de nuevos materiales compuestos para aplicaciones magnéticas, en la intención de reemplazar a los aceros eléctricos usados tradicionalmente en la fabricación de máquinas eléctricas; ampliando las aplicaciones de alta frecuencia de éstos materiales compuestos, tales como: servomotores, bocinas, grabadores magnéticos, aisladores de ondas electromagnéticas y otros.

El objetivo principal del presente trabajo es elaborar y caracterizar un material compuesto de matriz epóxica reforzada con partículas magnéticas para determinar la relación entre sus propiedades magnéticas y la proporción de sus constituyentes.

Según la metodología planteada, inicialmente se han fabricado probetas toroidales de material compuesto mediante aglomeración, variando las proporciones de sus constituyentes. Seguidamente se ha realizado la caracterización de estos materiales, principalmente con el propósito de determinar sus propiedades magnéticas, de modo indirecto, mediante el efecto que tienen dichas propiedades sobre los parámetros eléctricos: tensión y corriente; utilizando un circuito de prueba según la norma ASTM A927.

Como resultado de esta investigación, se logró elaborar y caracterizar materiales compuestos de matriz epóxica variando la proporción de partículas magnéticas como refuerzo en el rango de 14.5% a 29.8% en volumen. El material con 29.8% de refuerzo, correspondiente a la máxima composición en volumen obtenida en el presente trabajo, presenta las mejores propiedades magnéticas: 2.84 de permeabilidad relativa y 90.5 J/m<sup>3</sup> de pérdidas específicas.

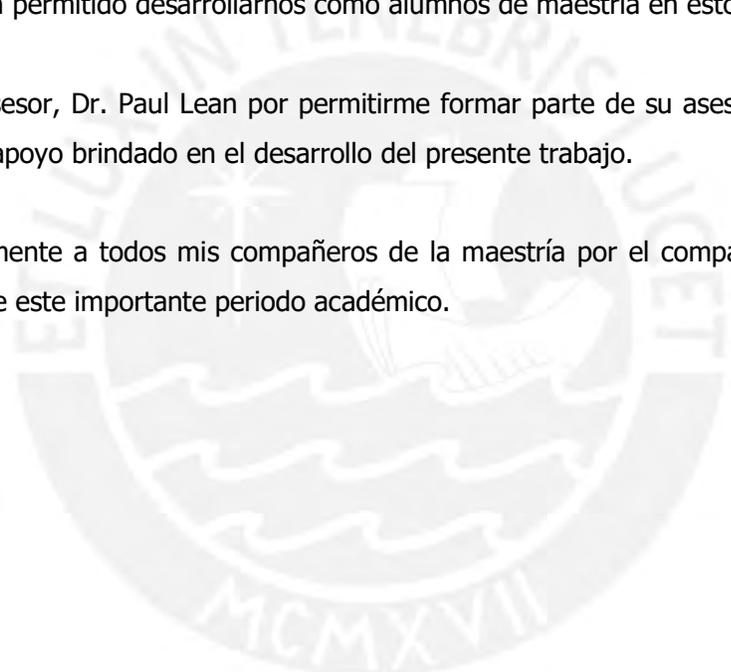
## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco profundamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) por las oportunidades de estudio que viene brindado a muchos jóvenes como yo, generando así valiosos recursos humanos que de seguro serán un gran aporte al desarrollo de nuestro país. Así mismo al convenio de gestión N° 029-2015-FONDECYT por permitirme realizar estudios de maestría en una de las mejores universidades del Perú.

A la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) por brindarnos los conocimientos entregados por su gran plana docente, así como de los laboratorios e infraestructura que nos han permitido desarrollarnos como alumnos de maestría en estos 2 años de estudios.

A mi asesor, Dr. Paul Lean por permitirme formar parte de su asesorado, así como de la guía y apoyo brindado en el desarrollo del presente trabajo.

Y finalmente a todos mis compañeros de la maestría por el compañerismo ofrecido a lo largo de este importante periodo académico.



## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. ESTADO DEL ARTE</b> .....	4
<b>1.1 Circuitos eléctricos y magnéticos</b> .....	5
<b>1.2 Constituyentes de un SMC</b> .....	6
1.2.1 El refuerzo.....	6
1.2.2 El recubrimiento.....	8
1.2.3 Fabricación de SMC.....	9
<b>1.3 Magnetización y leyes de electromagnetismo</b> .....	12
1.3.1 Inducción magnética y ley de Faraday.....	12
1.3.2 intensidad de campo magnético y la ley de Ampere.....	13
<b>1.4 Distorsión armónica total (THD)</b> .....	14
<b>1.5 Entrehierro y reluctancia</b> .....	14
<b>1.6 Pérdidas en materiales magnéticos</b> .....	16
1.6.1 Pérdidas totales.....	17
1.6.2 Pérdidas por histéresis $P_{ist}$ .....	18
1.6.3 Pérdidas por corrientes parásitas $P_{par}$ .....	18
1.6.4 Pérdidas en exceso $P_{exc}$ .....	19
<b>2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL:</b> .....	20
<b>2.1 Estudios preliminares</b> .....	20
2.1.1 Fabricación de probetas.....	20
2.1.2 Pruebas.....	22
<b>2.2 Materiales</b> .....	22
2.2.1 Refuerzo.....	22
2.2.2 Carga.....	23
2.2.3 Matriz.....	24
<b>2.3 Fabricación de probetas</b> .....	25
2.3.1 Dimensiones de las probetas.....	26
2.3.2 Preparación del molde.....	27
2.3.3 Realización de mezcla.....	28
<b>2.4 Caracterización no magnética de probetas</b> .....	28
2.4.1 Dimensiones finales.....	28
2.4.2 Distribución de refuerzo (SEM).....	29
<b>2.5 Caracterización de flujo eléctrico y magnético en las probetas</b> .....	29

2.5.1	Descripción del circuito de la norma .....	31
2.5.2	Descripción del circuito de prueba .....	32
<b>2.6</b>	<b>Metodología de cálculo de magnetización y pérdidas específicas .....</b>	<b>34</b>
2.6.1	Series de Riemann .....	34
2.6.2	Eliminación de ruido .....	35
2.6.3	Cálculo de parámetros de magnetización .....	36
2.6.4	Cálculo de pérdidas específicas .....	36
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Estudios Preliminares .....</b>	<b>39</b>
3.1.1	Resultados.....	39
3.1.2	Observaciones .....	45
<b>3.2</b>	<b>Análisis de imágenes SEM .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Descripción de flujo eléctrico y magnético .....</b>	<b>50</b>
3.3.1	Presentación de Tensión inducida en el secundario e Inducción Magnética	50
3.3.2	Presentación de Intensidad de corriente en el primario e Intensidad de campo magnético.....	52
3.3.3	Valores máximos de las magnitudes del flujo eléctrico y magnético.....	53
<b>3.4</b>	<b>Caracterización magnética.....</b>	<b>56</b>
3.4.1	Lazos de histéresis.....	56
3.4.2	Saturación del material .....	58
3.4.3	Remanencia y coercitividad.....	59
3.4.4	Curva de magnetización AC.....	60
3.4.5	Permeabilidad .....	61
3.4.6	El entrehierro y la reluctancia .....	63
<b>3.5</b>	<b>Pérdidas específicas .....</b>	<b>63</b>
3.5.1	Separación de pérdidas.....	64
<b>3.6</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>67</b>
3.6.1	Análisis de permeabilidad .....	67
3.6.2	Análisis de pérdidas específicas.....	68
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>70</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>71</b>

## INTRODUCCIÓN

Los SMC son materiales compuestos conformados por un refuerzo de propiedades magnéticas apreciables y una matriz de materiales con propiedades dieléctricas y en muchos casos magnéticamente despreciables. Estos han encontrado un nicho en aplicaciones de altas frecuencias gracias a la estabilidad de sus propiedades magnéticas en estas condiciones, en contraste con los materiales magnéticos más difundidos llamados aceros eléctricos cuyas propiedades desmejoran ante estas altas frecuencias, quedando relegado su uso a la fabricación de máquinas eléctricas, ver *Figura 1*.

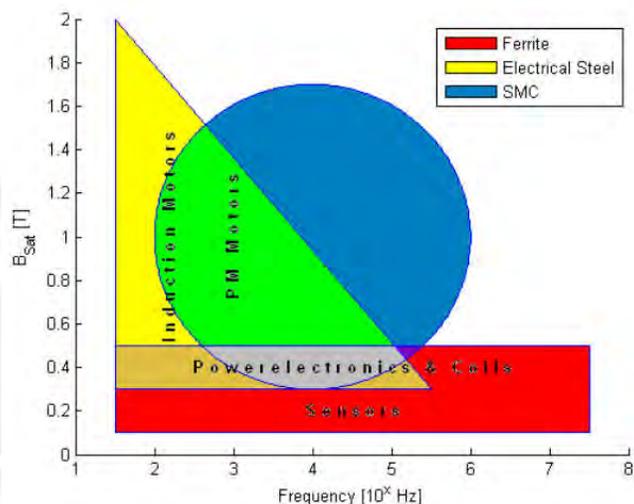


Figura 1: Aplicación de materiales magnéticos según la inducción de saturación ( $B_{sat}$ ) y la frecuencia (*Boehm & Hahn, 2012*)

Las bases teóricas de la interacción electromagnética en los SMC están desarrolladas en su plenitud, siendo muchas de ellas derivadas de los estudios clásicos del electromagnetismo, actualmente las investigaciones en los SMC se encuentra en una fase de desarrollo y mejora continua tanto en la selección y procesamiento de los insumos utilizados como en los procesos de fabricación para optimizar sus características favorables en su actual rango de acción y con la esperanza de disminuir las características desventajosas, o anularlas y aprovechar sus ventajas como su isotropía magnética, su fabricación por métodos de pulvimetalurgia o métodos de conformado de plásticos y materiales compuestos que permiten una alta producción de piezas con formas muy diversas y con mínima merma, entre otros.

El ritmo de publicación de textos científicos presenta un aumento sostenido (ligeramente amortiguado en estos últimos dos años) según se puede observar en la Figura 2. La revista indexada más estrechamente relacionada con en este tipo de investigaciones es el Magnetism And Magnetic Materials de Elsevier siendo sus principales ponentes en el campo de los SMC, Kollar de la Solovak Academy of Science, Shokrollahi de la Shizaz University en Iran, Mattei de la Universidad de

Bretagne Occidentale en Francia y Chen Wu de la Zhejiang University y Yuandong Peng de la Central South University ambas en China, entre otros. Actualmente las publicaciones científicas en este campo se encuentran orientadas a la mejora de procesos de fabricación y la mejor selección y procesamiento de los insumos del material compuesto, lo que permite confiar en que hay muchas particularidades por estudiar dentro de los SMC en el campo de la innovación, siempre a la par de nuevos procesos que garanticen mejoras en la permeabilidad magnética de los insumos y en la resistencia de la matriz a altas temperaturas.

En el Perú, donde se desarrolla el presente trabajo, no existe un precedente en el estudio de materiales magnéticos compuestos, ni en la fabricación de SMC ni de la caracterización de los mismos por ello es entendible que, para iniciar algo nuevo es necesario hacerlo desde algo sencillo y confiable, que requiera una pequeña inversión y permita un bajo costo de reprocesos, en caso de haberlos, además de permitir el uso de equipos flexibles necesarios para observar un panorama completo del fenómeno y posteriormente justificar la adquisición de equipos especializados. Tomando estas características en consideración la presente experiencia inicia un camino adicional dentro del estudio de los materiales compuestos en la maestría de materiales de la Pontificia Universidad Católica de Perú, en donde, si bien la ejecución de la experiencia resulta sencilla en la fabricación de las probetas de material compuesto; los conceptos empleados, las conclusiones obtenidas y sobre todo las pruebas realizadas han de servir como base para investigar nuevos materiales compuestos realizados mediante otros métodos de fabricación y otros insumos que permitan mejorar la permeabilidad magnética efectiva del material hasta alcanzar valores cercanos a los valores teóricos del refuerzo, la minimización de sus pérdidas, la disminución de la conductividad eléctrica del material y el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, tal como se realiza en las investigaciones actuales de otras instituciones.

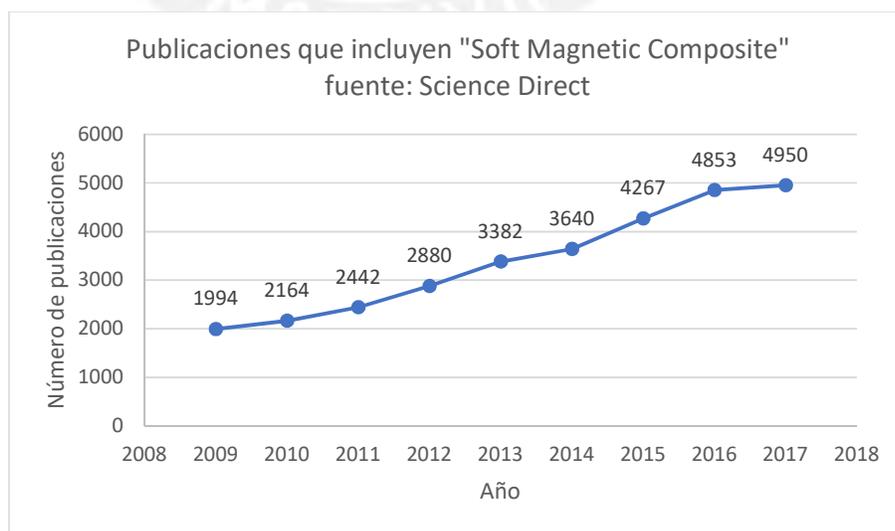
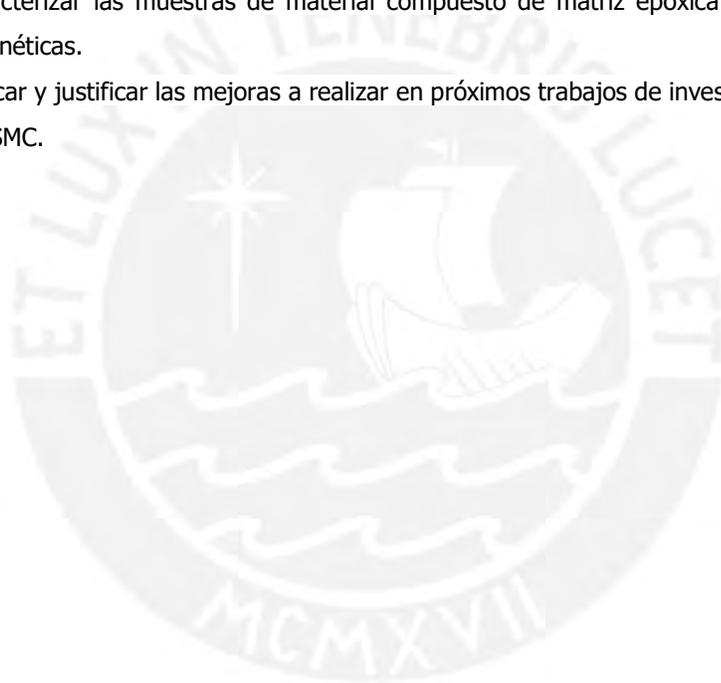


Figura 2: Publicaciones en los últimos años

El objetivo principal del presente trabajo es elaborar y caracterizar un material compuesto de matriz epóxica reforzada con partículas magnéticas para determinar la relación entre sus propiedades magnéticas y la proporción de sus constituyentes.

Para este fin se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Fabricar muestras de forma toroidal mediante la aglomeración de refuerzo y carga cerámica con una matriz polimérica continua, tal que la concentración de refuerzo siga una progresión regular; de tal modo que permita una línea base para futuros trabajos con SMC.
- Establecer un procedimiento de prueba basado en la norma ASTM A927 que permita obtener las propiedades magnéticas de los cuerpos analizados.
- Caracterizar las muestras de material compuesto de matriz epóxica reforzada con partículas magnéticas.
- Indicar y justificar las mejoras a realizar en próximos trabajos de investigación relacionados con los SMC.



## 1. ESTADO DEL ARTE

Los principales hitos dentro de los estudios de SMC (*soft magnetic composite*) incluyen en primer lugar los tempranos estudios realizados por el francés Jean Luc Mattei *et al*, quienes realizaron estudios para comprobar la aplicación de la teoría de medios efectivos desarrollada por Bruggeman (Bruggeman, 1935) y expandida por Landauer (Landauer, 1952), al campo del magnetismo. Estos fundamentos habían sido usados para calcular y la resistividad eléctrica de materiales compuestos, con sencillos arreglos debía de servir también para hallar su permeabilidad magnética. Los estudios de este equipo inician a mediados de los años 90 realizando aproximaciones macroscópicas, usando esferas, barras y filamentos de dimensiones milimétricas (Le Floch, et al., 1995) (Mattei, et al., 1996), como refuerzo de cuerpos toroidales a ser probados mediante procedimientos afines al descrito en la norma ASTM A927 (ASTM-A927, 2011), comprobando la existencia del límite de percolación predicha por la teoría mencionada (Mattei, et al., 1995), límite que se encuentra entre el 20 al 40% de concentración de refuerzo dependiendo de su geometría; para luego proseguir con el estudio de materiales compuestos con partículas de refuerzo microscópicas embebidos en polímeros continuos, utilizando la aglomeración y otros métodos similares que no permiten obtener concentraciones de refuerzo superiores al 85% (Anhalt, et al., 2008). Otro equipo investigador importante es el comandado por H. Shokrollahi, de la universidad de Shiraz en Irán cuyo principal aporte fue el aplicar un recubrimiento polimérico sobre las partículas de refuerzo magnético para luego realizar la compactación del conjunto a presiones que permitan la deformación plástica del refuerzo metálico (Shokrollahi & Janghorban, 2006) (Shokrollahi & Janghorban, 2007), esto asegura altas concentraciones de refuerzo, mayores a 90%, con lo que las características magnéticas de los SMC resultantes poseen el mismo orden de magnitud materiales laminados formados por refuerzo magnético, a partir de esta publicación sus trabajos giran en torno a los cambios en las condiciones de recubrimiento, compactación y la utilización de diferentes materiales y procesos para realizar recubrimientos; este método de trabajo fue rápidamente adoptado por diversos investigadores en todo el mundo y actualmente sigue siendo el camino seguir en la formación de materiales SMC (Shokrollahi, 2007), con un especial énfasis en el uso de recubrimiento cerámicos (Taghvaei, et al., 2010). Otro investigador destacado es Peter Kollar, de la universidad de ciencias Slovakia quien con su equipo ha desarrollado diversos documentos científicos buscando la mejora de procesos de fabricación, e insumos con el propósito de mejorar las características magnéticas de los SMC resultantes en incluso en muchos de ellos realiza experimentos que contrastan cálculos teóricos de electromagnetismo (Kollar, et al., 2014) (Dobak, et al., 2017) con su aplicación en casos especiales de SMC ( Taghvaei, et al., 2009)

(Streckova, et al., 2014) y comparaciones entre diversos SMC (Streckova, et al., 2015). Estos dos últimos grupos de investigación siguen vigentes hasta la fecha.

### **1.1 Circuitos eléctricos y magnéticos**

Un concepto común que relaciona muchos procesos dentro de la ingeniería es el de circuito, siendo este un camino trazado previamente que ha de transportar energía eléctrica a través de un portador desde una fuente hasta una carga que utiliza esta energía otorgada para realizar un trabajo. En el electromagnetismo se maneja bastante el concepto de circuito pues existen leyes físicas, compiladas y estudiadas a mayor profundidad por Maxwell, que relacionan fenómenos de circuitos eléctricos donde el portador es el campo eléctrico que pasan a través de un material de alta conductividad eléctrica y circuitos magnéticos, donde el portador es el campo magnético que pasa con facilidad en cuerpos de alta permeabilidad magnética (Staff M.I.T, 1965).

Bajo este concepto de circuito es posible identificar en ellos materiales conductores que deben tener una alta facilidad para el paso del portador en comparación con el medio circundante, estos materiales deben ser eficientes al requerir una mínima pérdida de energía para realizar el transporte. En el caso de los circuitos magnéticos los materiales clásicos para el transporte de campo magnético son los materiales magnéticos suaves, cuya característica principal es la de tener una mínima área interna de lazo de histéresis trayendo como consecuencia una mínima cantidad de pérdidas por fenómenos de histéresis y una menor remanencia magnética del material (Kostenko, 1975).

La sociedad se ha formado en base al uso de la electricidad como principal fuente de energía, esto es porque la eficiencia que presenta el transporte de este tipo de energía otorga la facultad de generarla en lugares lejanos y aprovecharlo en las urbes, es por ello que el desarrollo de la electricidad está por encima del magnetismo considerándose este último una subdivisión del primero dentro del temario de muchos libros y carreras de educación superior, cuando en realidad son ambas caras de una misma moneda, tal que un campo magnético se genera a partir de un campo eléctrico y viceversa.

Lo escrito en el párrafo anterior justifica la caracterización de las propiedades magnéticas de un material a partir de las distorsiones que genera este sobre un circuito eléctrico, es decir se realiza una medición indirecta y existe un procesamiento de datos e interpretación de resultados para obtener las características de permeabilidad, remanencia, coercitividad y otros, esto también se apoya en el mayor desarrollo que tiene la instrumentación para medida de parámetros eléctricos comparado con la utilizada para medir directamente parámetros magnéticos. Es por ello que normas como la ASTM y diversos métodos de medición utilizados en las investigaciones de materiales magnéticos se basan en la formación de dos circuitos eléctricos conectados entre sí por un circuito magnético donde se realizan una conversión de energía de eléctrica a magnética y de magnética a eléctrica comparando las medidas del campo eléctrico inicial y final.

## 1.2 Constituyentes de un SMC

Los Soft Magnetic Composite también llamados SMC son materiales compuestos donde al menos uno de sus constituyentes es un material ferromagnético, que presenta una característica magnética suave, y una matriz aislante denominada por lo general recubrimiento.

La mayoría de los SMC desarrollados actualmente presentan muchas semejanzas entre sí, el refuerzo en casi todos los casos son partículas ferromagnéticas equiaxiales cuyas dimensiones están en el rango de los micrómetros o nanómetros, cuentan con un recubrimiento aislante y son conformadas bajo presión a la forma requerida

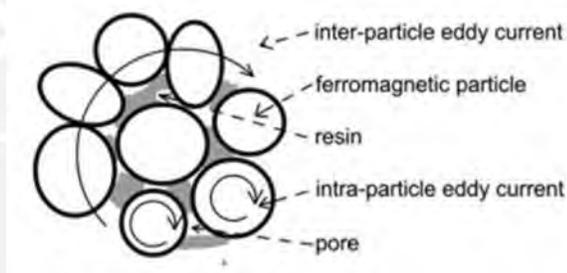
### 1.2.1 El refuerzo

El refuerzo de un SMC está hecho de diversos materiales ferromagnéticos, la mayoría a base de Fe puro (Dobak, et al., 2016) pudiendo estar aleado con Co, Ni y otros elementos que le den mejores características magnéticas como el FeSi que brinda una mayor resistividad al material magnético (Streckova, et al., 2014) u otros como el FeCuNbSiB que tiene una muy alta permeabilidad magnética (Wu, et al., 2016) (Fuzerova, et al., 2013), o aleado con elementos necesarios para poder generar un recubrimiento inorgánico mediante procesos electroquímicos, como en el caso de las aleaciones FeSiAl que permiten un recubrimiento de fosfatos (Huang, et al., 2015) y de SiO<sub>2</sub> (Wang, et al., 2015). Estas partículas microscopias de metal suelen obtenerse mediante diversos procesos, siendo los más comunes la síntesis por aerosol con el que se obtienen partículas prácticamente esféricas (Fan, et al., 2015) (Streckova, et al., 2014) y molienda con los que se obtienen partículas equiaxiales de morfología irregular.

Un tema relacionado a los materiales ferromagnéticos suaves en general es que la permeabilidad varía con la microestructura. Un material suave ideal es el que tiene un lazo de histéresis delgado, con poca coercitividad y de preferencia un alto grado de remanencia, además de una alta permeabilidad que le permite ser un buen conductor de flujo magnético. Para ello es necesario que el metal ferromagnético tenga la mínima cantidad de dislocaciones y límites de granos posibles (es decir granos grandes), pues el flujo magnético pasa con mucha facilidad por la red cristalina pero se le dificulta el paso a través de los defectos, por ello incluso en la fabricación convencional de cuerpos magnéticos a partir del apilamiento de flejes de acero eléctrico, una vez armado el núcleo se realiza un tratamiento térmico con el propósito de aliviar defectos cristalinos generados durante el corte de estos flejes y el armado del núcleo. Es por esto que las partículas de refuerzo de SMC, principalmente las obtenidas mediante molienda, al tener un alto grado de tensiones internas y gran cantidad de dislocaciones, deben pasar por un tratamiento térmico de alivio de tensiones realizado normalmente a temperaturas ente los 550 a 700 °C antes la aplicación del recubrimiento (Shokrollahi, 2007).

Al someter a un material ferromagnético a un campo externo aparecen las corrientes parásitas, representadas esquemáticamente en la Figura 3, que son corrientes circulantes que, según la ley de

Lenz, generan un campo magnético con un efecto contrario al campo que les dio origen, es por ello que este campo se denomina campo desmagnetizante. Este campo es el responsable de la conocida inestabilidad de las propiedades magnéticas de los aceros eléctricos convencionales ante altas frecuencias, pues en altas frecuencias las corrientes parásitas aumentan su valor (Kollar, et al., 2013) y el campo desmagnetizante también, por ello se produce una disminución de la permeabilidad efectiva y una deformación del lazo de histéresis (Kollar, et al., 2015). A bajas frecuencias un valor que influye en la intensidad del campo desmagnetizante es el tamaño de partículas, para estos casos se prefieren partículas de mayor tamaño (Kollar, et al., 2015). Las corrientes parásitas generan pérdidas de potencia en forma de calentamientos indeseados, refuerzos hechos de materiales con mayor resistividad disminuyen también la magnitud de las corrientes parásitas producidas, por ejemplo, las aleaciones de FeSi (Streckova, et al., 2014).



*Figura 3: Corrientes parásitas intergranulares e intragranulares (Kollar, et al., 2013)*

El uso de materiales cerámicos con propiedades magnéticas suaves como refuerzo de un SMC no ha sido muy estudiado debido a que en estos materiales las corrientes parásitas no son un problema ya que son materiales de alta resistividad eléctrica que impide se formen valores notables de corrientes parásitas. Los materiales cerámicos ferromagnéticos a bajas frecuencias, es decir frecuencia industrial, tienen por naturaleza una menor permeabilidad magnética que los materiales ferromagnéticos, pero a altas frecuencias la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos disminuye bastante y el valor de permeabilidad de los materiales cerámicos ferromagnéticos se mantiene casi invariable. En realidad, las SMC se ven como una alternativa para reemplazar a los materiales cerámicos con propiedades magnéticas suaves en aplicaciones de alta frecuencia pues tienen mayor permeabilidad y al tener un menor grado de corrientes parásitas, sus propiedades magnéticas varían muy poco a altas frecuencias, las aplicaciones principales de los materiales cerámicos ferromagnéticos, y donde pueden ser reemplazados por los SMC, son principalmente donde el material debe de conservar sus propiedades magnéticas constantes o con una mínima variación ante un rango de altas frecuencias como por ejemplo jaulas de Faraday e inductancias de filtros de alta frecuencia.

### 1.2.2 El recubrimiento

Los SMC se pueden dividir en dos grupos ampliamente estudiados hasta la actualidad, según la naturaleza del recubrimiento de sus partículas tienen recubrimientos orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos son polímeros y tienen las desventajas propias de los polímeros ( Taghvaei, et al., 2009), no soportan temperaturas mayores a los 200 o 250°C, dependiendo del polímero, y se deforman plásticamente ante esfuerzos externos. Los inorgánicos son materiales cerámicos que soportan altas temperaturas, pero son frágiles ante esfuerzos de tracción e impacto. También se tienen experiencias con combinaciones de ambos tipos de recubrimientos como resinas fenólicas con fosfato de hierro (Tahavaei, et al., 2009) y otros (Taghvaei, et al., 2009) ( Taghvaei, et al., 2009).

La principal ventaja de utilizar partículas ferromagnéticas recubiertas de un material aislante, es que permite una disminución de las corrientes parásitas generadas colateralmente al hacer pasar un campo magnético a través de un metal (los materiales ferromagnéticos suelen ser aleaciones de Fe, Co y Ni), este problema actualmente está controlado para los núcleos magnéticos de las máquinas eléctricas pues estos están conformados por un apilamiento de láminas de metal ferromagnético tal que la circulación de las corrientes parásitas se encuentra supeditada a la periferia de la sección transversal de las láminas con lo que disminuyen la intensidad de éstas corrientes, se debe recordar que las máquinas eléctricas trabajan a bajas frecuencias; en el caso de los SMC las corrientes parásitas solo pueden recorrer la periferia de las micro partículas ferromagnéticas que conforman el refuerzo con lo que se obtendría mínimas corrientes parásitas.

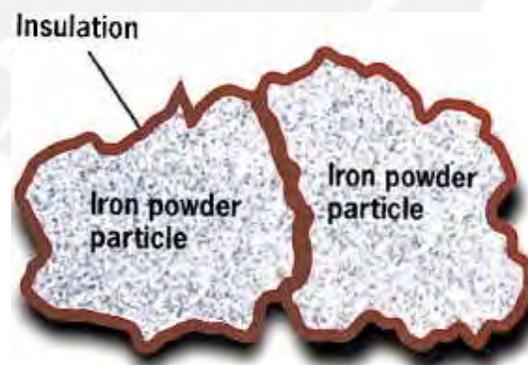
La necesidad de producir cuerpos magnéticos es para que sean el camino conductor del flujo magnético dentro de un circuito magnético, por ello es necesario que tengan una alta permeabilidad magnética, sin embargo, es muy difícil evitar la presencia de entrehierros (Dias, et al., 2013). Los entrehierros son espacios donde no hay material ferromagnético tal que el flujo debe conducirse a través del aire (de naturaleza paramagnética) para poder cerrar el circuito, esto reduce la permeabilidad efectiva del cuerpo magnético. A su vez el entrehierro desplaza la curva de excitación, también llamada de antihistéresis o curva  $B_v s H$  tal que a mayor entrehierro se requiere un mayor valor de intensidad de campo magnético ( $H$ ) para obtener el mismo valor de inducción ( $B$ ), lo mismo ocurre con la inducción de saturación del cuerpo magnético  $B_{sat}$ , también se desplaza, por ello se realizan entrehierros en aplicaciones donde se requiere que la aplicación de un campo intenso no produzca la saturación del cuerpo magnético, esto se da principalmente en núcleos de transformadores de medida y en inductancias empleadas como elemento de control de tensión en sistemas eléctricos. En el caso del SMC el recubrimiento de las partículas de refuerzo es la matriz del material compuesto y actúa como un entrehierro distribuido y al igual que en el caso convencional compromete el punto de saturación del cuerpo magnético y su permeabilidad efectiva, en las aplicaciones actuales se requiere normalmente una mayor permeabilidad por lo que se trata de disminuir la cantidad de matriz.

### 1.2.3 Fabricación de SMC

Una ventaja en la fabricación es que se pueden utilizar procedimientos relacionados a la pulvimetalurgia los cuales permiten la fabricación rápida y económica de productos estandarizados mediante moldes o dados aplicando presión y calor, logrando formas complejas sin maquinado posterior, con mermas reutilizables y un mínimo desperdicio.

Para obtener una mayor permeabilidad se requiere que la distancia entre partícula y partícula de refuerzo sea mínima, esto se logra aplicando un esfuerzo de compresión a un conjunto de partículas recubiertas tal que las partículas y el recubrimiento se deformen y conformen una pieza de densidad aproximadamente igual a la del refuerzo como en la Figura 4, o hasta llegar a un punto donde con mayores esfuerzos se consigan mínimos aumentos en la densidad. Este hecho tiene dos problemas:

El primer problema es que al deformar plásticamente las partículas de refuerzo metálico se están generando dislocaciones, las cuales producen un aumento de las pérdidas por histéresis del material y reducen la permeabilidad, y además esto afecta la integridad del aislante eléctrico que recubre las partículas, afectando tanto a recubrimientos orgánicos e inorgánicos. Por este motivo se abren caminos a través del recubrimiento por donde las corrientes parásitas pueden circular con libertad aumentando así el valor de pérdidas magnéticas y el campo desmagnetizante con todo lo que ello acarrea ( Streckova, et al., 2013). Después de aplicado el esfuerzo de compresión, los recubrimientos orgánicos suelen conservar mejor su integridad pues pueden deformarse con mayor facilidad que un recubrimiento cerámico el cual tiende a fisurarse permitiendo el paso de algunas corrientes parásitas (Nakahara, et al., 2010).



*Figura 4: Esquema de aislamiento entre partículas procesadas con métodos de pulvimetalurgia (Shokrollahi, 2007)*

El segundo problema es que, si bien se puede efectuar un tratamiento térmico de normalizado a las partículas ferromagnéticas para que recuperen el nivel de permeabilidad perdido durante la deformación ocasionada por la presión de conformado, esta es perjudicial para los aislamientos orgánicos pues, como es sabido, los polímeros no pueden ser sometidos a las temperaturas

necesarias para un tratamiento térmico, ya que a esas temperaturas los polímeros se degradan y vaporizan, sin embargo, los recubrimientos inorgánicos, al ser de naturaleza cerámica, suelen conservar su integridad después del tratamiento térmico necesario para aumentar la permeabilidad del refuerzo (Yaghtin, et al., 2013) (Peng, et al., 2016) (Huang, et al., 2015).

Al observar los párrafos anteriores y la literatura, se entiende que el principal desarrollo de los SMC no se ubica en el refuerzo sino en encontrar recubrimientos en donde se tenga un equilibrio entre los problemas planteados o que los puedan eliminar por completo. En el desarrollo de recubrimientos inicialmente se experimentó mucho con compuestos orgánicos como resinas fenólicas ( Taghvaei, et al., 2009) (Streckova, et al., 2015), pues la aplicación del recubrimiento en las partículas de refuerzo es más sencilla y el espesor de recubrimiento era controlable, diferente al caso de los recubrimientos inorgánicos, los cuales fueron sofisticándose hasta poder en estos días controlar el espesor de la capa de aislante (Fan, et al., 2015), sin embargo los estudios de estos últimos años se centran en el uso de recubrimientos llamados híbridos (Streckova, et al., 2014), siendo polímeros con partículas de material inorgánico (Streckova, et al., 2015), además de un aditivo que permita cierto nivel de enlace entre el polímero y el material cerámico como nanopartículas de sílice y boro en resina fenólica (Streckova, et al., 2015), alúmina ( Peng, et al., 2016) y otros ( Streckova, et al., 2013), esto con la intención de aprovechar tanto la capacidad del polímero de deformarse y aumentar la resistencia del mismo a altas temperaturas, otros procedimientos contemporáneos y actuales se centran en las ventajas de otros procedimientos de recubrimiento cerámico como el procedimiento solgel que permite depositar sobre las partículas de refuerzo distintos materiales como MgO ( Hossein, et al., 2010),  $Al_2O_3$  (Peng, et al., 2016) (Yaghtin, et al., 2013),  $SiO_2$  (Fan, et al., 2015) ( Wang, et al., 2015) (Wang, et al., 2016) y  $MnZn-Fe_2O_4$  ( Lauda, et al., 2016).

Aumentar la permeabilidad magnética del SMC es una prioridad en el desarrollo de estos materiales compuestos, y reducir la distancia entre partículas a partir de recubrimientos más delgados no es una opción pues se compromete la integridad del recubrimiento (Kollar, et al., 2013) ante la presión y temperatura. Con el fin de aumentar la permeabilidad del material compuesto se toma una alternativa derivada de lo dicho en el presente texto, se están utilizando recubrimientos cerámicos con propiedades ferromagnéticas (Pittini-Yamada, et al., 2011) como el óxido de hierro y otros materiales aplicados por distintos métodos como por ejemplo la simple oxidación superficial de las partículas de refuerzo mediante un aumento de temperatura en presencia de vapor de agua (Zhao, et al., 2016), la deposición superficial de  $(NiZn)Fe_2O_4$  aplicada vía microondas ( Peng, et al., 2015), la ferrita de Ni-Zn (Gheisari, et al., 2008), pasivación de la superficie de partículas de Fe-Si-Ni usando ácido fosfórico (Xu, et al., 2015) y otros ( Lauda, et al., 2016) (Peng, et al., 2016), y recubrimientos orgánicos con partículas cerámicas ferromagnéticas y aditivos como  $Fe_3O_4$ /resina epóxy-modificada de silicona (Zhao, et al., 2016), resinas con nanopartículas de  $SiO_2$  ( Streckova, et al., 2013) (Streckova, et al., 2014) y otros ( Peng, et al., 2016). Además de colaborar con la permeabilidad del

SMC, el material cerámico ferromagnético en la matriz tiene propiedades de aislamiento eléctrico y resistencia a altas temperaturas.

El tamaño del refuerzo es un tema tratado por algunos autores y se ha comprobado experimentalmente que un refuerzo más fino ayuda a tener un recubrimiento más uniforme consiguiendo así recubrimientos más delgados que conserven su integridad después de aplicada la presión al reducir la cantidad de matriz en el material final, es decir, que mejora su compactibilidad, en general menores tamaños de partículas de refuerzo mejoran la permeabilidad (Tahavaei, et al., 2010) cuando se conservan las demás condiciones. Otro factor a considerar son las propiedades físicas del recubrimiento, al ser polimérico es preferible utilizar uno que tenga menor coeficiente de fricción como el caso de partículas de hierro recubiertas con parileno aplicado mediante CVDP (Wu, et al., 2015) pues también tenderá a conservar su integridad como recubrimiento aislante.

Si bien la preocupación principal de los estudiosos de los SMC es el aumento de las propiedades magnéticas, pocos han tomado en consideración las propiedades mecánicas de los mismos, es principalmente porque al ser producto de una aglomeración bajo presión de las partículas ferromagnéticas recubiertas, sus propiedades mecánicas son pobres ( Streckova, et al., 2013), no soportan un gran esfuerzo de tracción y la fractura, como puede deducirse, suele ser a través de la matriz, esto es porque no es posible realizar un sinterizado (procedimiento que puede garantizar mejores propiedades mecánicas) sin perjudicar el recubrimiento y formar caminos indeseados por donde circulen corrientes parásitas, este es otro motivo, además de la baja permeabilidad y tener niveles controlados de corrientes parásitas a bajas frecuencias, por el cual los autores de documentos científicos relacionados con el tema de SMC no ven factible la fabricación de máquinas eléctricas a partir de ellos, ya que los núcleos magnéticos de los motores y generadores están sometidos a altos esfuerzos mecánicos de origen magnético relacionados con el giro del rotor con respecto al estator. Los recubrimientos híbridos han colaborado en el aumento de propiedades mecánicas de los SMC (Streckova, et al., 2015).

Otra característica de los SMC es que tienen una menor densidad que los aceros eléctricos, esto debe tomarse con cuidado porque un SMC de baja densidad tiene una alta fracción volumen de matriz, por lo que las partículas de refuerzo se encuentran más distanciadas una de otra lo cual disminuye la interacción magnética entre ellas, en conclusión, mientras menor sea la densidad de un SMC, menor será también la permeabilidad efectiva, lo cual es perjudicial para su uso como conductor de flujo magnético, y el campo desmagnetizante (Kollar, et al., 2015). Las pérdidas en general disminuyen (Slusarek, et al., 2013), las pérdidas de histéresis disminuyen precisamente porque existe menor interacción magnética entre ellas (Kollar, et al., 2013) y las pérdidas por corrientes parásitas también disminuye pues una mayor cantidad de matriz también significa un mayor recubrimiento del refuerzo (siempre y cuando la distribución de refuerzo sea uniforme en el volumen del SMC).

Las máquinas eléctricas utilizan en sus núcleos magnéticos laminas apiladas de aceros eléctricos, en los cuales las propiedades magnéticas se manifiestan de modo anisotrópico pues las mejores características (menor permeabilidad, menores pérdidas, etc) se dan perpendicularmente a la sección transversal del apilamiento y no través del apilamiento, por ello los diseños de motores, generadores y transformadores se ve condicionado a esta anisotropía (Svensson, et al., 2012), lo que con el pasar del tiempo ha generado geometrías típicas para las máquinas eléctricas y procesos de fabricación relacionados con el apilamiento de flejes que supone una cantidad importante de horas hombre y un tiempo de producción. En el caso de los SMC, al estar conformado por partículas equiaxiales, las propiedades magnéticas (y térmicas) son isotrópicas. Puede verse que la isotropía (Zhong, et al., 2006) (Guo, et al., 2006) de las propiedades magnéticas de los SMC es una ventaja sobre los aceros eléctricos, sin embargo, es también posible indicar que el uso de un material isotrópico como núcleo magnético de una maquina eléctrica puede abrir paso a nuevas morfologías de máquinas eléctricas con mayor eficiencia. Los procedimientos afines con la conformación de cuerpos magnéticos realizados con SMC no requieren un maquinado posterior (Guo, et al., 2006).

### **1.3 Magnetización y leyes de electromagnetismo**

#### **1.3.1 Inducción magnética y ley de Faraday**

La ley de Faraday es una de las leyes de Maxwell las cuales definen la interacción entre campos eléctricos y magnéticos, esta ley en su forma más sencilla y entendible dice que *"toda variación de un campo magnético que atraviese un circuito eléctrico cerrado produce en él una tensión inducida"*, además considerando la ley de Lenz que dice *"en caso haya un cambio en un sistema magnético, sucede algo que tiende a oponerse al cambio"* Se obtiene lo siguiente (Milford, 1996).

$$e = \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

Donde:

- $e$  es la tensión inducida.
- $\varphi$  es el flujo magnético total (o concatenado) en el cuerpo magnético.

En este punto se debe anotar que la inducción magnética  $B$  también es conocida como densidad de flujo magnético pues está relacionada con  $\varphi$  de la siguiente manera:

$$\varphi = N \int \vec{B} dA$$

Donde:

- $A$  es la sección transversal de la probeta en dirección a la normal.
- $N$  es el número de espiras pues cada una colabora en la formación del flujo total.

Debido a que la sección es uniforme en todo el recorrido del campo magnético y ambos tienen direcciones paralelas entre sí, se puede escribir que:

$$\varphi = N \cdot B \cdot A$$

De la ecuación de la tensión inducida puede despejarse el flujo magnético:

$$\varphi(t) = N \cdot B \cdot A = \int_0^t e \, dt + c_1$$

$$B(t) = \frac{1}{N \cdot A} \int_0^t e \, dt + c_2$$

Se halla la constante de integración  $c_2$  tomando en cuenta que  $B(t)$  es una función periódica impar, tal que la integral de  $B$  en función del tiempo durante un periodo es cero.

Tomando en cuenta que  $\frac{1}{N \cdot A} \int_0^t e \, dt = F(t)$  se tiene que:

$$B = F(t) + c_2$$

Entonces:

$$\int_0^T B \, dt = \int_0^T F(t) \, dt + \int_0^T c_2 \, dt = 0$$

Por último:

$$c_2 = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) \, dt$$

### 1.3.2 intensidad de campo magnético y la ley de Ampere

La ley de Ahmpere permite relacionar la intensidad del campo magnético con las corrientes circulantes que lo produce, ambas se relacionan como sigue (Milford, 1996)

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{neta}$$

Donde:

- $\vec{H}$  es la intensidad de campo magnético, la cual es una cantidad vectorial.
- $I_{neta}$  Corriente neta, incluye las corrientes que pasan a través de conductores y las corrientes de desplazamiento que son un caso especial.

Debe indicarse además que en el caso de devanados, cada espira genera un pequeño campo magnético, por ello la corriente neta debe incluir la contribución de cada espira.

Debido a que la intensidad de campo magnético es uniforme en todo el circuito magnético además de paralelo a su recorrido se puede llegar a una forma sencilla de esta ecuación, que es:

$$H \cdot l_m = N \cdot I$$

Donde:

- N es la cantidad de espiras
- I es la intensidad de corriente eléctrica (amperaje)
- $l_m$  es la longitud media del circuito magnético.

#### 1.4 Distorsión armónica total (THD)

La distorsión armónica total (total harmonic distortion o THD) es un coeficiente que, en su definición primaria es la relación entre la potencia de las distorsiones armónicas con la potencia de la onda fundamental, desde otro punto de vista se puede definir como una cantidad que cuantifica que tan cerca está una función periódica de ser una senoidal, entendiéndose que una función periódica no senoidal es una composición de armónicos de distintas amplitudes a frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.

La THD está definida por la siguiente fórmula:

$$THD(G) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{i=N} A_i^G{}^2}}{A_1^G} \cdot 100\%$$

Donde:

- $A_i^G$  Es la amplitud del armónico de orden "i" de la función G, siendo "i=1" la onda fundamental
- N es el mayor armónico analizado

#### 1.5 Entrehierro y reluctancia

Debido a que no existe un medio conductor perfecto, estos presentan una oposición inherente afectada por la naturaleza del material y la geometría del conductor, en el caso de los conductores eléctricos esta oposición se denomina resistencia y está normada bajo la ley de ohm y en los magnéticos, reluctancia normada bajo la ley de Hopkinson. Es así que se puede modelar a los materiales conductores como conductores ideales más el efecto de su oposición.

Los defectos en los materiales suelen ser los responsables de aumentos no esperados en la oposición a los campos, tal es así que un cuerpo formado por hierro presentará mayor oposición a los campos cuando tenga una mayor cantidad de dislocaciones y límites de granos, es decir granos más finos. Sin embargo, cuando es necesario evitar la saturación de un cuerpo es cuando conviene aumentar la resistencia o reluctancia de los conductores, en el caso de los materiales magnéticos se suele recurrir a los entrehierros que son inclusiones de materiales no magnéticos dentro del circuito.

El entrehierro o también llamado "gap" es la parte del circuito magnético que no está conformado por un material ferromagnético tal que el campo debe pasar por este ambiente de menor permeabilidad para cerrar el circuito. El entrehierro puede ser una consecuencia del proceso de fabricación, en tal caso suele tenerse como propósito minimizar el entrehierro para obtener la mayor permeabilidad efectiva del cuerpo magnético, pero también puede ser colocado con el propósito de desplazar el punto de saturación del cuerpo magnético, en este caso debe de controlarse su dimensión. El entrehierro en los SMC es algo inherente debido a que la matriz que embebe al refuerzo magnético es un entrehierro distribuido el cual debe controlarse o aprovecharse según el uso que se le dé al producto final (Bozorth, 1978).

En el caso de los SMC la matriz de material no magnético forma un entrehierro disperso en toda la longitud del circuito magnético, es posible inferir que cuanto mayor sea la concentración de matriz, mayor será el entrehierro equivalente y menor será la permeabilidad efectiva. La reluctancia es un análogo a la resistencia en los circuitos eléctricos, está descrita por la ley de Hopkinson, la cual es análoga a la ley de Ohm y se tiene que:

$$H \cdot l_m = \phi.$$

Donde:

- $H$  es la intensidad de campo magnético
- $l_m$  es la longitud media del circuito magnético
- $\phi$  es el flujo magnético
- es la reluctancia

En este caso se debe considerar a la longitud media  $l_m$  como la suma de la longitud de un cuerpo magnético continuo  $l_m$  y un entrehierro, es decir:

$$l_m = l_{ref} + l_{gap}$$

Para representar la reluctancia dentro del circuito magnético se puede hacer de la siguiente manera:

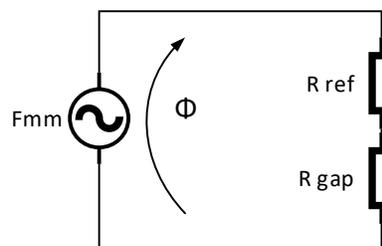


Figura 5: Esquema equivalente eléctrico del circuito magnético

La reluctancia equivalente es la suma de las reluctancias de un cuerpo continuo formado por el refuerzo de permeabilidad  $\mu_{ref} = \mu_{rel} \cdot \mu_0$  y un cuerpo continuo formado por la matriz o el entrehierro:

$$= \frac{l_{ref}}{\mu_{rr} \cdot \mu_0 \cdot A} + \frac{l_{gap}}{\mu_0 \cdot A} = \frac{1}{\mu_0 \cdot A} \left( \frac{l_{ref}}{\mu_{rr}} + l_{gap} \right) = \frac{1}{\mu_0 \cdot A} \left( \frac{l_m}{\mu_{rr}} + l_{gap} \left( 1 - \frac{1}{\mu_{rr}} \right) \right)$$

Juntando ambas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{B}{H} = \mu_{ef} = \mu_{rSMC} \cdot \mu_0 = \frac{l_m \cdot \mu_0}{\frac{l_m}{\mu_{rr}} + l_{gap} \left( 1 - \frac{1}{\mu_{rr}} \right)}$$

La permeabilidad efectiva en este caso puede aproximarse al valor medio de las permeabilidades pues se tiene una gran estabilidad de la misma.

Debe notarse que la permeabilidad del refuerzo  $\mu_{rr} \gg 1$ , por ello se puede aproximar la expresión anterior como sigue:

$$\mu_{rSMC} = \frac{\mu_{ef}}{\mu_0} = \frac{l_m}{l_{gap}}$$

Entonces

$$\%l_{gap} = \frac{1}{\mu_{rSMC}}$$

### 1.6 Pérdidas en materiales magnéticos

La reluctancia puede interpretarse como una oposición y también como una carga intrínseca en el conductor magnético, es en este segundo caso donde es necesario caracterizar las pérdidas de los materiales magnéticos según el fenómeno que las generan, es por ello que están divididas en 3 tipos, pérdidas por histéresis, por corrientes parásitas y por exceso las cuales están presentes también en los SMC.

De acuerdo a la norma ASTM A927, es posible obtener las pérdidas específicas totales a partir de la corriente en el devanado primario y de la tensión inducida, relacionadas ambas con el fenómeno electromagnético, es decir, se ignora el consumo de potencia activa realizado por los devanados. Sin embargo, el alcance de la norma citada en cuanto a pérdidas se limita a pérdidas específicas totales y no brinda la posibilidad de separar estas pérdidas en función de los diferentes fenómenos que las ocasionan, ósea pérdida por histéresis, por corrientes parásitas y por exceso.

Los SMC se ven como una alternativa de cuerpos magnéticos en aplicaciones de alta frecuencia (Sharma, et al., 2016) pues su permeabilidad magnética permanece relativamente constante frente a altas frecuencias en comparación con los convencionales cuerpos magnéticos conformados por el

apilamiento de láminas de metal ferromagnético. Es porque las variaciones de la permeabilidad efectiva de un cuerpo magnético dependen de la intensidad de los campos magnéticos desmagnetizante causados por las corrientes parásitas que se intensifican en razón de la frecuencia al cuadrado, así como existe una disminución de la permeabilidad efectiva, también existe un aumento de las pérdidas por corrientes parásitas en función de la frecuencia. Por ello el bajo valor de las corrientes parásitas en los SMC es importante y es necesario determinarlas en este trabajo.

Debido a la aplicación de estos SMC en altas frecuencias, es normal que en las investigaciones relativas a estos materiales se describa el incremento de estas pérdidas en función de la frecuencia a inducción magnética constante. Esto se debe además porque cada tipo de pérdidas ya mencionado tiene una dependencia particular con respecto a la frecuencia y con la inducción, por ello a una inducción constante es posible diferenciar los tipos de pérdidas mediante ajuste de curvas de una gráfica Potencia específica versus Frecuencia tomando en cuenta la conocida dependencia de las pérdidas en función de la frecuencia. Además, esto coincide con el método tradicional para separar las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas.

#### 1.6.1 Pérdidas totales

Cuando se habla de pérdidas, en electricidad como en otros ámbitos, se refiere a la potencia o al trabajo no útil, en circuitos de corriente alterna se puede hablar de potencia activa, reactiva y aparente, de estas tres la primera es la potencia propiamente dicha pues está relacionada por la realización de trabajo (mecánico, calor u otro), en el caso de capacitancias e inductancias éstas no realizan trabajo, sino que almacenan energía en cierta parte del ciclo para liberarla en otro momento del mismo ciclo, ésta energía almacenada en un ciclo es lo que caracteriza a la potencia reactiva, siendo la potencia aparente un número que indica el efecto conjunto de las dos anteriores.

La potencia activa es el promedio de la potencia instantánea, que se halla multiplicando la tensión por la corriente en cada instante, el promedio se halla mediante una integral que puede escribirse de la siguiente manera.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V(t).I(t) dt$$

Donde:

- P es la potencia activa
- T es el periodo
- V(t) es la tensión en función del tiempo
- I(t) es la corriente en función del tiempo

### 1.6.2 Pérdidas por histéresis ( $P_{hist}$ )

Las pérdidas por histéresis, también llamadas pérdidas DC son aquellas que se producen durante el proceso de magnetización y desmagnetización de un material, es posible hallarlas mediante medidas a diferentes frecuencias y realizando una interpolación a frecuencia cero, o del área de un lazo de histéresis en DC.

Como potencia dependen linealmente con respecto a la frecuencia y la dependencia con respecto a la inducción es de forma potencial y puede escribirse como energía la energía empleada en un ciclo del siguiente modo:

$$P_{hist} = k_{hist} \cdot B_{max}^{\alpha}$$

La dependencia potencial entre las pérdidas por histéresis y la inducción fue investigada por Steinmetz a fines de 1800 mediante un estudio empírico de los lazos de histéresis sobre los materiales ferromagnéticos que este personaje tenía disponible en aquella época determinando que el coeficiente "α" era igual a 1.6, actualmente se sabe que este coeficiente varía con respecto al material en un rango entre 1.4 y 2.2 encontrándose incluso materiales que no obedecen esta regla, o solo lo hacen en ciertos rangos.

El coeficiente  $K_{hist}$  depende del material, varía con la composición de la aleación ferromagnética, pero también varía con la microestructura disminuyendo en cuerpos metálicos donde se tiene una mayor concentración de defectos cristalinos, es decir dislocaciones, límites de granos, vacancias y otros. En el caso de los SMC el coeficiente  $K_{hist}$  también está afectado por el tamaño del refuerzo disminuyendo cuando se tienen partículas de refuerzo de mayor radio equivalente.

A bajas frecuencias, las pérdidas por histéresis son las más representativas, pudiendo en muchos casos considerar despreciables a las pérdidas por corrientes parásitas y por exceso.

### 1.6.3 Pérdidas por corrientes parásitas ( $P_{par}$ )

Consisten en la circulación de una corriente eléctrica generada como efecto colateral a la ley de Faraday y ley de Lenz. Estas pérdidas clásicas pueden subdividirse en tres, Pérdidas clásicas exteriores, las cuales se forman en la periferia del cuerpo conformado por SMC, este tipo de pérdidas en el caso de los SMC se encuentra cuando se tiene un material en "verde" formado por refuerzo y matriz con cierto grado de compactación y se realiza un corte del mismo para obtener la forma deseada, en este caso existe la probabilidad de formar una capa exterior de mayor conductividad que genere pérdidas considerables, según la bibliografía estas pérdidas son despreciables para especímenes con sección transversal de dimensión menor a 5 cm (Bordianu, et al., 2012). Las pérdidas intragranulares, son aquellas pérdidas que se forman por la circulación de corrientes parásitas o de Foucault en el interior de cada partícula de refuerzo, éstas dependen de la resistividad, el radio equivalente de las partículas de refuerzo y su cantidad en la probeta estudiada o por kg de

la misma. Además, se encuentran las pérdidas intergranulares formadas por las corrientes parásitas que logran circular a través de los recubrimientos dañados durante la compactación, dependen del radio equivalente de la sección de la probeta y de la resistividad del SMC. En todos estos casos se pueden obtener constantes de proporcionalidad provenientes de las propiedades físicas y dimensiones de los materiales, afectadas por la integración en un ciclo del cuadrado de la derivada de la inducción con respecto al tiempo ( Taghvaei, et al., 2009).

$$P_{cl} = (k_{intra}' + k_{inter}') \cdot \frac{1}{f} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^2 \cdot dt$$

O efectuando la derivada y modificando los coeficientes de proporcionalidad:

$$P_{cl} = (k_{intra} + k_{inter}) \cdot B_{max}^2 \cdot f$$

#### 1.6.4 Pérdidas en exceso ( $P_{exc}$ )

Las pérdidas en exceso o pérdidas suplementarias, son mayormente despreciables en la mayoría de fenómenos eléctricos, sin embargo, a bajas inducciones tienen valores con el mismo orden de magnitud que las pérdidas por corrientes parásitas (Kollar, et al., 2013), se generan a partir de un fenómeno de corrientes circulantes en las paredes de los dominios magnético dentro de las partículas de refuerzo ferromagnético y tienen la siguiente dependencia:

$$P_{exc} = k_{exc}' \cdot \frac{1}{f} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^{3/2} \cdot dt$$

O efectuando la derivada y modificando los coeficientes de proporcionalidad:

$$P_{exc} = k_{exc} \cdot B_{max}^{3/2} \cdot f^{1/2}$$

Todas las pérdidas por ciclo descritas muestran una dependencia con respecto a la frecuencia y a la inducción magnética máxima.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL:

### 2.1 Estudios preliminares

Con el ánimo de validar la hipótesis presentada en un inicio como tema de investigación para un trabajo de la maestría de materiales, se presentó una experiencia en la que se medían las propiedades magnéticas de un compuesto formado por un refuerzo de virutas de acero de construcción y diversas matrices, a continuación, se muestran algunos aspectos de esta investigación previa.

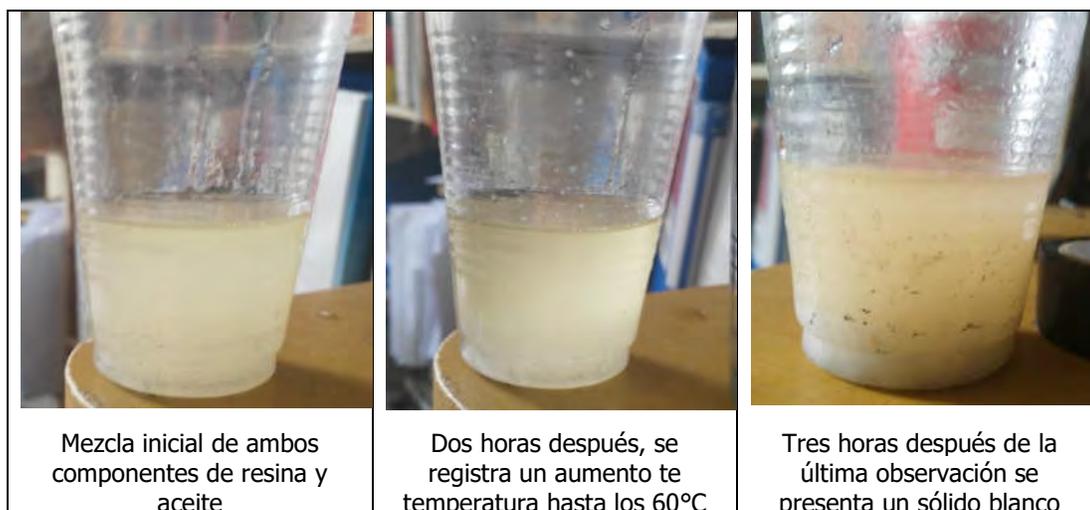
#### 2.1.1 Fabricación de probetas

La experiencia previa tenía como objetivo principal establecer el método de fabricación y prueba de un material compuesto con diferentes características magnéticas a las de sus constituyentes. Motivo por el cual se utilizó un refuerzo de material ferromagnético formado por virutas obtenidas a partir de la operación de refrentado con torno de una barra de acero de construcción AISI 1045, estas virutas fueron tratadas térmicamente para posteriormente ser trituradas Figura 6.



*Figura 6: Formación de las partículas ferromagnéticas utilizadas en la experiencia previa a partir de viruta metálica*

Al inicio de la presente experiencia previa se aglomeró viruta de hierro utilizando resina epóxica, en este caso la intención fue obtener la mayor cantidad de refuerzo ferromagnético posible con las virutas obtenidas del mecanizado (probeta T1), por lo que se realizaron dos experiencias, la primera no fue satisfactoria por la gran cantidad de imperfecciones visibles en el exterior de la probeta, además era notoria la presencia de gases residuales del proceso de curado en la superficie de la probeta, motivo por el cual se realizó la probeta T1 utilizando resina epóxica diluida en aceite, la cual por su poca viscosidad permitía su penetración en los intersticios presentes entre las partículas de refuerzo, otra ventaja de aceite es su inmiscibilidad con la resina epóxica (*Figura 7*) debido a esto, después del curado, se obtienen dos fases, una sólida de color blanco y un líquido también blanquecino el cual es eliminado con facilidad.



*Figura 7: Inmiscibilidad del aceite y de la resina epóxica*

También se experimentó con cerámica en frío como matriz, con la finalidad de obtener diversas concentraciones, diferentes a la máxima, de refuerzo dispersas en el material compuesto, configuración que no es posible utilizando resina epóxica.

En total se elaboraron 6 probetas con diferentes concentraciones de refuerzo y diferentes matrices como se describe a continuación:

- T1: Probeta con la máxima cantidad de refuerzo posible, se preparó por el método indicado en el presente texto.
- T2: Probeta de núcleo no magnético hecho de papel, nos sirve como referencia para corroborar el procedimiento.
- T3, T4 y T5: Probetas realizadas con matriz de masa de cerámica en frío con refuerzos de 15, 30 y 60 gramos de refuerzo.
- T6: Se trata de un toroide compuesto enteramente del material del refuerzo.

Otras características y dimensiones se describen en la Tabla 1:

*Tabla 1 Características de probetas en experiencia previa*

		T1	T2	T3	T4	T5	T6
<i>Medidas</i>	Longitud media (cm)	18.77	19.63	17.44	17.04	16.26	17
	Sección (cm <sup>2</sup> )	4.35	1.3	5.7	5.51	5.32	9
<i>Composición</i>	Vol de refuerzo (cm <sup>3</sup> )	27.75	--	1.92	3.85	7.69	95
	Vol de matriz (cm <sup>3</sup> )	53.89	25.52	97.46	90.06	78.79	--
	vref- vmat	34.0%- 66.0%	0%- 100%	4.1%- 95.9%	8.9%- 91.1%	1.9%- 98.1%	100%- 0%
<i>Devanados</i>	Primario / secundario	50/50	60/60	50/50	50/50	55/55	50/50

### 2.1.2 Pruebas

Este estudio se realizó con el fin de obtener:

- Lazo de histéresis de cada probeta ante diferentes intensidades de campo magnético.
- Pérdidas específicas para cada probeta.
- Curva de magnetización AC y permeabilidad.

## 2.2 Materiales

De acuerdo a los resultados obtenidos en los estudios preliminares se utilizaron otros materiales como insumos para realizar el material compuesto con refuerzo ferromagnético, lo principal y más notable fue evidenciar la necesidad de un material adicional que permitiera la distribución de refuerzo en todo el volumen de la probeta, y este material se le denomina en el presente trabajo como "carga".

### 2.2.1 Refuerzo

En este trabajo se requiere un refuerzo en forma de partículas con características ferromagnéticas, por estos motivos se decidió emplear las llamadas "partículas magnéticas" utilizadas normalmente en los procesos de ensayos no destructivos para localizar discontinuidades superficiales y sub superficiales. Se consideró el empleo de este material por tener las siguientes características:

- Tienen una permeabilidad magnética superior a la de los materiales diamagnéticos y paramagnéticos, pues necesitan ser sensibles a los pequeños campos de fugas formados por las discontinuidades durante su localización en los ensayos no destructivos.
- Tienen una baja retentividad o remanencia, pues al suprimir el campo magnético generado sobre el material analizado en ensayos no destructivos, las partículas no deberían quedar magnetizadas para poder eliminarse con facilidad.
- El material del que están compuestos estas partículas debe tener características magnéticas suaves, lo cual se refleja en un lazo de histéresis magnética estrecho. Esto tiene coherencia con las características mencionadas hasta el momento.
- Tiene un recubrimiento, posiblemente formado por algún polímero o mediante algún procedimiento de origen electrolítico como la fosfatación mencionada en la bibliografía, el cual evita la corrosión de las partículas, pues debido a su forma y dimensión deberían ser susceptibles a corrosión tanto por ser los aceros aleaciones químicamente activas como por la gran relación superficie/masa relacionada también con la reactividad, el recubrimiento explicaría el motivo por el cual son reutilizables y tienen una vida útil extensa. Además, estos polvos magnéticos se expenden en variedad de colores, lo cual debe ser producto de un recubrimiento polimérico y colorantes.

Las partículas magnéticas utilizadas en esta experiencia son de la marca Magnaflux, identificadas con el nombre comercial "#1 gray", ver Figura 8, la cual hace en parte referencia al color del

recubrimiento de estas partículas que es efectivamente gris, estas partículas tienen las siguientes particularidades:

- La granulometría de las partículas no estaba especificada en las hojas técnicas alcanzadas por el proveedor, más bien se indica que este dato es parte de los conocimientos de autoría del fabricante sin embargo se garantiza su uso para actividades de ensayos no destructivos, por lo que al momento de recibir y examinar estas partículas magnéticas se observó que la granulometría era mucho menor que la esperada.
- Tampoco se tenía información de la composición de las partículas magnéticas previa (indica rangos de porcentajes de composición), por el motivo anterior, sin embargo, indican que el material ferromagnético es Fe identificado con el número CAS 7439-89-6 en un porcentaje de 60 a 100%, código que corresponde a Fe de alta pureza (>99%) en polvo. Dato que permitirá hacer comparaciones entre los datos obtenidos a partir de las probetas y las curvas magnéticas características del Fe de alto grado de pureza.
- No hay información sobre el recubrimiento, se entiende que es una mezcla de los otros componentes indicados en los datos del fabricante, estos son bióxido de titanio, sílice amorfa y gel de sílice precipitada.

La principal ventaja del material usado como refuerzo en la experiencia actual frente al material utilizado en la experiencia previa es decir partículas magnéticas frente a virutas obtenidas a partir de una pieza sólida de metal, es que se garantiza la repetitividad de la experiencia con lo que se puede comprobar posteriormente y en otros laboratorios los resultados obtenidos en el presente trabajo utilizando ese mismo insumo.



*Figura 8: Refuerzo de partículas ferromagnéticas de END*

### 2.2.2 Carga

El material utilizado como "carga" se necesita para formar mezclas de polvos con relativa homogeneidad a fin de poder conseguir diferentes concentraciones de polvos y posteriormente

aglomerar el conjunto con la matriz, para ello se requiere un material que cumpla las siguientes características:

- Una condición importante es tener similar granulometría con el refuerzo, que como se indicó resultó ser más fino de lo esperado en un primer momento.
- Propiedades magnéticas despreciables, el material utilizado como carga debe ser paramagnético o diamagnético para que su interacción con los campos magnéticos sea despreciable y solo se estudia el comportamiento del refuerzo distribuido en todo el volumen de la probeta. Estos materiales son los más comunes en la naturaleza y en la industria.
- De preferencia dieléctrico, una ventaja de estos materiales compuestos es que al tener el refuerzo ferromagnético en forma de partículas, los caminos por donde han de circular las corrientes parasitas son menores incluso que en el caso convencional utilizado en la industria de máquinas eléctricas donde se utilizan cuerpos magnéticos conformados por apilamiento de flejes de acero eléctrico, si bien se entiende que las partículas magnéticas utilizadas en esta ocasión como refuerzo tienen un recubrimiento dieléctrico que evita la corrosión de las mismas, el uso de cargas que eviten también la conducción eléctrica favorece al aislamiento entre partículas de refuerzo.

Conociendo estas características, se utilizó un insumo de fácil obtención que cumple con las características mencionadas, este es el talco (Figura 9).



*Figura 9: Carga de talco*

Antes de la elección del talco como carga se realizaron experiencias previas donde no se pudo evitar la formación de dos fases diferenciadas en las probetas tal como se muestra en la Figura 10.

### 2.2.3 Matriz

La matriz tiene por función aglomerar a las partículas de refuerzo y de carga, formando una fase continua. Para el presente caso se ha optado por la resina epóxica bi-componente autocurable,

debido a que se tiene experiencia en su uso, además de ser dieléctrica y tener propiedades magnéticas tenues como la carga.

Específicamente se ha utilizado la resina denominada POX BAX 1205, (Tabla 2).

*Tabla 2: Propiedades de resina epóxica utilizada como matriz.*

Nombre comercial:	POX BAK 1205®
Suministrado por:	E Salas Ingenieros.
Es un compuesto epóxico que gracias a su baja viscosidad presenta un gran poder de humectación, especialmente para humectar fibra de vidrio, carbon y otros.	
RELACION DE MEZCLA	
POX BAK 1205 A 100 partes en peso POX BAK 1205 B 30 partes en peso	
TIEMPO DE ENDURECIMIENTO	
Gelifica en 120 minutos a temperatura ambiente. Para acelerar el curado se recomienda calentar los moldes a +/- 80 oC.	
PROPIEDADES MECANICAS	
Peso específico	1.1 kg./litro
Deflexión térmica	oC 66 – 72
Resistencia a la tensión	10,200 PSI
Elongación	% 6.5
Módulo de Tensión	457 PSI
PROPIEDADES DIELECTRICAS	
Resistencia Volumétrica	
@ 25° C	1.1 x 10 <sup>16</sup> Ohms x cm
@ 100° C	9.0 x 10 <sup>12</sup> Ohms x cm
@ 150° C	1.3 x 10 <sup>9</sup> Ohms x cm



*Figura 10: Fase precipitada de partículas magnéticas diferenciada de la resina epóxica.*

### 2.3 Fabricación de probetas

Las probetas fabricadas para la caracterización de propiedades magnéticas tienen una forma toroidal, tal como indica la norma ASTM 927, en ellas se va a incorporar un circuito magnético que incluye

dos devanados los cuales se van a bobinar en toda la longitud del mismo, por ello las dimensiones que definan nuestra probeta serán el diámetro interior, diámetro exterior y altura.

Para la fabricación de las probetas se optó por hacer uso del método de mayor simpleza encontrado, esto debido a que el alcance de la presente tesis contempla comparaciones entre concentraciones de refuerzo y no entre procedimientos de fabricación. Tal es así que la fabricación de las probetas se realizó utilizando moldes realizados de modo casero como el de la Figura 11 y el proceso fue la simple mezcla de los componentes en diferentes proporciones.



*Figura 11: Molde utilizado*

### 2.3.1 Dimensiones de las probetas

Las dimensiones de las probetas usadas en esta experiencia son similares a las empleadas en la experiencia previa, esto debido a motivos prácticos que facilitan la fabricación de las probetas y a los buenos resultados obtenidos en la primera ocasión.

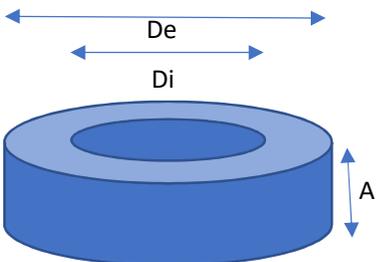
La norma ASTM A927 recomienda dimensiones de diámetro interior y exterior las cuales han sido empleadas en las probetas realizadas, sin dar especificaciones sobre la altura de la probeta, esto se debe a que al tratar con ciertos procesos productivos de fabricación de probetas es posible generar una mayor conducción en la superficie del cuerpo de SMC, lo cual colabora en la generación de corrientes parásitas exteriores y campo desmagnetizante, además de modificar el valor medido de la permeabilidad de la probeta. Sin embargo, estos efectos son despreciables para cuerpos de secciones menores a 25 cm<sup>2</sup> (Bordianu, et al., 2012), por lo cual no hay ninguna restricción para el tamaño de nuestras probetas.

Tomando esta consideración se realizaron moldes toroidales usando las dimensiones mostradas en Tabla 3:

Esto permite obtener de forma directa dos valores necesarios para poder hacer los cálculos de las variables magnéticas a partir de las variables eléctricas obtenidas en el circuito de medición, estos se aprecian en la Tabla 4:

Tabla 3: Dimensiones de moldes

Dimensión	Medida
Altura (A)	25 mm
Diámetro interior (Di)	30 mm
Diámetro exterior (De)	70 mm



El diagrama muestra un molde cilíndrico azul. Se indican tres dimensiones: el diámetro exterior (De) representado por una línea horizontal superior que abarca todo el ancho del cilindro; el diámetro interior (Di) representado por una línea horizontal inferior que abarca el ancho del agujero central; y la altura (A) representada por una línea vertical a la derecha que indica la altura del cilindro.

Tabla 4: Valores geométricos para cálculo de parámetros magnéticos

Dimensión	Medida
Sección transversal	5 cm <sup>2</sup>
Longitud media	15 cm
Volumen	75 cm <sup>3</sup>

Con estos datos es posible el cálculo de la inducción magnética y la intensidad de campo magnético a partir de la tensión y la corriente registrados en el circuito de prueba.

### 2.3.2 Preparación del molde

El molde fue realizado tomando en mente las siguientes razones:

- En muchas investigaciones un factor a tomar en cuenta es la presión que se le aplica al material compuesto durante la fabricación de las probetas, esto es importante pues la compactación permite tener mayores concentraciones de refuerzo, sin embargo, en el presente trabajo no se está realizando compactación alguna para permitir que la única variante sea la concentración del refuerzo, pues la compactación tiende a deformar el refuerzo haciendo variar sus propiedades magnéticas.
- La compactación además influye en las características magnéticas del refuerzo pues al generar deformaciones de grano y tensiones internas disminuye las características magnéticas del insumo metálico.
- La formación de los materiales compuestos realizados no garantiza propiedades mecánicas, por ello en este caso, en favor de preservar intacto el material compuesto realizado, es mejor retirar el molde de la pieza en vez que la pieza del molde.
- Se deja indicado que moldes metálicos son de suma importancia en futuras investigaciones donde la compactación y la temperatura sean variables a tomar en cuenta en la formación de los materiales compuestos magnéticos.
- Diferentes métodos de fabricación pueden influir positivamente en las propiedades mecánicas del material compuesto, estas propiedades se deben tomar en cuenta cuando se estudien

materiales compuestos destinados a la fabricación de los núcleos de máquinas eléctricas rotativas (motores o generadores) los cuales están sometidos a fuerzas magnéticas.

### 2.3.3 Realización de mezcla

La mezcla se realizó usando diferentes proporciones de refuerzo y carga las cuales se aglomeraron empleando siempre la misma cantidad de resina epóxica, como se observa en la Tabla 5; sin embargo, la cantidad de resina epóxica indicada no era la suficiente para lograr aglomerar el conjunto, motivo por el cual se agregó una cantidad no definida de aceite el cual al agregarse a las partículas de refuerzo y carga permite formar una pasta homogénea con la resina epóxica, además, al ser el aceite inmiscible con la resina epóxica, buena parte (no puede asegurarse que en su totalidad) termina siendo excluido como exceso durante y posteriormente al proceso de curado.

En todos los casos mencionados se utilizó toda la mezcla realizada para elaborar las probetas mencionadas.

Tabla 5: Componentes de las mezclas realizadas

	REFUERZO (g)	CARGA (g)	MATRIZ (g)
T 100	186	--	30
T 75	139.5	9	30
T 50	93	18	30
T 25	49	27	30

## 2.4 Caracterización no magnética de probetas

### 2.4.1 Dimensiones finales

Las dimensiones finales de las probetas son las mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6: Dimensiones finales de probetas

	T100	T75	T50	T25
D interno (cm):	2.75	3.0	3.0	3.1
D externo (cm):	6.9	7.0	6.9	7.0
Altura (cm):	2.6	2.5	2.2	2.2
Sección transv (cm <sup>2</sup> ):	5.4	5.0	4.3	4.3
Peso real (g):	258	215.7	174.4	134.3
Volumen real (cm <sup>3</sup> ):	81.7	78.5	66.7	67.9

Utilizando los valores indicados en la Tabla 5 y Tabla 6 considerando la densidad teórica del hierro, que es 7.8 g/cm<sup>3</sup>, se pueden obtener las concentraciones teóricas de masa y volumen de refuerzo

magnético en la Tabla 7, así mismo se indica que al momento de observar una sección transversal de las probetas estudiadas se podrán obtener valores experimentales de dichas concentraciones.

Se puede observar en la Figura 12 las probetas toroidales resultantes.

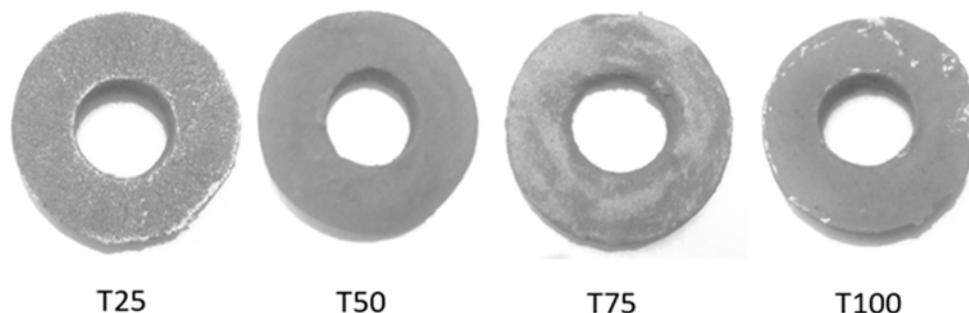


Figura 12: Probetas toroidales

Tabla 7: Concentraciones de refuerzo en probetas

	T100	T75	T50	T25
Volumen real de probeta (cm <sup>3</sup> )	81.7	78.5	66.7	67.9
Masa de refuerzo (g)	186.0	139.5	93.0	46.5
Volumen de refuerzo (dens=7.8g/cm <sup>3</sup> ) (cm <sup>3</sup> )	23.8	17.9	11.9	5.9
Concentración de refuerzo (vol%)	29.1	22.7	17.8	8.8

#### 2.4.2 Distribución de refuerzo (SEM)

La presente prueba consiste en analizar las imágenes de microscopio electrónico de barrido, estas fueron tomadas a una diferencia de potencial de 30KV. La finalidad es analizar las imágenes obtenidas para tener una descripción física del SMC y de las partículas de refuerzo, en este caso específico se requiere el diámetro equivalente de las partículas de refuerzo y la concentración real de las mismas en las probetas. El software usado para el análisis de las presentes imágenes es el ImageJ de carácter libre.

### 2.5 Caracterización de flujo eléctrico y magnético en las probetas

La caracterización magnética de estas probetas, según las bases teóricas en las que se fundamenta la norma ASTM A927, se debe hacer mediante la formación de un circuito magnético el cual tiene como fuente un devanado primario que genera un campo magnético que es transportado por el cuerpo magnético, en el presente caso la probeta toroidal, y llega a un devanado secundario con la misma cantidad de espiras que el devanado primario, este devanado se encuentra en vacío (sin carga conectada) por lo que al medir la tensión en los extremos de este devanado se registra la

tensión inducida del mismo tal como se observa en muchas investigaciones que no cuentan con un equipos específico para obtener los parámetros magnéticos de un SMC (Périgo, et al., 2011).

Es importante comprender que el mismo alambre de cobre que forma el devanado primario ejerce una oposición o resistencia al flujo de electricidad y esto se refleja en una pérdida de voltaje o tensión, por lo que el voltaje que genera el fenómeno electromagnético es menor al aplicado. Debido a que se tiene la misma cantidad de espiras en el devanado primario y en el secundario, el voltaje involucrado en el fenómeno electromagnético tiene la misma magnitud que la tensión inducida en el devanado secundario y por último esta tensión es obtenida en los extremos del devanado secundario pues al estar en vacío (circuito abierto, no hay flujo eléctrico) no existe una pérdida de tensión que altere esta medida (Boehm & Hahn, 2012).

Esto se puede notar con mayor detalle en el circuito equivalente de un transformador observado en la Figura 13, donde se puede denotar a la resistencia del devanado "R<sub>1</sub>" como parte representativa de la impedancia serie.

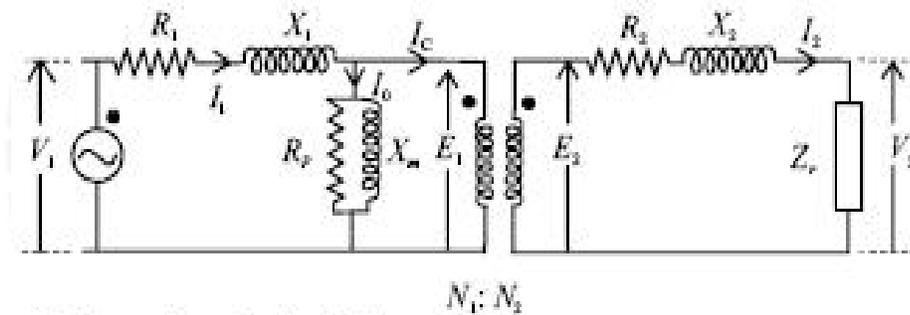


Figura 13: Circuito equivalente de transformador (Staff M.I.T, 1965)

El circuito equivalente de la bibliografía puede simplificarse para los fines del presente trabajo de investigación añadiendo además las tensiones mencionadas en el párrafo anterior obteniendo lo mostrado en la Figura 14.

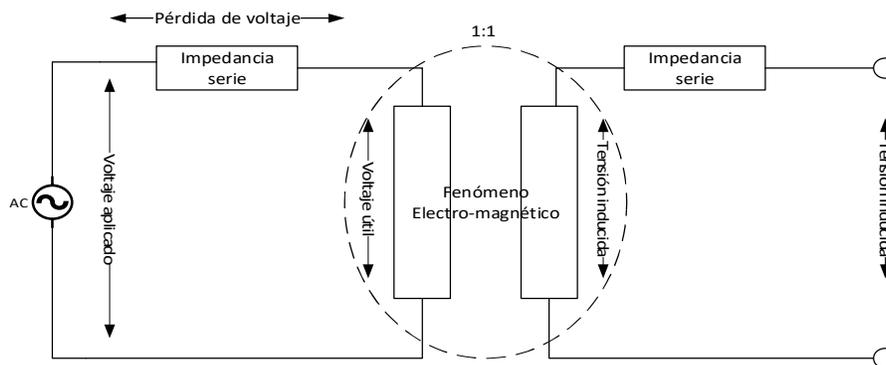


Figura 14: Circuito equivalente simplificado para fines de la presente experiencia

La norma ASTM A927, así como otras normas con similar propósito, miden magnitudes o parámetros magnéticos a través de magnitudes eléctricas, por lo que requieren de un circuito donde se haga ingresar flujo eléctrico y pueda medirse una respuesta también eléctrica, tal que entre ellas se produzca solo una interacción magnética.

### 2.5.1 Descripción del circuito de la norma

El circuito de la norma ASTM A927 mostrado en la Figura 15 tiene las siguientes características:

- La tensión eléctrica que alimenta al circuito es proporcionada por un generador de onda el cual brinda una onda senoidal libre de armónicos, es decir distorsiones, y amplificada linealmente de modo variable tal que se puedan obtener diferentes intensidades de corriente y por consiguiente de intensidades de campo.
- El vatímetro, el voltímetro de pico (o valor máximo) y el voltímetro de flujo, son equipos que brindan un valor que caracteriza la magnitud medida, este mayormente es el valor eficaz o RMS afectado por un factor proveniente de los cálculos que consideran ondas senoidales.
- Se observa que el voltímetro de pico se encuentra midiendo la tensión de la "resistencia de corriente" pues está siendo usada para medir la corriente del devanado primario de modo indirecto.
- El vatímetro está dispuesto para poder medir la potencia activa consumida en la realización del fenómeno magnético en los fenómenos de histéresis y corrientes parasitas (llamada potencia activa), para ello utiliza la tensión inducida en el devanado secundario y la intensidad de corriente eléctrica del devanado primario.

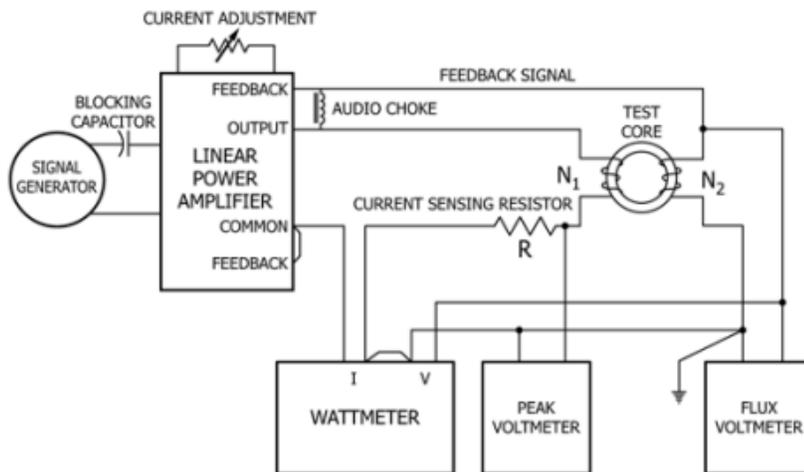


Figura 15: Circuito de prueba según norma ASTM A927 (ASTM-A927, 2011)

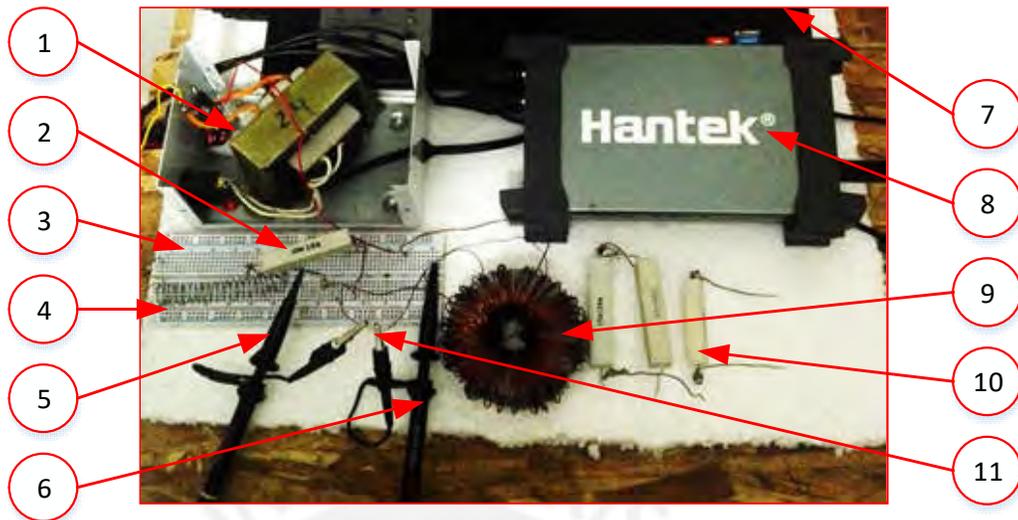
Cabe indicar finalmente que los valores de tensión y potencia presentes en el circuito analizado son más pequeños de los analizados normalmente en corriente alterna, por lo que deberían adquirirse

equipos no comunes en el ámbito de la electricidad práctica o industrial donde se acostumbra medir valores de tensión cercanos a los 220V en corriente alterna y no valores de milivoltios.

### 2.5.2 Descripción del circuito de prueba

El circuito de prueba realizado para analizar el fenómeno electromagnético descrito es mostrado en la Figura 17 y Figura 16, tiene las siguientes características:

- Utiliza como único equipo de medición un osciloscopio, el cual permite censar el valor de tensión de dos puntos diferentes a razón de una medida por microsegundo con lo que se puede obtener los valores requeridos directamente del análisis de la onda y no de equipos de medición que brindan un solo valor representativo (por ejemplo, RMS).
- El circuito está alimentado por una toma de tensión domiciliaria de 220 voltios RMS, la cual lleva armónicos y además esta tensión es llevada a un valor RMS de 25 voltios mediante un transformador el cual también contribuye en la generación de armónicos, sin embargo, el osciloscopio permite analizar toda la onda incluidos los armónicos y distorsiones.
- La disposición de la tierra del circuito es importante, porque si bien físicamente existen dos pinzas de tierra en el osciloscopio, interiormente se cortocircuitan y forman una única referencia de potencial.
- Las pinzas de medición tomaran el valor sin atenuación, es decir trabajarán en X1.
- La resistencia variable permite regular la corriente que ingresa en el primario y con ello la fuerza magnetomotriz del circuito magnético. Las resistencias usadas en esta parte del circuito son de 0.5, 1, 4, 7, 10 y 13 ohm, debido a las intensidades de corriente utilizadas se emplean resistencias cerámicas de 20 watts.
- La punta CH2 medirá la tensión presente en la resistencia de 1 ohm, esta tensión equivale en valor a la corriente que circula por el devanado primario. Debido a que el osciloscopio empleado solo puede medir valores menores a 5 voltios se utiliza el divisor de tensión de 1Kohm-10Kohm para que el osciloscopio tome registro de la undécima parte del valor de tensión de la resistencia de 1ohm.



*Figura 16: Circuito utilizado en físico*

Donde:

1. Transformador de entrada 220V – 25V.
2. Resistencia auxiliar "R" de valor 1ohm, para medida de corriente.
3. Protoboard (facilita las conexiones entre elementos).
4. Resistencia variable.
5. Punta de prueba de osciloscopio CH1 (medida de tensión de R equivalente a corriente en devanado primario).
6. Punta de prueba de osciloscopio CH2 (medida de tensión inducida en el devanado secundario).
7. Laptop con el software de Hantek® para la lectura de los datos recibidos por las puntas del osciloscopio.
8. Osciloscopio Hantek® modelo 6022BE.
9. Toroide de prueba formado por el núcleo del material analizado y los devanados primario y secundarios conectados entre sí solo magnéticamente.
10. Resistencias variables que se reemplazan en el circuito para poder obtener diferentes valores de corriente.
11. Referencia de tierra común del sistema.

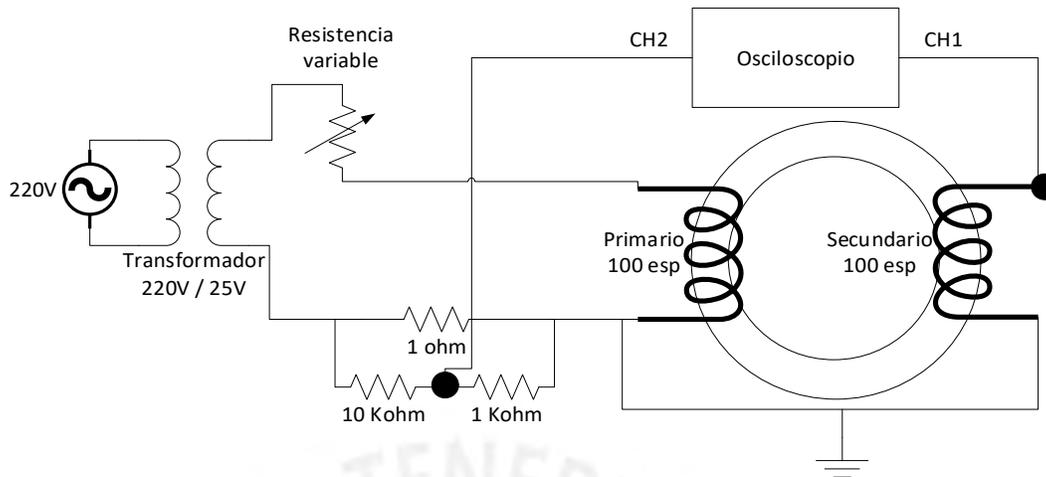


Figura 17: Esquema del circuito utilizado

## 2.6 Metodología de cálculo de magnetización y pérdidas específicas

Como se dijo anteriormente, las propiedades magnéticas se evalúan a través del estudio de señales eléctricas de entrada y de salida. Es así que en todos los casos las normas dedican una parte de su contenido en mostrar los cálculos que permiten obtener las características magnéticas a partir de la lectura de tensiones eléctricas. Entonces es necesario tomar unas páginas de la presente tesis para indicar los procedimientos de cálculos utilizados y su divergencia con la norma.

### 2.6.1 Series de Riemann

Las series de Riemann son la definición de la integral en sí, se definen como la sumatoria infinita de las áreas de rectángulos donde la base del mismo la conforma un diferencial, en el caso más sencillo viene a ser una variable independiente, y la altura está definida por una función o variable dependiente evaluada en cada punto. La cantidad de rectángulos en un determinado dominio aumenta a razón de la disminución de la base de los mismos aproximándola a cero.

Existen métodos que en vez de rectángulos utilizan trapecios y tienen mayor exactitud, sin embargo, también se puede obtener mayor precisión haciendo el diferencial más pequeño como en el caso estudiado.

La sumatoria de Riemann puede denotarse matemáticamente como se muestra a modo de fórmula y a su vez gráficamente en la Figura 18.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b-a}{n} \sum_{k=1}^n f\left(a + k \frac{b-a}{n}\right) = \int_a^b f(x) dx$$

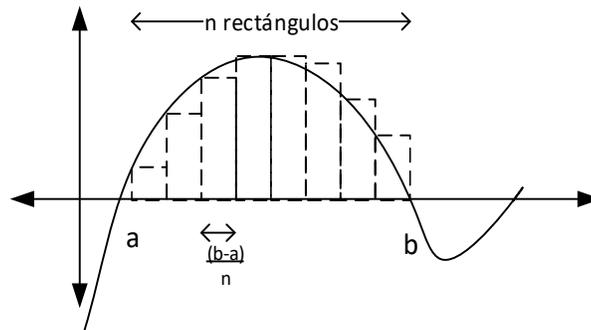


Figura 18: Representación gráfica de la sumatorias de Riemann

Como puede apreciarse, este es un método muy útil para medir el área bajo una curva o la integral de una función definida por sus coordenadas apoyándose de sentencias de programación que incluyan recursividad.

En el presente estudio las tensiones registradas por el osciloscopio varían con respecto al tiempo, por lo que el diferencial de tiempo será de 1 microsegundo, y se analizan los 16666 datos que conforman un periodo. Entonces las integrales realizadas a través de las integrales de Riemann serán la sumatoria de las 16666 datos multiplicado por  $1/1000000$ .

### 2.6.2 Eliminación de ruido

Para poder simplificar los datos obtenidos por el osciloscopio se realizó un programa en Matlab que permite descomponer las ondas de tensión en componentes puramente senoidales con distintas amplitudes y frecuencias. El método utilizado en este caso es el análisis de series de Fourier.

El método de series de Fourier se utiliza para analizar funciones periódicas no senoidales a través de sus componentes senoidales calculando las amplitudes de funciones seno y coseno.

Para hallar las series de Fourier de las ondas estudiadas se recurrió a introducir las integrales que definen este procedimiento mediante sentencias recursivas realizadas en Matlab que permitieron obtener los valores de los coeficientes de las ondas senoidales componentes de la onda estudiada hasta el 20avo armónico.

El efecto de la eliminación de armónicos para las ondas estudiadas puede evidenciarse haciendo la comparación de un caso de ciclos de histéresis con la eliminación de armónicos y sin ella como se ve en la Figura 19.

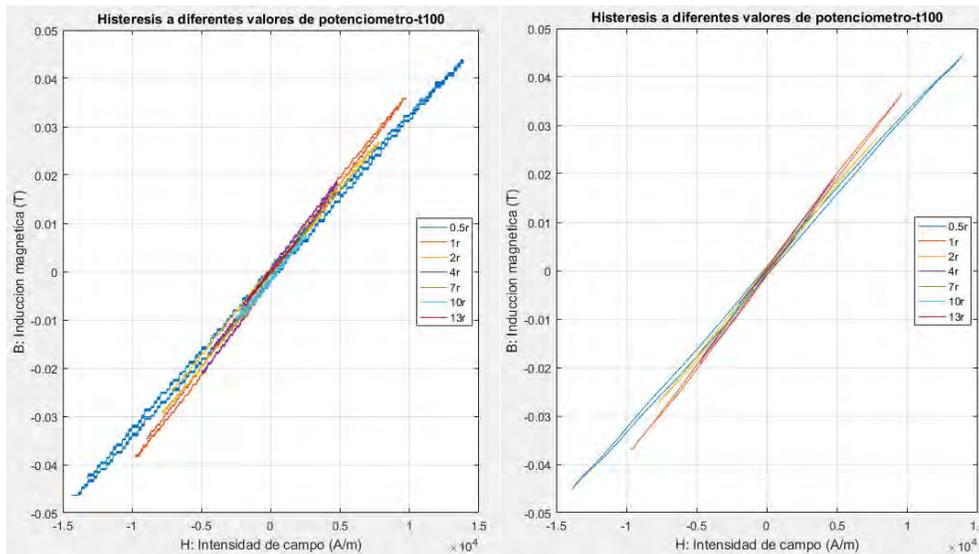


Figura 19: Lazo de histéresis: a la derecha sin eliminación de armónicos superiores, a la izquierda, con eliminación de armónicos superiores

### 2.6.3 Cálculo de parámetros de magnetización

En el presente caso de estudio se tienen dos devanados, uno primario que produce un flujo magnético variable en el tiempo, pues tiene la misma frecuencia que el campo eléctrico que la produce, y uno secundario donde se obtiene la tensión inducida registrada por el osciloscopio en su canal CH1. En la presente experiencia se utiliza la integral de la tensión inducida para obtener indirectamente la inducción, tras realizar la integral indicada en 1.3.1 por el método de sumatorias de Riemann

Se indicó en la sección 1.3.2 que la intensidad de campo magnético es proporcional a la intensidad de corriente en el devanado primario, valores que se obtienen de las medidas del canal CH2 del osciloscopio el cual recoge los datos de tensión en la resistencia auxiliar de 1 ohm.

### 2.6.4 Cálculo de pérdidas específicas

Las pérdidas específicas en un material magnético corresponden a las pérdidas de potencia activa por unidad de volumen o masa, en el caso del presente estudio y en concordancia con investigaciones afines en el campo de los SMC, se realiza en función del volumen.

Debe entenderse que la norma que se toma como referencia, es decir la ASTM A927 permite hallar parámetros magnéticos en AC, siendo diferentes a los parámetros en DC, los parámetros en AC varían con la frecuencia debido al efecto de campos desmagnetizantes y corrientes parásitas no existentes en las pruebas en DC y que escapan del alcance del presente trabajo.

Es por ello que al medir el área interna del lazo de histéresis en AC se obtienen las pérdidas totales en relación con el volumen de la muestra toroidal y no solo las pérdidas por histéresis. Si se analiza

el circuito de pruebas por conservación de la energía se puede observar que la fuente brinda energía que es consumida por el alambre de cobre del devanado del primario, el cual tiene una resistencia que genera un consumo de energía y por las pérdidas en el SMC que se requiere estudiar, sin embargo, en el caso del circuito analizado la corriente requerida para el cálculo de la potencia será la del devanado primario y la tensión será la tensión inducida en el devanado secundario, que es la que influye en el fenómeno electromagnético y se ajusta a la conexión del vatímetro en el circuito de prueba de la norma ASTM A927 solo se tiene el gasto de la energía usada por el SMC, la cual se calcula con la integral descrita en la sección 1.6.1, se resuelve mediante sumatorias de Riemann.

Como se indicó en la sección 1.6, la separación de pérdidas suele realizarse en función de la frecuencia, es decir mediante ajuste de curvas a partir de una gráfica potencia versus frecuencia, tomando como condición común que cada toma de datos debe de realizarse con una inducción máxima constate, con esto es posible hallar los coeficientes  $P_{hist}$ ,  $P_{par}$  y  $P_{exc}$ .

Debido a que se realizó una toma de datos a frecuencia constante, pero variando el valor máximo de la inductancia se hará uso de las siguientes ecuaciones para realizar el ajuste de curvas, utilizando la sentencia "fit" de Matlab.

$$P_{hist} = k_{hist} \cdot B_{max}^{\alpha}$$

$$P_{par} = k_{par} \cdot B_{max}^2 \cdot 60$$

$$P_{exc} = k_{exc} \cdot B_{max}^{\frac{3}{2}} \cdot 60^{\frac{1}{2}}$$

$$P_{tot} = P_{hist} + P_{par} + P_{exc}$$

Donde se tienen 4 variables:  $P_{hist}$ ,  $P_{par}$ ,  $P_{exc}$  y el exponente  $\alpha$ ; al aplicar las herramientas de ajuste de curvas utilizadas para hallar estas variables no se encuentra convergencia para los datos de algunas probetas y en otros casos no representan la realidad dando en algunos casos coeficientes negativos o exponentes muy elevados, por ello es necesario simplificar el problema.

En el caso de las pérdidas por corrientes parasitas, al ser estas las más representativas a altas frecuencias, muchos autores han desarrollado métodos para poder hallar estos valores, los cuales se basan en asumir que las partículas de refuerzo magnético tiene la forma de un sólido geométrico regular, en este caso, al tener partículas equiaxiales se puede considerar a las partículas de refuerzo como esferas y representarlas en función de su radio equivalente, con lo que se puede hallar teóricamente el valor de las pérdidas intragranulares utilizando calculo integral. Para el cálculo de las pérdidas intergranulares es necesario indicar que en el caso de las probetas fabricadas en la presente experiencia se tiene una separación considerable entre partículas de refuerzo, por ello la cantidad de caminos eléctricos por donde puedan circular las corrientes parasitas intergranulares es mínima, por ello se consideran menores que las pérdidas intragranulares. En conclusión, en el

presente trabajo se presenta el cálculo de las pérdidas parasitas intragranulares para poder restarla de las demás perdidas, con el fin de realizar el ajuste de curvas entre las pérdidas por histéresis y las perdidas por exceso.

Las pérdidas parásitas intragranulares en un ciclo se calculan de la siguiente manera mediante fórmulas derivadas del cálculo integral que asume partículas esféricas de refuerzo distribuidas uniformemente en el espacio:

$$P_{par} = \frac{1}{f} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{r_{fe}^2}{10 \rho_{fe}} \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 . dt$$

Donde:

- $r_{fe}$  es el radio equivalente medio de las partículas de refuerzo
- $\rho_{fe}$  es la resistividad del Fe puro.

Es posible reemplazar la ley de Faraday para obtener lo siguiente:

$$P_{par} = \frac{r_{fe}^2}{f \cdot 10 \rho_{fe}} \int_{t_0}^{t_0+T} (e(t))^2 . dt$$

Es posible resolver lo anterior mediante sumatorias de Riemann de los valores de la tensión inducida registrada por el CH1 del osciloscopio, además se considera el valor de 14.21  $\mu\text{m}$  hallado anteriormente como diámetro equivalente promedio de los refuerzos utilizados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Estudios Preliminares

##### 3.1.1 Resultados

El circuito realizado para poder caracterizar estas probetas previas fue el mismo, siendo la única diferencia el uso de resistencias de mayores valores (13, 25, 37 y 49 ohm) lo que impide un alto amperaje en la prueba y por ello se tienen menores intensidades de campo e inducciones a las registradas en las experiencias finales, el análisis de los datos fue realizado en Excel y se presentan las ondas de tensión y corriente en función del tiempo obtenidos respectivamente a través del canal 1 (CH1) y canal 2 (CH2) del osciloscopio (Figura 22).

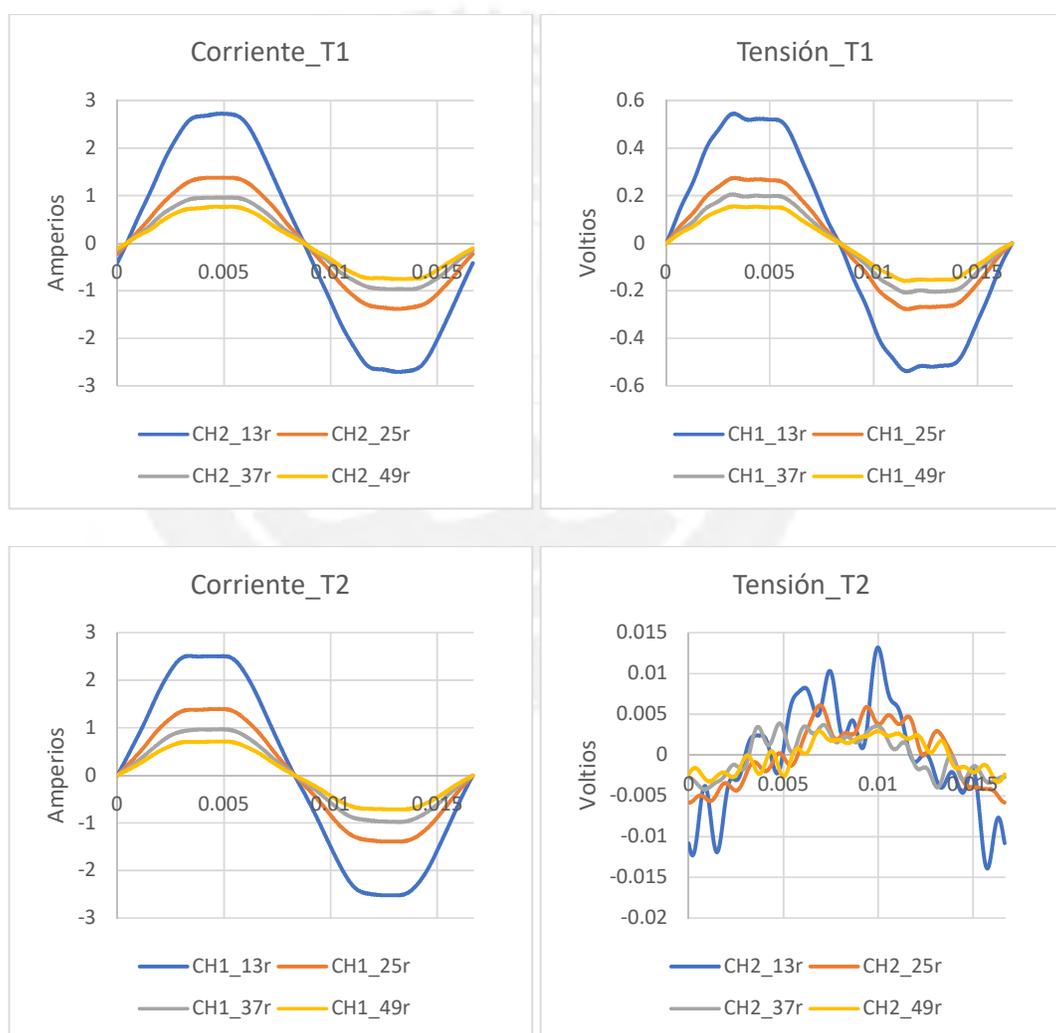


Figura 20: Corrientes y tensiones en pruebas preliminares

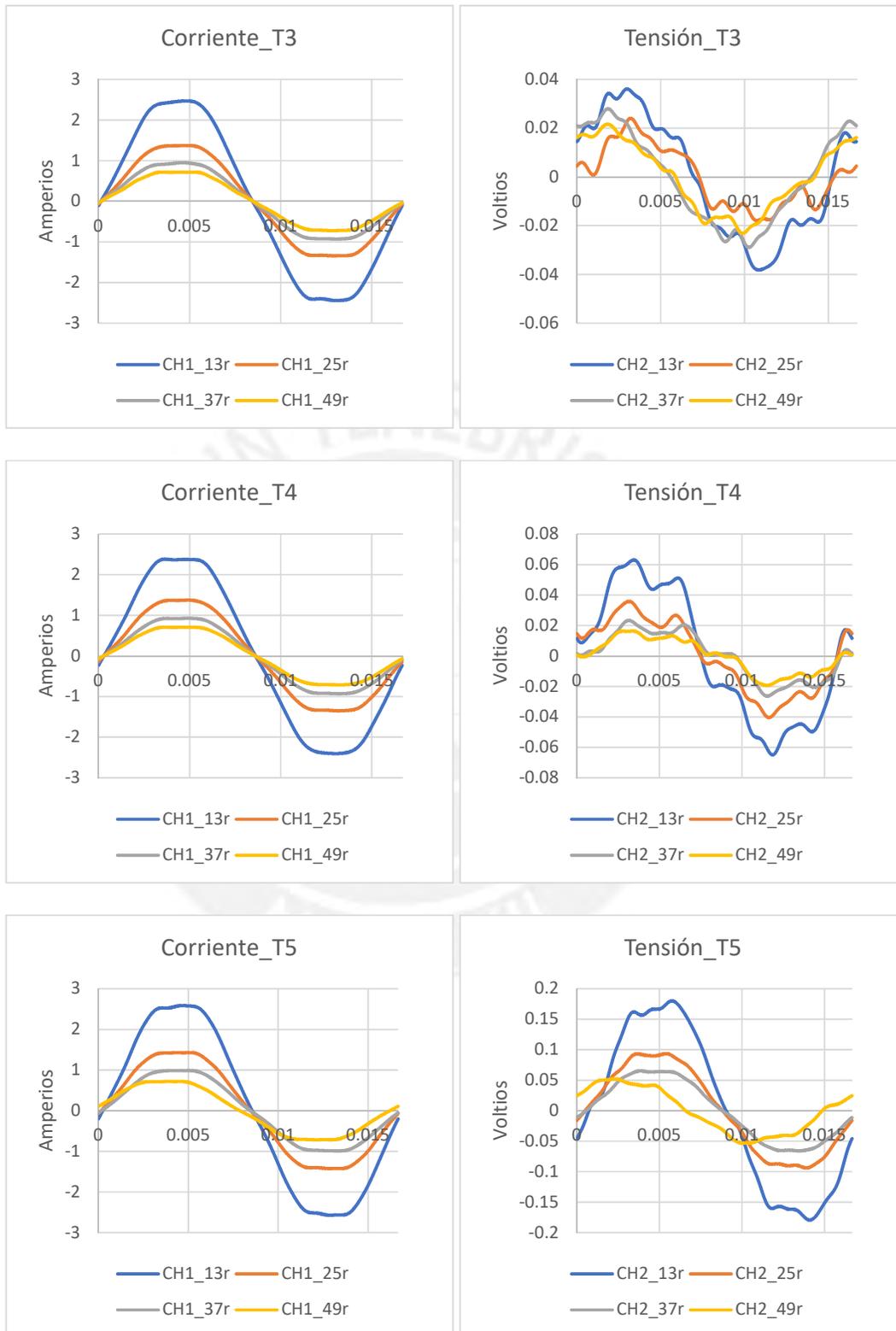


Figura 21: Corrientes y tensiones en pruebas preliminares (continuación)

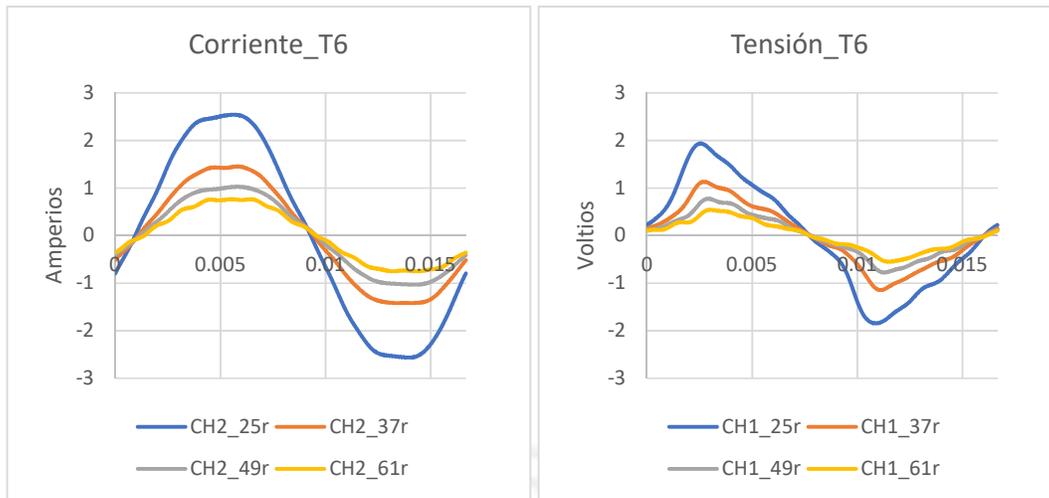


Figura 22: Corrientes y tensiones en pruebas preliminares (continuación)

Las imágenes mostradas en la Figura 22 permiten observar el comportamiento de la corriente y la tensión en un circuito eléctrico que incluye un elemento magnético el cual genera distorsiones, a pesar de las diferencias en la composición de las probetas analizadas, cuyos porcentajes de refuerzo no siguen ninguna progresión, es necesario observar y anotar lo siguiente:

- Si se ordena la concentración de refuerzo desde el 0% hasta el 100%, como muestra la Figura 23, se obtiene un aumento de la permeabilidad magnética de la probeta el cual se refleja en la mayor transmisibilidad de la tensión de entrada, registrándose mayores valores de tensión en el devanado secundario.

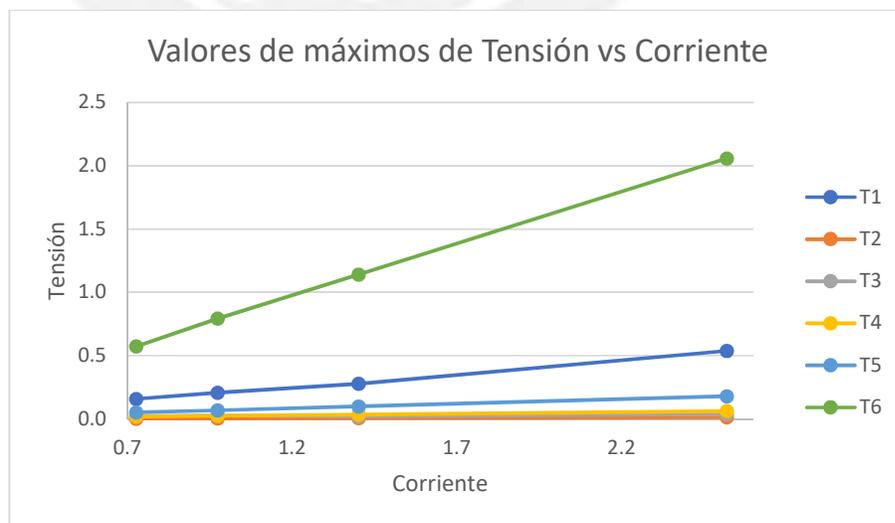


Figura 23: Valores máximos de tensión

- Se observa una mayor distorsión en las ondas de las probetas con menor concentración, lo que se identifica en las gráficas con la forma de la onda, en los casos de menor concentración la forma de onda se aleja de la senoidal, siendo esta distorsión máxima en la probeta T2 que tiene una concentración de refuerzo de 0%.
- En la probeta T6 (concentración de refuerzo de 100%) se observa una distorsión mayor que en la probeta T1 (concentración de refuerzo de 33%), esto es debido a que la probeta T6 está hecha por un bloque de metal continuo, configuración que promueve la formación de corrientes parásitas que a su vez generan un campo desmagnetizante el cual es el principal responsable de las distorsiones observadas; la probeta T6 a pesar de tener la distorsión mencionada registra la mayor tensión en el devanado secundario. Una prueba de las corrientes parásitas formadas en la prueba de esta probeta es el aumento de temperatura ocurrido durante la aplicación de la corriente en el devanado primario.
- En cada caso la corriente permanece invariable pues es la característica del ingreso de electricidad, la cual no se ve afectada por la presencia del cuerpo magnético, sino solamente por el valor de la resistencia variable tal que se presentan mayores corrientes a con menores valores de resistencia en el circuito.

A partir de los datos registrados por el osciloscopio (corrientes y tensiones), mostrados líneas arriba y considerando la geometría de las probetas probadas se calculan la inducción e intensidad de corriente en cada caso y a partir de ellas formar las curvas de histéresis mostradas en la Figura 24.

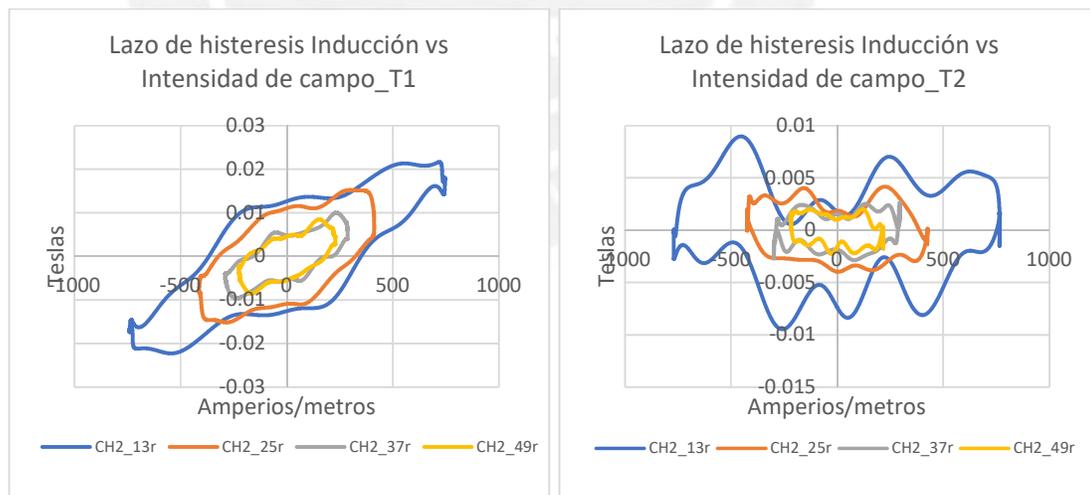


Figura 24: Curvas de histéresis en pruebas preliminares

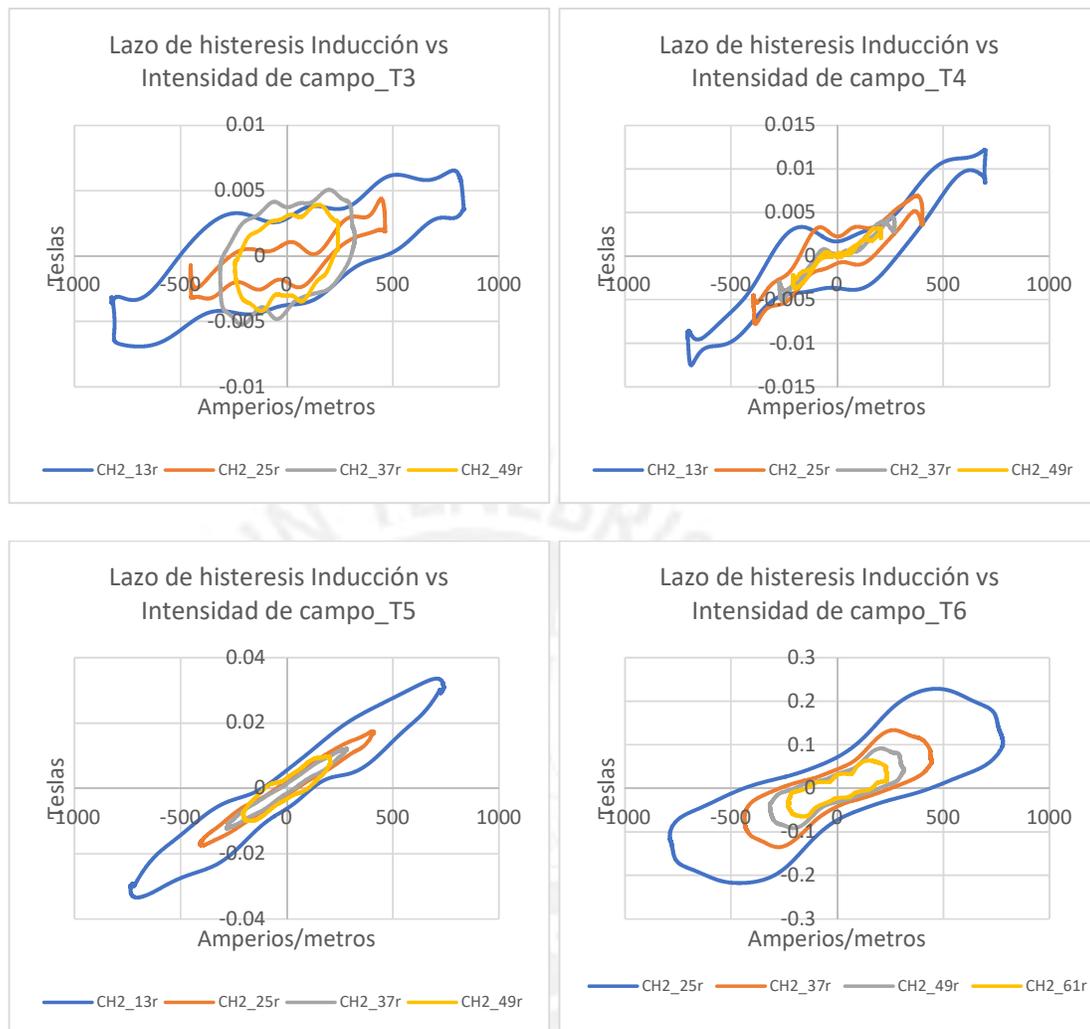


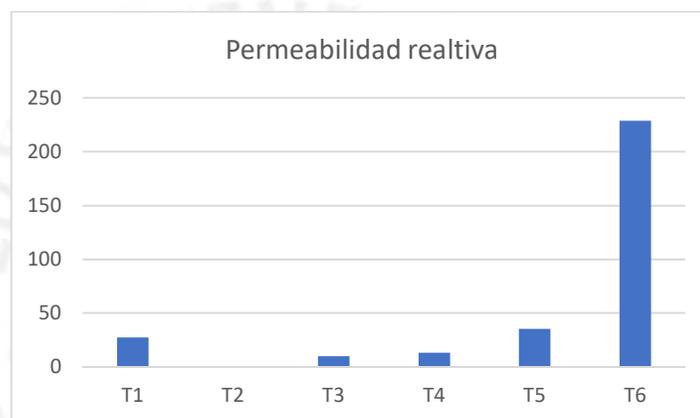
Figura 24 Curvas de histéresis en pruebas preliminares (continuación)

Con respecto a las curvas de la Figura 24 se anota lo siguiente:

- El valor máximo de inducción registrados en las probetas conformadas con SMC de la probeta T1, que presenta una concentración de refuerzo de 33%, es 0.1T, el cual es un valor relativamente alto que escapa de la linealidad que presentan las probetas T3, T4 y T5, siendo relativamente mayor.
- Se puede observar también en estas curvas la ya mencionada distorsión que disminuye con el aumento de la concentración de refuerzo.
- Se puede observar la característica magnética suave de los SMC estudiados, en cada caso los alzos de histéresis son delgados, es decir encierran un área menor que un cuerpo de característica magnética dura.

- Es posible observar en el caso de la probeta T6, esta característica no es tan evidente podría decirse que se trata de un cuerpo cuya característica magnética es dura, sin embargo, es necesario anotar que las pruebas se hicieron utilizando corriente alterna en la entrada, motivo por el cual los lazos de histéresis incluyen el efecto de las corrientes parásitas, el cual en el caso de un bloque de metal no son despreciables, este es el causante de que las curvas de histéresis de la probeta T6 no se vea correspondiente a un cuerpo magnéticamente suave.

Uno de los datos más importante que se pueden obtener a partir de los gráficos de histéresis es la permeabilidad, la cual se halla con la tangente del ángulo polar del punto más alejado del centro de la gráfica, estos datos se muestran en la Figura 25.



*Figura 25: Permeabilidad relativa, experiencia previa*

Es posible observar lo siguiente:

- En la gráfica se muestra un promedio de las permeabilidades relativas obtenidas en cada toma de datos, pues tienen valores similares entre sí para cada probeta.
- La probeta T6 tiene un mayor valor debido a que está formada por un bloque continuo del material de refuerzo, sin embargo, el valor obtenido está afectado por las altas corrientes parásitas explicadas para esta probeta en párrafos anteriores, sin embargo, el valor es coherente con los teóricos.
- Entre los SMC, la probeta T5 tiene el máximo valor de permeabilidad relativa, sin embargo, es muy probable que esto sea efecto del ruido obtenido en las probetas de menor concentración de refuerzo sumado a la diferencia en las características del refuerzo entre la probeta T1 y las T3. T4 y T5 que fueron realizadas después. Teóricamente la probeta T1 debería tener una mayor permeabilidad relativa debido a su mayor concentración de refuerzo.
- El valor de la permeabilidad relativa de la probeta T2 es afectado por el alto contenido de ruido en estas medidas, en la gráfica e ha considerado en valor teórico de 1 para una probeta formada por un material paramagnético.

Las pérdidas totales se obtienen de los datos de corriente y tensión, y se resumen en la Figura 26.

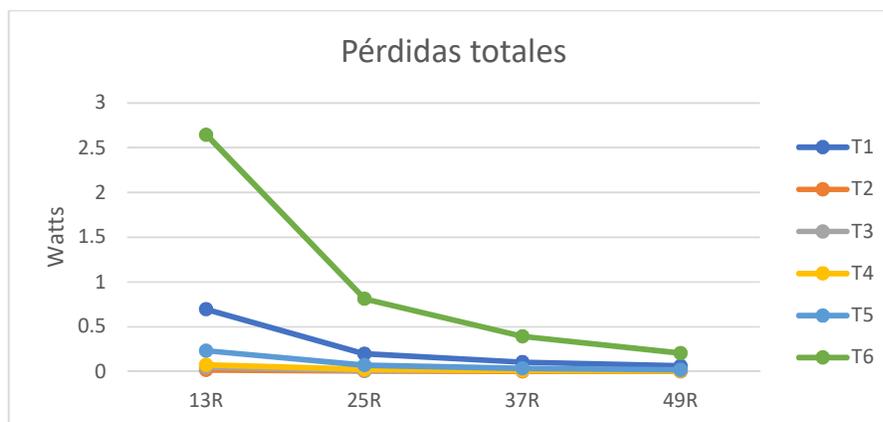


Figura 26: Pérdidas totales en experiencia previa

De la Figura 26 se puede observar lo siguiente:

- Las mayores pérdidas se obtienen en la probeta T6, y en el caso de las probetas hechas con SMC se tiene que la probeta T5 tiene mayores pérdidas, esto por los mismos motivos de su alta permeabilidad relativa.
- Las pérdidas tienden a una dependencia directa con la concentración de refuerzo.

### 3.1.2 Observaciones

Las principales observaciones realizadas a partir de estas pruebas previas se enuncian a continuación:

- La matriz utilizada en un primer momento fue resina epóxica puesto que se tiene experiencia en su utilización, principalmente en aplicaciones eléctricas, sin embargo, solo era posible utilizar esta matriz para realizar probetas con máxima concentración de refuerzo, debido a que, al tratar de realizar probetas con menores cantidades de refuerzo, éste terminaba depositándose en el fondo del molde obteniendo dos fases diferenciadas en el material compuesto. Esto no era útil debido a que se esperaba tener una dispersión uniforme del refuerzo en todo el volumen de la probeta.
- La segunda matriz empleada en esta experiencia previa soluciona el problema expuesto en el párrafo anterior, se utilizó masa de cerámica en frío, la cual permitió una distribución uniforme del refuerzo en el volumen de la probeta, sin embargo, no admitía grandes cantidades de refuerzo sin perder las propiedades físicas que permitían un fácil moldeo.
- Las concentraciones de refuerzo van de un 100% (probeta T2) hasta un 0% (probeta T6), sin embargo, estas concentraciones no tienen una progresión a razón fija de ningún modo, lo cual dificulta la visibilidad de tendencias y la posibilidad de sacar conclusiones.

- Se sabe que la capacidad de un metal ferromagnético de ser un buen conductor de flujo magnético, es decir los valores de permeabilidad y de pérdidas de energía dentro de los ciclos de magnetización generados por una corriente alterna, se ve afectada con la cantidad de defectos en la red cristalina, el tamaño y la deformación de los granos en la microestructura del material producidos por los esfuerzos realizados para extraer la viruta de la pieza metálica maquinada, las cuales no han sido determinadas en las virutas metálicas usadas como refuerzo afectando así la repetitividad de la experiencia.
- Tras la culminación de la presente experiencia, realizada con el circuito indicado en la norma ASTM A927, se confirmó la necesidad de reemplazar los equipos indicados en la norma por un osciloscopio, el cual brinda una mayor sensibilidad en la medición y la posibilidad de obtener el comportamiento de las variables eléctricas involucradas en la prueba a razón de un millón de mediciones por segundo.
- Un tema importante es el grosor del conductor empleado, en esta primera experiencia se utilizó alambre esmaltado 20AWG el cual resultó ser innecesariamente grueso, dificultando el proceso de devanado de la probeta, tras la experiencia previa se determina que este alambre puede ser reemplazado por uno más delgado tal que pueda maniobrarse con mayor facilidad.
- Los resultados y observaciones realizadas en la prueba previa están afectadas por la diferente naturaleza de los insumos usados para la formación del material magnético, tanto las dos matrices utilizadas y el procesamiento del refuerzo en diferentes tiempos (lo que no garantiza uniformidad) en los SMC.

### 3.2 Análisis de imágenes SEM

Se extrajo una porción de las probetas toroidales (Figura 27) con el fin de examinar la distribución del refuerzo en la sección transversal de las mismas, se tomaron imágenes a 40 aumentos, se analizó el tamaño promedio de partícula de refuerzo a usando el software libre ImageJ obteniendo lo descrito en la Tabla 8.



*Figura 27: Toma de muestras de las probetas toroidales para la toma de imágenes SEM*

Tabla 8: Descripción física promedio de partículas de refuerzo obtenidas por análisis de imagen

# medida	Cantidad	Área total ( $\mu\text{m}^2$ )	Tamaño promedio ( $\mu\text{m}$ )	Diámetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )
1	1459	1227157.327	841.095	16.362
2	578	297047.311	513.923	12.790
3	231	79274.285	343.179	10.451

Así mismo se tomó una imagen con el SEM en donde se realizó la medida de algunas partículas, obteniendo lo mostrado en la Figura 28.

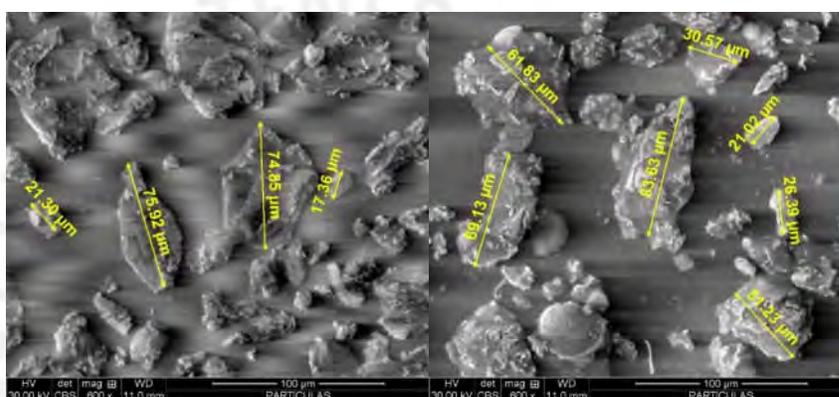


Figura 28: Medidas de partículas de refuerzo tomadas manualmente en el SEM

Se puede observar que las medidas de la Tabla 8 y las de la Figura 28 son del mismo orden lo cual sirve como una comprobación de la efectividad del software de análisis de imágenes utilizado, por ello se tomará como diámetro equivalente promedio de partícula el promedio ponderado de los datos de la Tabla 8 obteniendo el valor de 14.21  $\mu\text{m}$ .

El dato más importante dentro de la caracterización de las probetas, muy aparte de sus propiedades magnéticas, es la concentración de refuerzo. Se tienen datos teóricos de la concentración del refuerzo utilizado al momento de realizar la mezcla de componentes y formar el material compuesto; sin embargo, se requieren datos experimentales de concentración que son usados al momento de relacionar las características magnéticas con la composición del SMC.

Los datos experimentales de concentración de refuerzo se obtuvieron a partir del análisis realizado con el software libre ImageJ a las imágenes de electrones retrodispersados a 40 aumentos obtenidas con el SEM y mostradas en la Figura 29, este tipo de imágenes presenta un contraste dependiente de la densidad de los elementos que componen la superficie analizada, por lo que son ideales al momento de distinguir el refuerzo, conformado principalmente de hierro, de la matriz polimérica y la carga cerámica compuesta por talco. Además, se tomaron imágenes superiores e inferiores de la

sección de la probeta para observar el efecto de la gravedad sobre la dispersión del refuerzo a lo largo de la altura de la probeta.

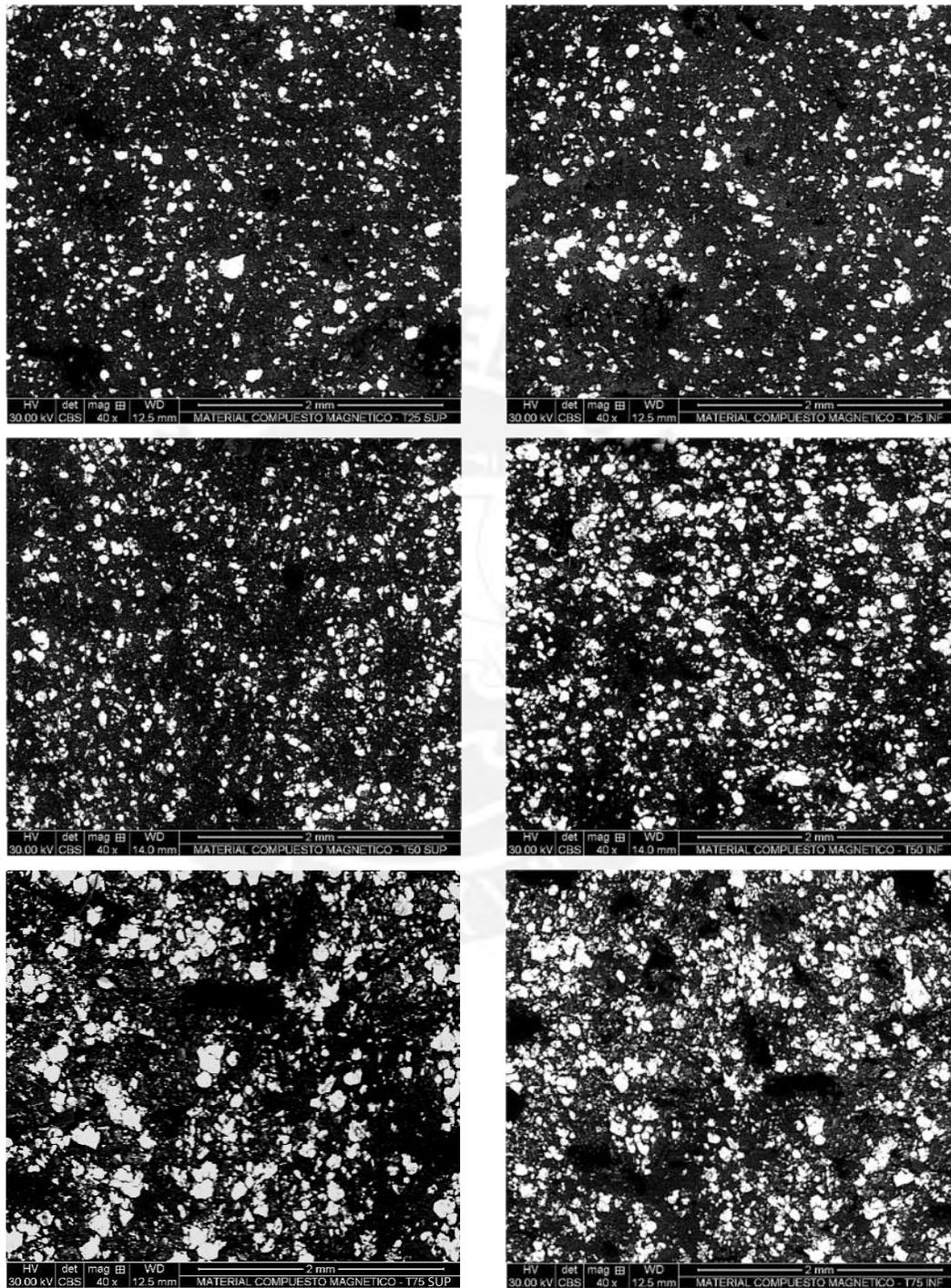


Figura 29: Imágenes de sección de probetas usando SEM en modo de electrones retrodispersados. Derecha: parte superior de la probeta, Izquierda: parte inferior

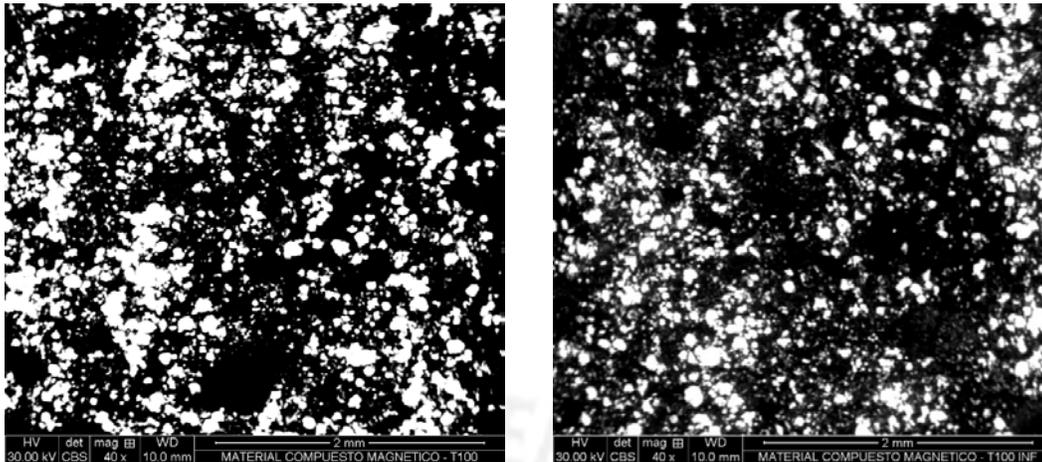


Figura 29: Imágenes de sección de probetas usando SEM en modo de electrones retrodispersados.  
Derecha: parte superior de la probeta, Izquierda: parte inferior (continuación)

Tabla 9: Concentración de refuerzo teórico y experimental

Probetas		Teóricos	Análisis de imágenes		EDS (Espectrometría de rayos X)	
		Concentración de refuerzo (%)	Concentración de refuerzo (%)	Promedio (%)	Concentración de refuerzo (%)	Promedio (%)
T 100	SUP	29.2	31.71	28.95	30.85	29.75
	INF		26.19		28.66	
T 75	SUP	22.8	21.69	25.42	25.99	23.51
	INF		29.15		21.04	
T 50	SUP	17.9	17.14	21.58	18.63	21.06
	INF		26.02		23.5	
T 25	SUP	8.8	12.88	14.08	14.35	14.53
	INF		15.27		14.71	

La Tabla 9 permite observar que los datos experimentales, tanto mediante el análisis de imágenes de electrones retrodispersados como el porcentaje en masa de Fe de la EDS, coinciden entre sí y que difieren de los datos teóricos, lo cual se le puede atribuir a un error humano al momento de realizar la mezcla de componentes o a la humectación de la carga cerámica lo cual puede haber producido una disminución en el volumen de la matriz. Los datos a considerar para futuros cálculos y comparaciones concernientes al refuerzo serán los correspondientes al análisis de imágenes.

### 3.3 Descripción de flujo eléctrico y magnético

En esta sección se presentan las gráficas de tensión inducida y corriente en el primario de las probetas fabricadas para esta experiencia (T100, T75, T50 y T25) según el circuito de pruebas planteado en 2.5.2, así mismo se presentan las gráficas de la inducción magnética B y de la intensidad de campo magnético H.

Las gráficas de tensión y corriente corresponden a las tensiones obtenidas por el osciloscopio donde el valor registrado por el CH1 es la intensidad de corriente en el primario y el valor registrado por CH2 es la tensión en el secundario o tensión inducida.

#### 3.3.1 Presentación de Tensión inducida en el secundario e Inducción Magnética

Se indicó en la sección 1.3.1 que la relación entre ambas magnitudes está dada la ley de Faraday, por ello ambas gráficas se presentan juntas para los diferentes valores de la resistencia variable. Se observa un desfase entre ambas funciones de un cuarto de periodo ó 0.041667 segundos lo cual es producto de la derivada de una función periódica.

En la Figura 30 se muestran la tensión inducida obtenida a partir del CH2 del osciloscopio, obteniendo diversos registros mediante la variación de la resistencia variable (desde 0.5 ohm a 13 ohm) que integra el circuito eléctrico del devanado primario, y la inducción magnética, parámetro magnético obtenido indirectamente a través de cálculos que incluyen la tensión inducida y la geometría de la probeta analizada.

Además, es posible observar que las formas de las gráficas de todas las tensiones inducidas son semejantes, así mismo todas las inducciones magnéticas entre sí, por ello es mejor representar cada magnitud por un valor característico, ya sea valor rms o máximo.

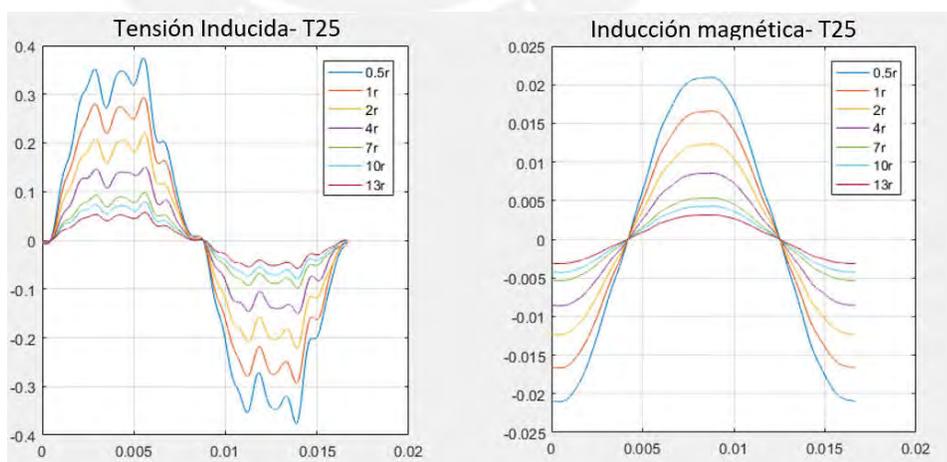


Figura 30: (Izquierda) Tensión inducida. (Derecha) Inducción electromagnética

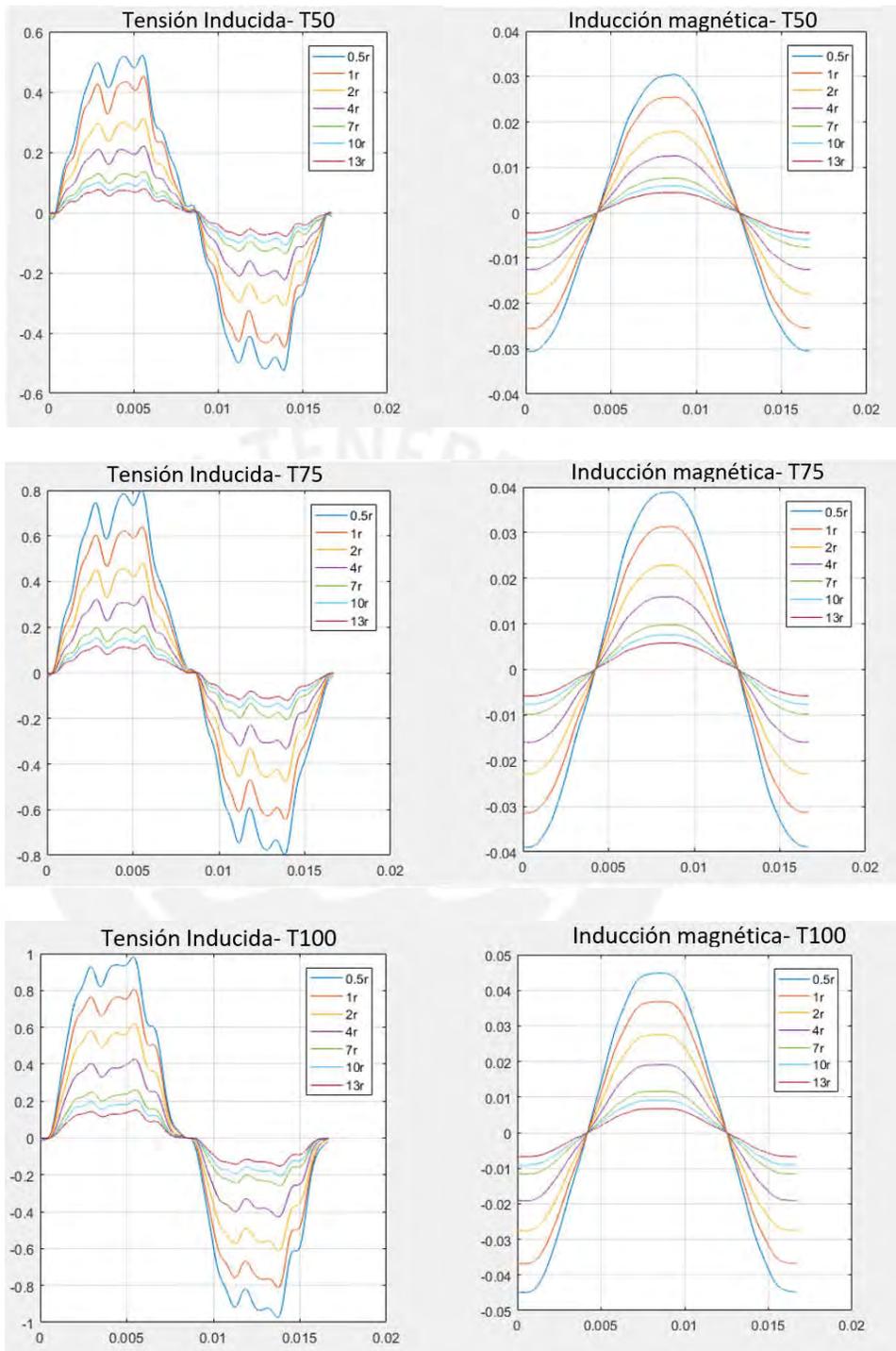


Figura 30: (Izquierda) Tensión inducida. (Derecha) Inducción electromagnética (continuación)

### 3.3.2 Presentación de Intensidad de corriente en el primario e Intensidad de campo magnético

Según lo indicado en la sección 1.3.2, la intensidad de campo magnético es proporcional a la intensidad de corriente, por ello ambas se encuentran en fase, además se puede observar en ambas gráficas que las funciones representadas tienen un bajo contenido de armónicos.

En la Figura 31 se muestran la intensidad de corriente eléctrica en el devanado primario obtenida a partir del CH1 del osciloscopio, obteniendo diversos registros mediante la variación de la resistencia variable (de 0.5 ohm a 13 ohm) que integra el circuito eléctrico del devanado primario, y la intensidad de campo magnético, parámetro magnético obtenido indirectamente a través de cálculos que incluyen la intensidad de corriente eléctrica en el devanado primario y la geometría de la probeta analizada.

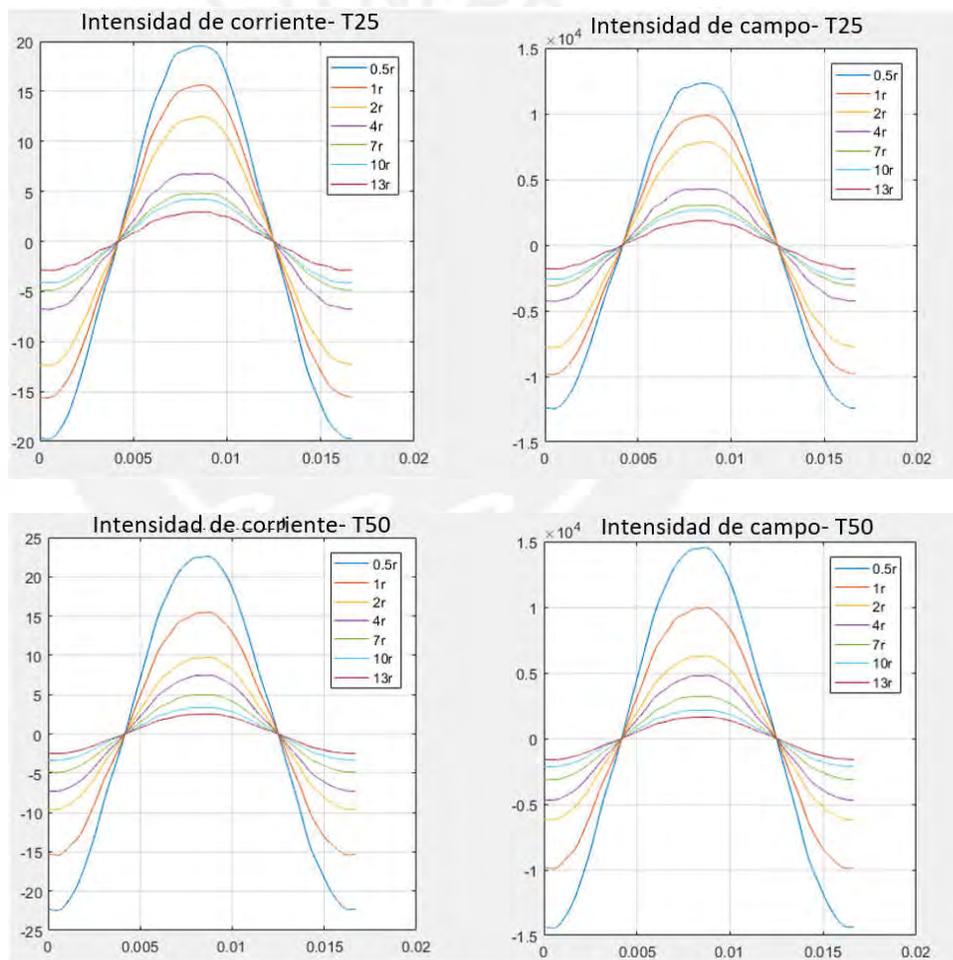


Figura 31 (Izquierda) intensidad de corriente eléctrica (Derecha) Intensidad de campo magnético

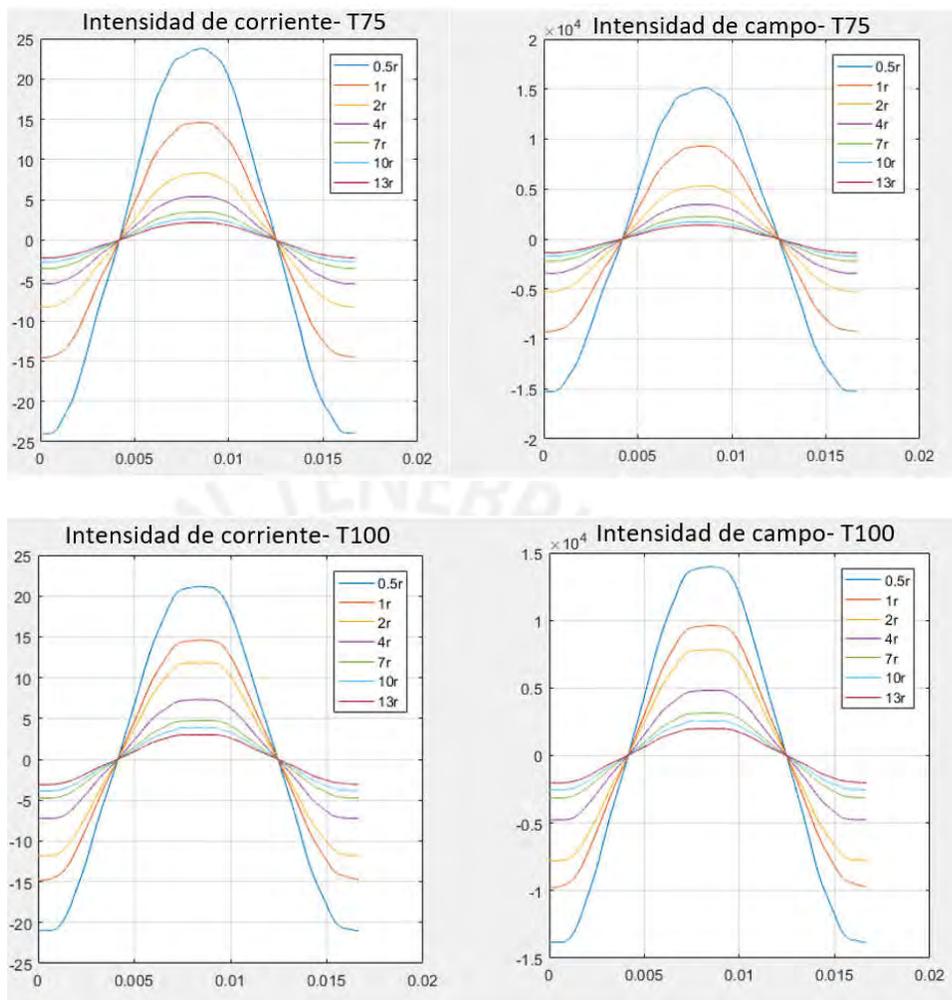


Figura 30. (Izquierda) intensidad de corriente eléctrica (Derecha) Intensidad de campo magnético (continuación)

### 3.3.3 Valores máximos de las magnitudes del flujo eléctrico y magnético

Los fenómenos estudiados en este trabajo de investigación se caracterizarán por los valores máximos de las funciones mostradas en los subtítulos anteriores, estos se resumen en las presentes gráficas resume lo indicado en la Figura 30 y la Figura 31.

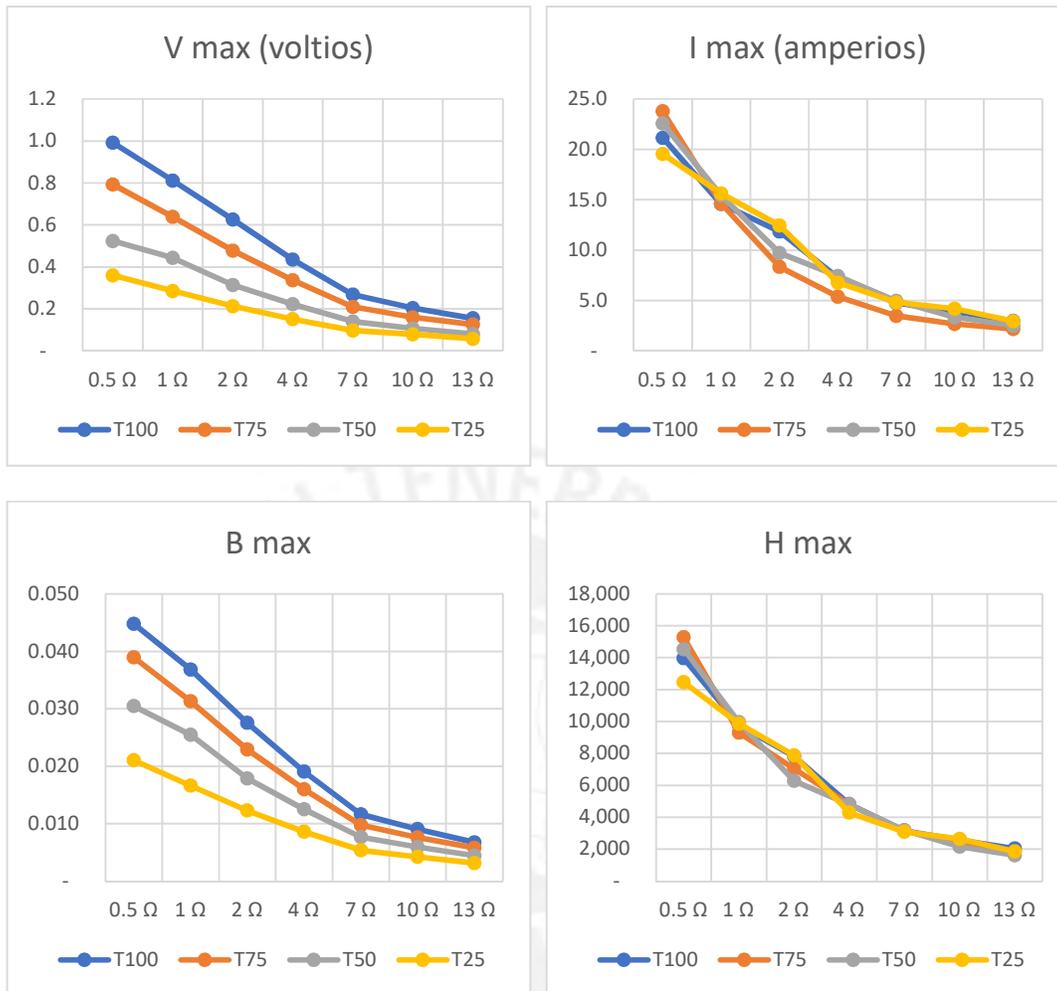


Figura 32: Variables eléctricas y magnéticas máximas en función del valor de la resistencia variable

Se puede observar que la tensión máxima expresada en la Figura 32-superior izquierda se tiene el mismo comportamiento para cada probeta, la corriente Figura 32-superior derecha obtenida solo depende del valor de la resistencia variable en el circuito y obedece a la ley de ohm, se puede deducir que el valor de la inductancia de nuestra probeta toroidal es muy pequeño en comparación con el valor de la resistencia variable del circuito de prueba y por ello no genera ningún efecto en el circuito.

En el caso de la tensión inducida en el devanado secundario, es posible observar que su valor depende directamente de la concentración revelando la dependencia entre concentración y propiedades magnéticas de un SMC.

Analizar estos valores es un trabajo previo a lo requerido por la norma, sin embargo, nos da una idea clara del comportamiento del campo magnético dependiente de la concentración de refuerzo.

Se debe anotar que los valores de intensidad de campo magnético obtenidos son del mismo orden que los mostrados en diversas experiencias con SMC, consideración que se tuvo en cuenta al dimensionar las probetas, sin embargo, la inducción magnética obtenida tiene valores muy pequeños en todos los casos. Se realizarán las comparaciones que demuestran lo dicho en el presente párrafo cuando se hable del lazo de la magnetización

Adicionalmente es posible crear gráficas en base a la THD de cada función.

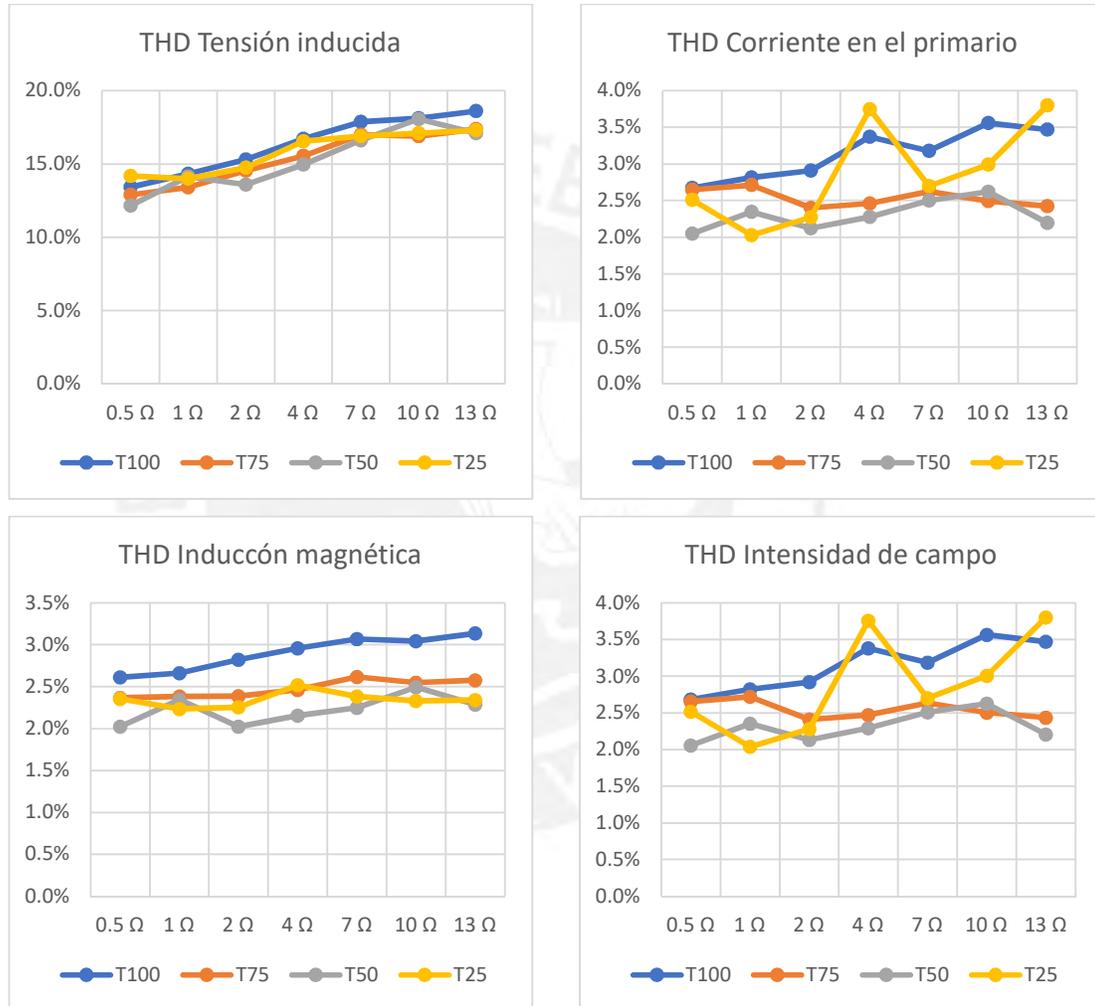


Figura 33: Distorsión armónica total de variables eléctricas y magnéticas

Con los valores de la THD es posible cuantificar la distorsión armónica de una función periódica, en este caso es posible concluir que en promedio la THD de la tensión inducida (Figura 33-superior izquierda) es 5 veces mayor a las otras magnitudes, además los valores de THD de las demás gráficas de la Figura 33 tienen el mismo orden de magnitud entre sí, esto se debe a que el valor de la tensión corresponde a la razón de cambio de la inducción con respecto al tiempo.

### 3.4 Caracterización magnética

El proceso de magnetización es estudiado a partir de la inducción magnética y de la intensidad de campo magnético obtenidas indirectamente de las lecturas del osciloscopio.

El proceso de magnetización puede analizarse de dos modos: En la norma ASTM A927 se indica cómo obtener características magnéticas utilizando corriente alterna; sin embargo, estas características dependen de la frecuencia por ello debe de indicarse a que frecuencia fueron realizadas estas pruebas. En la norma ASTM A596 se describe el método balístico para hallar las propiedades magnéticas en DC así como la instrumentación necesaria; sin embargo, las propiedades magnéticas en DC suelen ser halladas a partir de pruebas similares a las de la norma ASTM A927 a distintas frecuencias e interpolando a la frecuencia cero. La presente investigación utiliza la norma ASTM A927 a 60Hz.

#### 3.4.1 Lazos de histéresis

Los lazos de histéresis se obtienen al realizar una gráfica paramétrica de la función inducción de campo magnético versus la función intensidad de campo magnético, ambas dependientes del tiempo.

Los lazos de histéresis permiten diferenciar si un material magnético es "suave" o "duro" en base a los valores de remanencia y coercitividad, que son los puntos donde el lazo intercepta a los ejes, cuando estos valores son pequeños en comparación con los valores máximos del lazo, se dice que el material es suave, sin embargo, los límites no están normados sino más bien son cuestión de criterio. Además, el área delimitada por el lazo de histéresis en AC es numéricamente igual a las pérdidas totales por unidad de volumen, hecho que es sencillo de demostrar matemáticamente.

En los lazos de histéresis obtenidos se puede apreciar a simple vista que son materiales magnéticos de baja remanencia y coercitividad por lo que los SMC desarrollados en la presente investigación es en efecto magnéticamente suave, así mismo tienen una mínima área encerrada lo que indica que las pérdidas magnéticas son pequeñas en el rango analizado.

En la bibliografía cada trabajo realizado sobre los SMC se acompaña de un gráfico del lazo de histéresis del material estudiado; sin embargo, en la mayoría de casos estos gráficos no están expresados en las unidades electromagnéticas racionalizadas del SI, pues no son de la inducción (B) en Tesla (T) versus la intensidad de campo (H) en Amperio sobre metro (A/m), Figura 34, sino son gráficos de otra magnitud llamada magnetización (M) del material la cual se mide en unidad electromagnética por gramo (Emu/g) versus la intensidad del campo magnético (H) en oersted (Oe) que corresponde a las unidades electromagnéticas gaussianas, pertenecientes al sistema de unidades CGS, Figura 35. Un gráfico M versus H también permite ver un lazo de histéresis.

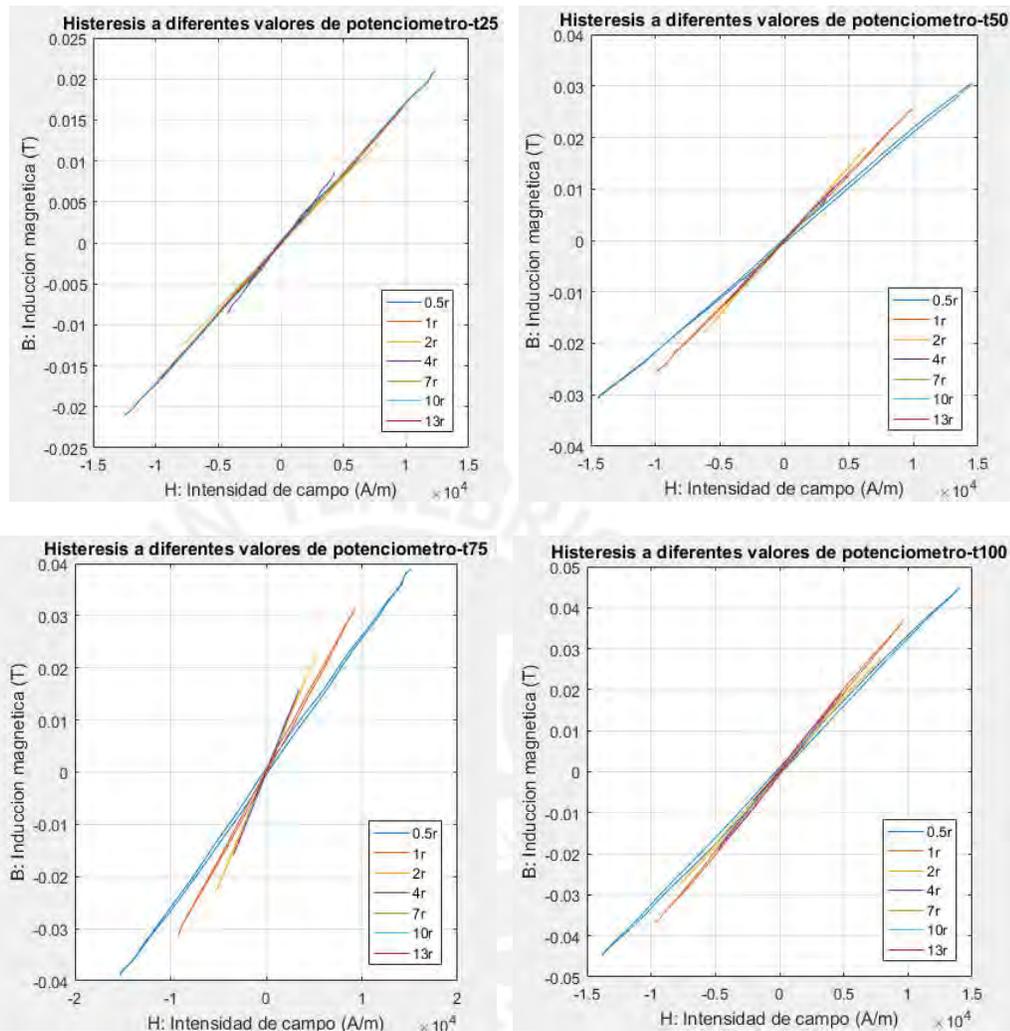


Figura 34: Lazos de histéresis B vs H por cada valor de resistencia variable

La inducción magnética, la intensidad de campo y la magnetización de un material se relacionan como se indica a continuación:

$$B = \mu_0 \cdot (M + H)$$

Para realizar la transformación entre unidades electromagnéticas racionalizadas del SI y unidades electromagnéticas gaussianas usadas por otros investigadores para expresar las propiedades magnéticas de los materiales se debe considerar lo siguiente:

$$M_{emu/gr} = \frac{M_{A/m}}{1000 \cdot d_{gr/cm^3}}$$

$$H_{Oe} = \frac{4\pi}{10000} \cdot H_{A/m}$$

Para poder realizar comparaciones entre los lazos de histéresis de SMCs estudiados por otros investigadores con las probetas realizadas en el presente trabajo, estas últimas estarán representadas por su mayor lazo de histéresis, es decir, cuando la R variable del circuito de prueba es 0.5ohm, esta comparación se realiza en dos escalas para poder apreciar los detalles importantes de todas las gráficas.

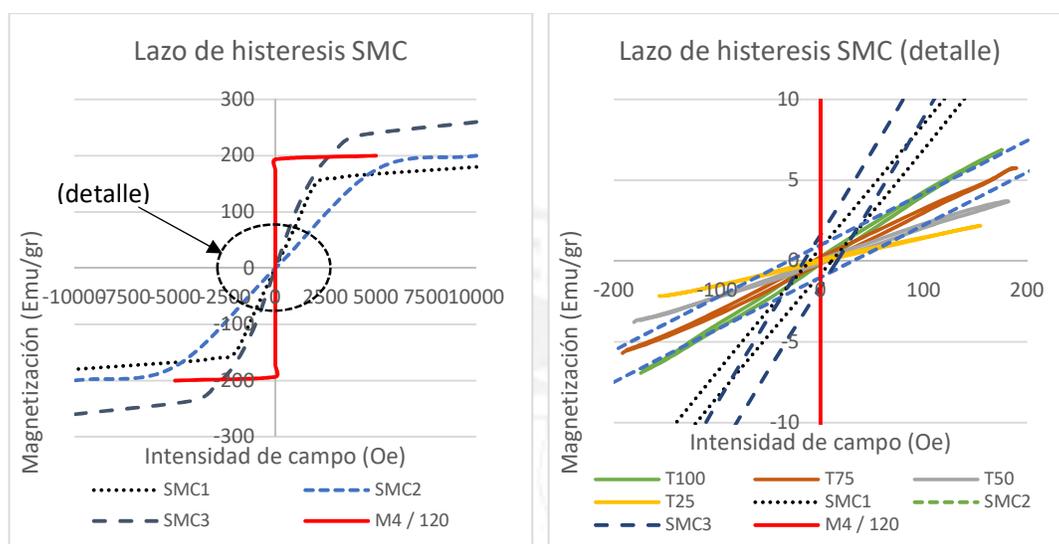


Figura 35: Lazos de histéresis de diversos SMC.

De los gráficos es posible observar que la intensidad de campo magnético exterior usada en las pruebas de esta experiencia son muy inferiores en magnitud que las usadas para obtener las características magnéticas de los SMC 1 (Taghvaei, et al., 2009), SMC 2 (Zhao, et al., 2016) y SMC 3 (Xu, et al., 2015), mayormente los investigadores de este campo utilizan equipos diseñados para medir propiedades magnéticas que generan campos intensos sobre los materiales a probar, debido a lo anterior las inducciones en las probetas analizadas también son de pequeña magnitud. Tal es así que los lazos de histéresis de las probetas fabricadas y las correspondientes a las experiencias previas no pueden verse completamente a una misma escala. Además, la curva roja corresponde al acero eléctrico de calidad M4/120 (Corporation, 2013), uno de los más comunes en nuestro medio, es decir un material ferromagnético continuo utilizado en la manufactura de máquinas eléctricas, puede observarse que el área que encierra esta curva no es notorio en la gráfica por ser muy pequeño.

### 3.4.2 Saturación del material

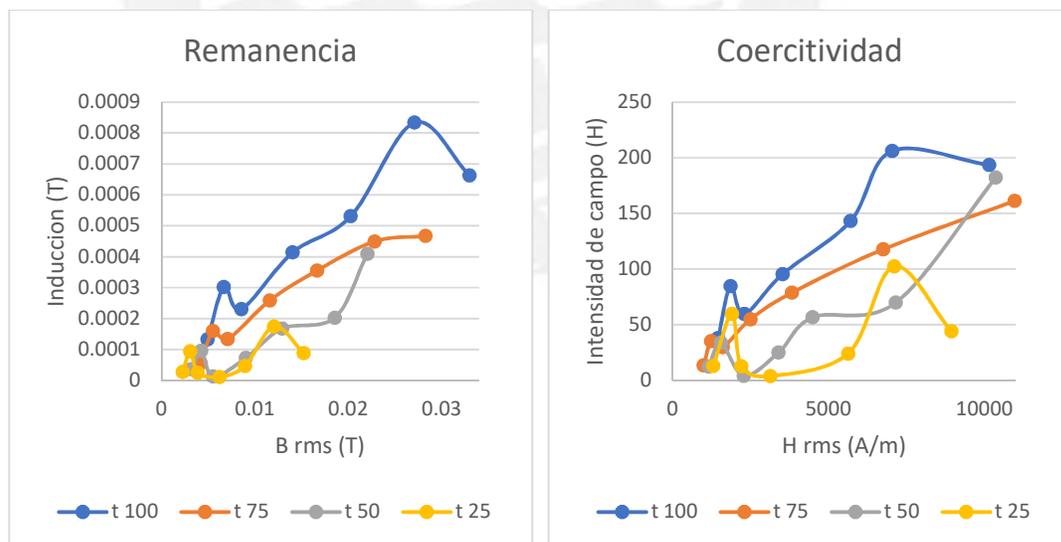
En los lazos de histéresis de los trabajos anteriores, es posible observar claramente la saturación de los materiales, sin embargo, en el caso de las probetas fabricadas en esta experiencia no es posible porque el punto de saturación escapa del rango analizado. Si es posible observar una dependencia en cuanto a la máxima inducción obtenida, esta disminuye con la concentración de refuerzo, pueden

observarse efectos similares en otros trabajos (Fan, et al., 2015) ( Peng, et al., 2016) donde compara SMC con distintos espesores de recubrimiento cerámico teniéndose el mismo comportamiento. Al observarse el caso del acero eléctrico M4/120, que puede considerarse como un material con fracción volumen de refuerzo igual a 100%, se aprecia coherencia con el comportamiento anterior pues se requiere una menor intensidad de campo magnético para alcanzar la saturación del material.

### 3.4.3 Remanencia y coercitividad

Dentro de este rango pequeño de inducciones e intensidades de campo pueden determinarse la remanencia y coercitividad de los cuerpos estudiados. La remanencia y coercitividad son datos notables del lazo de histéresis, gráficamente se puede verlo como los interceptos del gráfico con sus ejes (inducción e intensidad de campo magnético), además se puede definir individualmente según su significado físico siendo la remanencia la inducción magnética resultante de magnetizar el material con una intensidad de campo definida y retirar la fuente del campo magnético y la coercitividad la intensidad de campo necesaria para eliminar la remanencia aplicada en sentido contrario a la fuente original.

En el caso estudiado al graficar la remanencia y la coercitividad en función de inducción y la intensidad de campo respectivamente, como se muestra en la Figura 36, se tienen comportamientos similares pues ambas características dependen directamente de la concentración del refuerzo magnético, esta dependencia también se observa en los SMC de la bibliografía.



*Figura 36: Remanencia y coercitividad en función de la inducción e intensidad de campo respectivamente*

### 3.4.4 Curva de magnetización AC

Según la norma ASTM A927 tomada como referencia, la curva de magnetización AC consiste en graficar el valor de la inducción máxima alcanzada en cada toma de datos, en función de su correspondiente intensidad de campo magnético máximo, debido a la dependencia de ambos estos corresponden al punto más alejado del origen en el lazo de histéresis, para el caso estudiado se muestra en la Figura 37.

Esta gráfica permite observar con mayor claridad lo indicado en las gráficas de lazo de histéresis, pues se observa que, para una misma intensidad de campo magnético, la inducción depende de la concentración de refuerzo. Visto desde otra perspectiva, cuando se tiene una menor concentración de refuerzo se requiere un campo magnético exterior más intenso para conseguir la misma inducción.

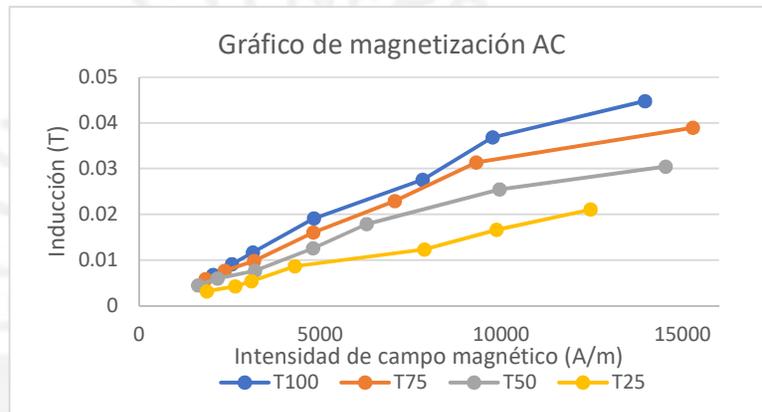


Figura 37: Gráfico de magnetización AC

La curva de magnetización de un material magnético denota un comportamiento no lineal entre la inducción y la intensidad de campo, por ello para poder estudiarlo es conveniente diferenciarla en tres partes según su inducción, la primera parte conocida como magnetización inicial corresponde a la zona de baja inducción, donde la inducción tiene una dependencia cuadrática con respecto a la intensidad de campo, la segunda parte tiene un carácter lineal y después de un llamado "codo" se tiene la zona de saturación del material de comportamiento logarítmico.

En el caso de la presente experiencia, los análisis realizados corresponden a la zona de pequeñas inducciones, por lo que es posible describir las curvas de magnetización según lo siguiente:

$$B = \mu_0 \mu_i^r H + \mu_0 \gamma H^2$$

Donde:

- $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío
- $\mu_i^r$  es la permeabilidad relativa inicial
- $\gamma$  es la constante de Rayleigh

Donde se pueden encontrar los parámetros  $\mu_i^r$  y  $\gamma$  mediante ajuste de curva como en casos anteriores, tal que se tiene lo siguiente para todos los casos de magnetización:

*Tabla 10: Parámetros de la curva de magnetización para baja inducción en distintos materiales*

	<i>T25</i>	<i>T50</i>	<i>T75</i>	<i>T100</i>	<i>Fe80</i>	<i>Fe90</i>
$\mu_i^r$	1.379	2.453	3.046	3.26	45.4	52.5
$\gamma_{(m/A)}$	$4.13 \cdot 10^{-6}$	$5.18 \cdot 10^{-5}$	$6,39 \cdot 10^{-5}$	$4.69 \cdot 10^{-5}$	0.066	0.097

Las últimas dos columnas de la Tabla 10 corresponde a dos de los SMC analizados en parte de la bibliografía (Kollar, et al., 2014) en donde se estudian las propiedades magnéticas de diversos SMC a bajas inducciones, ambos SMC tienen partículas de refuerzo con un diámetro equivalente de 110 $\mu$ m, y tienen concentraciones o volúmenes porcentuales de refuerzo de 80% y 90% respectivamente.

Se puede observar en todos los casos de la Tabla 10 que la permeabilidad inicial  $\mu_i^r$  y la constante de Rayleigh  $\gamma$  tiene entre sí una diferencia notable en ordenes de magnitud, siendo  $\mu_i^r$  mayor en todos los casos. Comparando los SMC fabricados para esta experiencia con los de la bibliografía se aprecia una diferencia de magnitud entre ellos, esto se debe tanto a la concentración como al tamaño de partículas. Puede observarse también una dependencia entre el valor de los parámetros de la Tabla 10 y la concentración de refuerzo tanto en los SMC de esta experiencia como en los de la referencia.

#### 3.4.5 Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad de los materiales magnéticos, se refiere a la facilidad con que un material permite el paso del campo magnético. Se obtiene de dividir la inducción entre la intensidad, por ello puede hallarse de la gráfica de magnetización, debido a que en unidades del SI la permeabilidad es un número muy pequeño, suele expresarse en función de su permeabilidad relativa, que es la razón con respecto a la permeabilidad del vacío y además se puede considerar la cantidad adimensional que nos indica la capacidad de un material magnético de poder reforzar un campo magnético exterior.

La permeabilidad relativa de los materiales magnéticos fabricados en la presente experiencia son los siguientes:

Debido a que se tienen valores prácticamente estables en el rango estudiado, es decir independientes de la intensidad de campo magnético es posible obtener valores promedio donde se ve una tendencia proporcional a la concentración de refuerzo.

Tabla 11: Permeabilidad relativa, distintos materiales

	T25	T50	T75	T100	Fe45 15%	Fe45 10%	Fe45 5%	M4 120
PERM. REL. $\mu_R$	1.359	2.043	2.496	2.841	39	42.5	62.5	9000

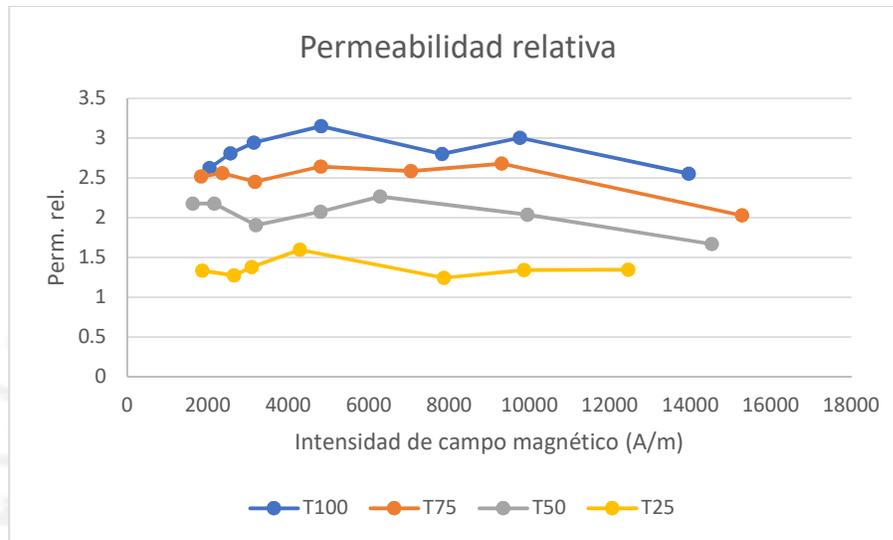


Figura 38: Permeabilidad relativa de SMC

En cuanto a las magnitudes de la permeabilidad de los materiales, es conocido que, en los materiales ferromagnéticos comerciales, es decir los aceros eléctricos, se tiene valores muy altos de permeabilidad, en el caso del ya mencionado acero eléctrico de calidad M4/120 se tiene un valor de 9000 para el punto de operación que suele estar a los 1.7T de inducción. Para el caso de las investigaciones de otros SMC, se tienen valores menores a los del material ferromagnético continuo, esto es porque al tener un recubrimiento que separa a las partículas de refuerzo, la interacción magnética entre ellas disminuye, es posible ver esto de otra forma, en un SMC se tienen partículas por donde el campo magnético pasa con libertad (refuerzo) y tienen zonas que tienen una permeabilidad muy semejante a la del vacío (matriz), y el campo magnético tiene que pasar por ambas para poder cerrar el circuito magnético, en conjunto el SMC no es tan buen conductor de campo magnético en comparación con un material continuo, esto se refleja en la permeabilidad.

En el caso de los SMC de la referencia (Bircakova, et al., 2017) se muestra las permeabilidades iniciales, es decir pequeñas inducciones comparables con las empleadas en la presente experiencia, teniendo una intensidad de campo magnético menor a 12000 A/m, la composición del refuerzo es de fierro puro como en el caso de la presente experiencia, su denominación corresponde al diámetro equivalente de las partículas de refuerzo, el cual es 45 $\mu$ m y al volumen porcentual de matriz que

poseen. Entre los SMC puede observarse un comportamiento similar al de la sección 3.4.4 donde la permeabilidad relativa crece junto con la concentración.

Tanto en el SMC2 y SMC1 se tiene concentraciones de refuerzo superiores al 90%, lo que explica la alta diferencia de permeabilidad con las probetas realizadas.

#### 3.4.6 El entrehierro y la reluctancia

Es posible determinar mediante cálculos que la longitud del entrehierro en razón de la longitud total del circuito magnético es la inversa de la permeabilidad relativa del SMC tal como está descrito en 1.5.

Se puede indicar entonces que el entrehierro equivalente para cada probeta corresponde a lo siguiente:

*Tabla 12: Entrehierro equivalente de probetas*

<i>Probeta</i>	$\mu_{rSMC}$	$\%l_{gap}$
<i>T100</i>	2.84	35.2%
<i>T75</i>	2.49	40.1%
<i>T50</i>	2.04	49.0%
<i>T25</i>	1.36	73.5%

Se observa una independencia con respecto a la forma del circuito magnético, el  $\%l_{gap}$  así como la permeabilidad dependen del material, demás se tiene en el caso de la probeta T25 un circuito magnético de material uniforme con más del 70% de entrehierro.

### **3.5 Pérdidas específicas**

En la presente experiencia se realizaron diferentes medidas que permiten obtener mediante los procedimientos presentados en la sección 2.6.4, las pérdidas específicas solo con la frecuencia de 60Hz por lo que no es posible realizar una separación de tipos de pérdidas de modo convencional; sin embargo, en cada toma de datos se tiene una inducción máxima diferente, razón por la cual en este trabajo se aprovecha la dependencia de las pérdidas en función de su máxima inducción magnética para diferenciar las pérdidas de histéresis, por corrientes parásitas y en exceso.

En la siguiente tabla se muestra el valor de la energía empleada por unidad de volumen durante un ciclo para cada probeta y para cada toma de datos, siendo la unidad de medida J/m<sup>3</sup>, pues el área de un lazo de histéresis es equivalente a las pérdidas por unidad de volumen durante un ciclo y además en los demás documentos científicos se realizan comparaciones en estas unidades.

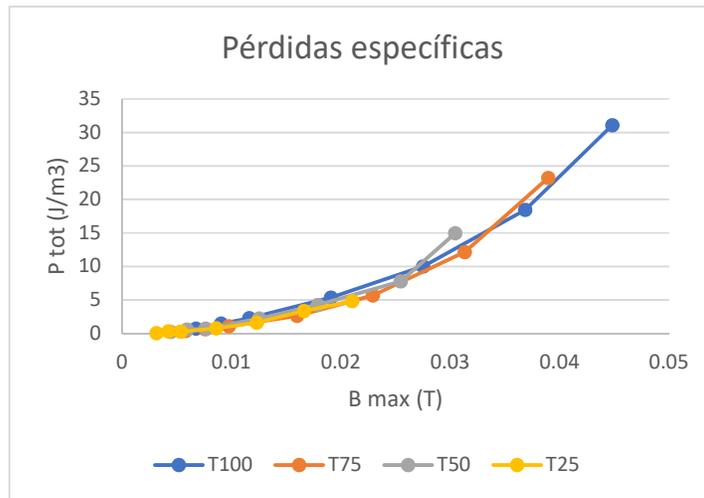


Figura 39: Pérdidas específicas, energía de un ciclo por unidad de volumen

Es posible observar por el gráfico que no existe una importante dependencia entre las pérdidas totales y la inducción máxima, la única diferencia entre las líneas de la gráfica mostrada es el último punto, correspondiente a la mayor inducción máxima o en el circuito de prueba a  $R=0.5$  ohm, estos puntos escapan del comportamiento de los demás el cual tiende a ser uniforme.

### 3.5.1 Separación de pérdidas

Los resultados de las pérdidas por corrientes parásitas se muestran en la siguiente gráfica siguiendo el procedimiento descrito en 2.6.4.

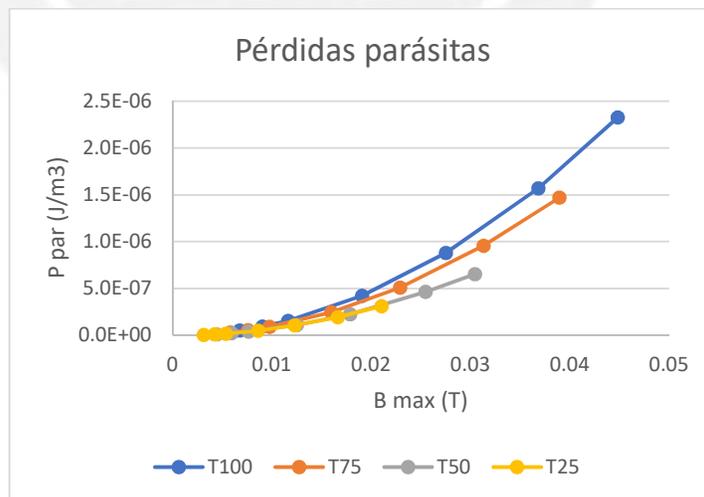


Figura 40: Pérdidas por corrientes parásitas intergranulares

Es posible observar que los valores son despreciables en comparación con los mostrados en la gráfica de pérdidas totales, motivo por el cual se excluirán de la separación de pérdidas por ajuste de curvas,

así mismo, los valores de pérdidas por exceso por definición tienen el mismo orden de magnitud que las pérdidas por corrientes parásitas, por ello, para el presente análisis se consideran despreciables y no son calculadas.

Además, se indicó que el rango de inducciones estudiado en el presente trabajo corresponde a la zona inicial de baja inducción, ha sido demostrado (Kollar, et al., 2014) que en esta zona el exponente alfa es igual a 3, por lo que el ajuste de curvas se reduce a encontrar  $K_{hist}$  de:

$$P_{tot} = P_{hist} = k_{hist} \cdot B_{max}^3$$

El ajuste de curvas correspondiente al modelo presentado presenta los siguientes coeficientes para cada probeta en la Tabla 13.

Tabla 13: Coeficientes de pérdidas por histeresis

	$K_{hist}$
T100	$9.037 \cdot 10^5$
T75	$1.588 \cdot 10^6$
T50	$2.620 \cdot 10^6$
T25	$1.139 \cdot 10^6$

En la Tabla 13 se puede observar una dependencia entre el coeficiente de pérdidas  $K_{hist}$  y la concentración, tal que las pérdidas aumentan cuando aumenta la concentración, esto no se cumple para la probeta T25.

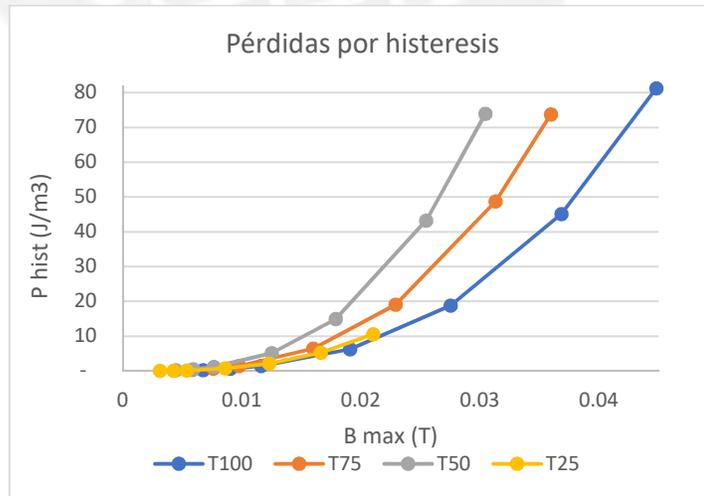


Figura 41: Pérdidas por histéresis

Pueden observarse divergencias en el comportamiento de la probeta T25, esto se debe a que, debido a su baja permeabilidad, no fue posible lograr una inducción magnética suficientemente alta que pueda definir el comportamiento de sus pérdidas, como en los demás casos, por ello se indica que los datos encontrados en cuanto a la separación de pérdidas de la T25 no son del todo fiables.

Se mencionó anteriormente que la separación de pérdidas es importante para las experiencias relacionadas con los SMC, especialmente cuando se requiere conocer el comportamiento de las pérdidas en estos materiales a medianas y altas frecuencias, es por ello que diversos autores realizan la separación de pérdidas en función de la frecuencia obteniendo coeficientes de diferente naturaleza a los hallados en el presente documento, los cuales permiten observar el comportamiento de las pérdidas en función de la inducción. En la Tabla 14 del presente documento se muestra una comparación de pérdidas entre los SMC desarrollados en el presente trabajo con los de la investigación de la referencia (Kollar, et al., 2013) identificados con las letras "A" y "S", la separación de pérdidas en función de la frecuencia se realizó, para la experiencia en referencia, a 100mT, por ello en ambos casos se muestran las pérdidas, no los coeficientes de pérdidas, a 100mT y a 60Hz, siempre en J/m<sup>3</sup>.

*Tabla 14: Comparación de pérdidas de diversos SMC a 100mT y 60Hz*

	<i>T 50</i>	<i>T 75</i>	<i>T 100</i>	<i>A</i>	<i>S</i>
<i>P par</i>	0.0000071	0.0000097	0.0000116	0.035	0.134
<i>P exc</i>	0	0	0	0.010	0.055
<i>P hy</i>	2620	1588	903.7	31	17
<i>P tot</i>	2620	1588	904	31.05	17.19

Los SMC de la referencia (Kollar, et al., 2013) son el primero identificado con la letra "A" formado para la experiencia a partir de partículas de refuerzo de Fe de alta pureza con recubrimiento de bakelita, con un volumen porcentual de refuerzo de 90%, la muestra identificada con la letra "S" es un SMC comercial adquirido en verde, cuenta con un volumen porcentual de refuerzo de 98.7%, ambas cuentan con similar distribución de tamaños de partículas tomándose como diámetro promedio 100µm.

Es posible observar que, para los 60Hz y 100mT, las pérdidas por corrientes parásitas y por exceso son muy inferiores a las pérdidas por histéresis, lo cual es producto del tamaño del refuerzo, incluso es notorio que en el caso de las SMC desarrolladas para esta experiencia las pérdidas son incluso menores, esto es en parte debido a la influencia del tamaño de partículas, pues se consideró un diámetro promedio de partículas de 14,21 µm.

A los niveles de inducción y frecuencia referentes a la Tabla 14 se puede observar que el valor de las pérdidas por histéresis decrece con el aumento de la concentración incluso en las probetas "A" y "S". Esto es posible de explicar observando el fenómeno de magnetización, en el caso de las probetas T100, T75 y T50, se requiere una alta intensidad de campo magnético "H" y consecuentemente una alta intensidad de corriente eléctrica "I" para poder llegar al valor de 100mT, en el caso de la presente experiencia el valor máximo de intensidades obtenidos fueron 15000 A/m a 23.7 A, aumentar la corriente significa aumentar la potencia y por ello las pérdidas, se entiende que este aumento de pérdidas es asumido por las pérdidas parásitas y en exceso también, pero las más representativas son las pérdidas por histéresis, por ello es que asumen mayor parte de este aumento de pérdidas.

En los valores de pérdidas de los SMC de esta experiencia presentados en la Tabla 14 se está considerando que incluso a 100mT se encuentran en la zona de magnetización de "bajas inductancias" donde el exponente de Steinmetz  $\alpha=3$  es válido, lo cual no es posible de comprobar pues se requeriría corrientes más altas ó un mayor número de espiras en los devanados de las probetas, Sin embargo los cálculos realizados para obtener los valores de la Tabla 14 nos permiten observar el comportamiento de los materiales y comprobar que se encuentra acorde con otras experiencias de SMC.

### 3.6 Análisis de resultados

#### 3.6.1 Análisis de permeabilidad

En el presente trabajo de investigación se centra en el estudio de las propiedades magnéticas de un material compuesto en función de la concentración de refuerzo ferromagnético, entre esas propiedades la más resaltante es la permeabilidad cuyos valores se muestra en la Figura 42, es posible observar que dicha dependencia es lineal y que incluso que para una concentración de refuerzo de 0% se tiene una permeabilidad relativa de la unidad, la cual corresponde a la permeabilidad del vacío.

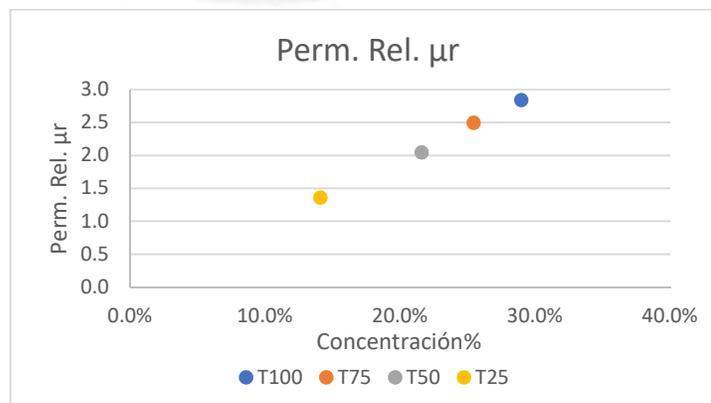


Figura 42: Permeabilidad relativa promedio en función de la concentración SMC de la presente experiencia

Sin embargo, al comparar los datos de la referencia (Bircakova, et al., 2017) indicados en la sección 3.4.5 identificados como "Fe45 15%", "Fe45 10%" y "Fe45 5%" se tiene lo indicado en la Figura 43 debe notarse que el comportamiento de la permeabilidad no es lineal con el aumento de la concentración. Más allá de formular una regla de correspondencia es necesario observar un drástico cambio en el crecimiento pues interpolando los valores de permeabilidad de las probetas fabricadas para esta experiencia, a los valores de concentración de refuerzo de los SMC de la referencia (Bircakova, et al., 2017) se tienen los valores esperados cuyas permeabilidades relativas debiesen ser 7.03, 7.41 y 7.78 T; sin embargo, en la práctica se obtienen valores mucho mayores a ellos. La respuesta se halla en las investigaciones más antiguas y más comunes dentro de las referencias de los trabajos de SMC, Mattei *et al*/y Anhalt *et al*, existe un valor de concentración crítico al cual se le llama "límite de percolación", los investigadores nombrados en sus estudios indican que existe un límite de concentración de refuerzo posterior al cual la permeabilidad del material se incrementa notablemente, acarreado un cambio en las demás características ligadas físicamente a la permeabilidad, el límite de percolación suele estar por encima de una fracción volumen de 30% en refuerzo (entre el 20 al 40% dependiendo de la geometría del refuerzo), demostrado para partículas de refuerzo esféricas y superior para otras configuraciones, posterior al cual el aumento de la permeabilidad sobrepasa el esperado lineal, en la mayoría de investigaciones de este límite es ampliamente sobrepasado por tratarse de la conformación a presión de partículas de refuerzo recubiertas y no de mezclas de materiales como en el caso estudiado en el presente informe.

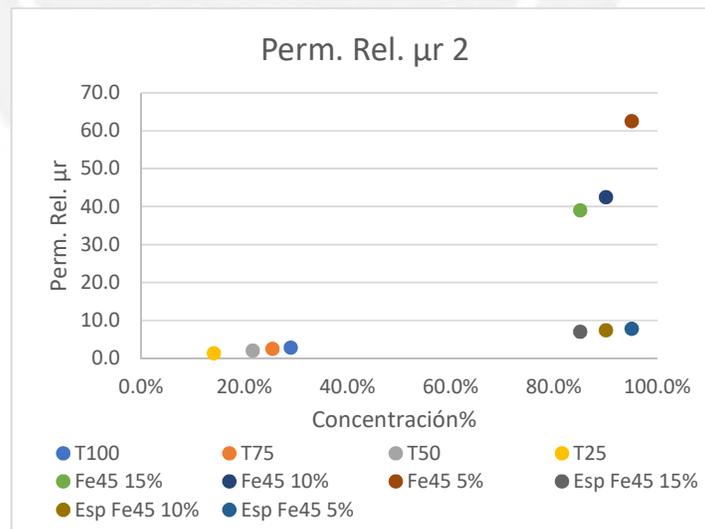


Figura 43: permeabilidad relativa promedio en función de la concentración

### 3.6.2 Análisis de pérdidas específicas

La Figura 44 muestra la dependencia entre las pérdidas totales de los SMC de la Tabla 14 versus la concentración, se observa con mayor claridad la dependencia entre la concentración y las pérdidas,

por lo que es posible inferir que un material con mayor concentración es más eficiente, por ello se requiere menor energía para realizar el fenómeno de magnetización, la magnitud de las pérdidas halladas en la presente experiencia es muy superior a la de las demás investigaciones pues en ellas suelen tenerse concentraciones que superan el 90%, además debido a que al superar un aproximado de 30% de fracción volumen de refuerzo se inicia la percolación magnética del material en el caso específico de refuerzo en forma de partículas equiaxiales, la permeabilidad aumenta drásticamente y se requiriéndose un menor campo magnético exterior para alcanzar los mismos niveles de inductancia, aquello colabora a la eficiencia del material y por ello a la disminución de sus pérdidas.

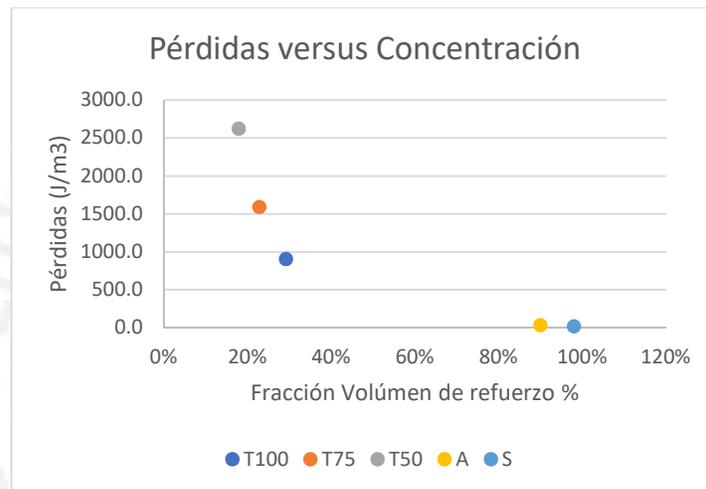


Figura 44: Pérdidas totales versus fracción volumen de refuerzo

## CONCLUSIONES

Se logró elaborar y caracterizar materiales compuestos de matriz epóxica variando la proporción de partículas magnéticas como refuerzo en el rango de 14.5% a 29.8% en volumen. El material con 29.8% de refuerzo, correspondiente a la máxima composición en volumen obtenida en el presente trabajo, presenta las mejores propiedades magnéticas: 2.84 de permeabilidad relativa y 90.5 J/m<sup>3</sup> de pérdidas específicas.

Se consiguió fabricar, mediante un proceso de aglomeración, cuatro probetas toroidales de aproximadamente las mismas dimensiones y con composiciones en volumen de 14.5%, 21.1%, 23.5% y 29.8% de refuerzo. Cabe aclarar que, en el presente trabajo, la máxima concentración que ha sido posible consolidar en la matriz fue de 29.8% de refuerzo.

Para las proporciones analizadas (menores a 30%), existe una relación directa de la permeabilidad magnética en función de la cantidad de refuerzo. Además, considerando los resultados de otros trabajos de investigación, se muestra que dicha correspondencia se vuelve exponencial para concentraciones de refuerzo mayores.

Para las proporciones estudiadas en el presente trabajo, existe una relación inversa entre las pérdidas específicas y la cantidad de refuerzo. Así mismo, a partir de los resultados de otros trabajos de investigación, se muestra que dicha correspondencia conserva su relación inversa para proporciones de refuerzo mayores.

Se ha establecido una metodología experimental que permite medir las propiedades magnéticas en materiales compuestos de matriz epóxica reforzados con partículas magnéticas. La medición de dichas propiedades se realiza, de modo indirecto, mediante el análisis de tensiones y corrientes registradas en función del tiempo en un osciloscopio.

Como proyección de estos materiales, luego de comprobar que las pérdidas específicas disminuyen y la permeabilidad aumenta con el incremento de la cantidad de refuerzo, se concluye que es posible fabricar núcleos magnéticos con alta composición de refuerzo; los que sería utilizados como componentes de transformadores de medida o protección, donde importa más la precisión y la estabilidad de sus propiedades magnéticas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Fuzerova, J. y otros, 2013. Complex permeability and core loss of soft magnetic Fe-based nanocrystalline powder cores. *Journal of magnetism and magnetism materials*, Volumen 345, pp. 77-81.
- Hossein, A., Ebrahimi, A., Gheisari, K. & Janghorban, K., 2010. Analysis of the magnetic losses in iron-based soft magnetic composites with MgO insulation produced by sol-gel method. *Magnetism and magnetic materials*, Volumen 322, pp. 3748-3754.
- Lauda, M. y otros, 2016. Magnetic properties and loss separation in FeSi/MnZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> soft magnetic composites. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 411, pp. 12-17.
- Peng, Y. y otros, 2016. Effect of the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the magnetic properties of Fe soft magnetic composites. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 399, pp. 88-93.
- Peng, Y. y otros, 2015. Preparation of soft magnetic composites for Fe particles coated with (NiZn)Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> via microwave treatment. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 395, pp. 245-250.
- Streckova, M. y otros, 2013. Design of novel soft magnetic composites based on Fe/resin modified with silica. *Journal of magnetism and magnetism materials*, Volumen 101, pp. 37-40.
- Taghvaei, A., Shokrollahi, H., Janghorban, K. & Abiri, H., 2009. Eddy current and total power loss separation in the iron-phosphate polyepoxy soft magnetic composites. *Materials and design*, Volumen 30, pp. 3989-3995.
- Taghvaei, A., Shokrollahi, H., Ebrahimi, A. & Janghorban, K., 2009. Soft magnetic composites of iron-phenolic and the influence of silane coupling agent on the magnetic properties. *Materials Chemistry and Physics*, Volumen 116, pp. 247-253.
- Wang, J., Fan, X., Wu, Z. & Li, G., 2015. Synthesis, microstructure and magnetic properties of Fe<sub>3</sub>Si<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub> at SiO<sub>2</sub> core-shell particles and Fe<sub>3</sub>Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soft magnetic composite core. *Journal of solid state chemistry*, Volumen 231, pp. 152-158.
- Wu, C., Chen, H., Ly, H. & Yan, M., 2016. Interplay of crystallization stress relaxation and magnetic properties for FeCuNbSiB soft magnetic composites. *Journal of alloys and compounds*, Volumen 673, pp. 278-282.
- Wu, S., Sun, A., Lu, Z. & Cheng, C., 2015. Fabrication and properties of iron-based soft magnetic composites coated with parylene via chemical vapor deposition polymerization. *Material chemistry and physics*, Volumen 153, pp. 359-364.
- Anhalt, M., Weidenfeller, B. & Mattei, J.-L., 2008. Inner demagnetization factor in polymer-bonded soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and magnetic materials*, Volumen 320, pp. e844-e848.
- ASTM-A927, 2011. Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Toroidal Core Specimens Using the Voltmeter-Ammeter-Wattmeter Method.

- Bircakova, Z. y otros, 2017. Analytical expression for initial magnetization curve of Fe-based soft magnetic composite material. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 423, pp. 140-144.
- Boehm, A. & Hahn, I., 2012. *2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. s.l., s.n.
- Bordianu, A. y otros, 2012. A multiscale approach to predict classical losses in soft magnetic composites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(4), pp. 1537-1540.
- Bozorth, R., 1978. *Ferromagnetism*. s.l.:IEEE PRESS.
- Bruggeman, D. A. G., 1935. *Ann. Physik*, Issue 24, p. 636.
- Corporation, A. S., 2013. *www.aksteel.com*. [En línea]  
Available at:  
[http://www.aksteel.com/pdf/markets\\_products/electrical/AK%20CARLITE%20Lite%20042413.pdf](http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/electrical/AK%20CARLITE%20Lite%20042413.pdf)  
[Último acceso: 17 07 2017].
- Dias, M. y otros, 2013. Influence of resin type and content on electrical and magnetic properties of soft magnetic composites (SMCs). *Powder technology*, Volumen 237, pp. 213-220.
- Dobak, S. y otros, 2016. A comprehensive complex permeability approach to soft magnetic bulk cores from pure coated Fe and pulverized alloy at elevated temperatures. *Journal of alloys and compounds*, Volumen (article in press), pp. 1-10.
- Dobak, S. y otros, 2017. Interplay of domain walls and magnetization rotation on dynamic magnetization process in iron/Polymer-matrix soft magnetic composite. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 426, pp. 320-327.
- Fan, X., Wang, J., Wu, Z. & Li, G., 2015. Core-Shell structured FeSiAl(SiO<sub>2</sub> particles and Fe<sub>3</sub>Si/AlO<sub>3</sub> soft magnetic composite cores with tunable insulating layer thickness. *Materials Science and Engineering B*, Volumen 201, pp. 79-86.
- Gheisari, K., Javadpour, S., Shokrollahi, H. & Hashemi, B., 2008. Magnetic losses of the soft magnetic composites consisting of iron and Ni-Zn ferrite. *Magnetism and Magnetic Materials*, Volumen 320, pp. 1544-1548.
- Guo, Y., Zhu, J. & Zhong, J., 2006. Measurement and modelling of magnetic properties of soft magnetic composite material under 2D vector magnetizations. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 302, pp. 14-19.
- Huang, M., Wu, C., Jiang, Y. & Yan, M., 2015. Evolution of phosphate coatings during high-temperature annealing and its influence on the Fe and FeSiAl soft magnetic composites. *Journal of Alloys and Compounds*, Volumen 644, pp. 124-130.
- Kollar, P. y otros, 2013. Power loss separation in Fe-based composite materials. *Material Letters*, Volumen 327, pp. 146-150.
- Kollar, P. y otros, 2015. Dependence of demagnetizing fields in Fe-Based composite materials on magnetic particle size and the resin content. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 388, pp. 76-81.

- Kollar, P. y otros, 2014. Steinmetz law in iron-phenolformaldehyde resin soft magnetic composites. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 353, pp. 65-70.
- Kostenko, M., 1975. *Maquinas Electricas tomo I*. Moscú: MIR.
- Landauer, R., 1952. *J. Appl. Phys*, Issue 23, p. 779.
- Le Floch, M. y otros, 1995. A Physical model for heterogeneous magnetic materials. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 144(140), pp. 2191-2192.
- Mattei, J.-L., Laurent, P., Minot, O. & Le Floch, M., 1996. Theoretical and experimental modelling of composites with oriented soft magnetic particles. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 160, pp. 23-24.
- Mattei, J.-L., Minot, M. & Le Floch, M., 1995. Study of percolation in heterogeneous materials. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 144(140), pp. 2189 - 2190.
- Milford, F., 1996. *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Delaware: Wesley.
- MIT, S. d., 1965. *Circuitos magnéticos y transformadores*. Nueva York: Jhon Wiley & Sons.
- Nakahara, S. y otros, 2010. Electric insulation of FeSiBC soft magnetic amorphous powder by a wet chemical method: Identification of the oxide layer and its thickness control. *Acta Materialia*, Volumen 58, pp. 5695-5703.
- Peng, Y. y otros, 2016. Iron-based soft magnetic composites with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> insulation coating produced using sol-gel method. *Material and design*, Volumen 109, pp. 390-395.
- Périgo, E. y otros, 2011. Magnetic properties of soft magnetic composites prepared with crystalline and amorphous powders. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 323, pp. 1938-1944.
- Pittini-Yamada, Y., Périgo, E., de Hazan, Y. & Nakahara, S., 2011. Permeability of hibrid soft magnetic composites. *Acta Materialia*, Volumen 59, pp. 4291-4302.
- Sharma, H., Raj Pulugurtha, M. & Tummala, R., 2016. Chemical Synthesis of low-coercivity, silica/Co composites for high-frequency magnetic components. *Materials Chemistry and Physics*, Volumen 175, pp. 46-53.
- Shokrollahi, H., 2007. Different annealing treatments for improvement of magnetic and electrical properties of soft magnetic composites. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 317, pp. 61-67.
- Shokrollahi, H., 2007. Review Soft Magnetic composite materials (SMCs). *Journal of magnetic processing technology*, Volumen 189, pp. 1 - 12.
- Shokrollahi, H. & Janghorban, K., 2006. The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites. *Materials Science and Engeneering*, Volumen 134, pp. 41-43.
- Shokrollahi, H. & Janghorban, K., 2007. Effect of warm compaction on the magnetic and electrical properties of Fe-based soft magnetic composites. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 313, pp. 182-186.

Slusarek, B., Jankowski, B., Sokalski, K. & Szczygłowski, J., 2013. Characteristics of power loss in soft magnetic composites a key for designing the best values of technological parameters. *Journal of Alloys and Compounds*, Volumen 581, pp. 699-704.

Staff M.I.T, 1965. *Circuitos magnéticos y transformadores*. s.l.:Editorial Reverté S.A..

Streckova, M. y otros, 2015. A comparison of soft magnetic composites designed from different ferromagnetic powders and phenolic resins. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Volumen 23, pp. 736-743.

Streckova, M. y otros, 2014. A comprehensive study of soft magnetic materials based on FeSi Spheres and polymeric resin modified by silica nanorods. *Materials Chemistry and Physics*, Volumen 147, pp. 649-660.

Svensson, L., Frogner, K., Jeppsson, P. & Anderson, M., 2012. Soft Magnetic moldable composites: Properties and Applications. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 324, pp. 2717-2722.

Taghvaei, A., Ebrahimi, A., Gheisari, K. & Janghorban, K., 2010. Analysis of the magnetic losses in iron based soft magnetic composites with MgO insulation produced by sol-gel method. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 322, pp. 3748-3754.

Taghvaei, A., Shokrollahi, H. & Janghorban, K., 2009. Properties of iron-based soft magnetic composite with iron phosphate-iron insulation coating. *Journal of alloy compounds*, Volumen 481, pp. 681-686.

Tahavaei, A., Shokrollahi, H., Ghaffari, M. & Janghorban, K., 2010. Influence of particle size and compaction pressure on the magnetic properties of iron-phenolic soft magnetic composites. *Journal of physics and chemistry of solids*, Volumen 71, pp. 7-11.

Tahavaei, A., Shokrollahi, H. & Janghorban, K., 2009. Magnetic and structural properties of iron phosphate-phenolic soft magnetic composites. *Magnetism and magnetic materials*, Volumen 321, pp. 3926-3932.

Wang, J., Fan, X., Wu, Z. & Li, G., 2016. Integranular insulated Fe(SiO<sub>2</sub>) soft magnetic composite for decreased core loss. *Advanced powder technology*, Volumen 27, pp. 1189-1184.

Xu, W., Wu, C. & Yan, M., 2015. Preparation of Fe-Si-Ni soft magnetic composites with excellent high-frequency properties. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 381, pp. 116-119.

Yaghtin, M., Taghvaei, A., Hashemi, B. & Janghorban, K., 2013. Effect of heat treatment on magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> insulation coating produced by sol-gel method. *Journal of alloys and compounds*, Volumen 581, pp. 293-297.

Zhao, G., Wu, C. & Yan, M., 2016. Enhanced magnetic properties of Fe soft magnetic composites by surfaces oxidation. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 399, pp. 51-57.

Zhao, G., Wu, C. & Yan, M., 2016. Evolution of the insulation matrix and influences on the magnetic performance of Fe soft magnetic composites during annealing. *Journal of alloys and compounds*, Volumen 685, p. 231-236.

Zhong, J., Guo, Y., Zhu, J. & Lin, Z., 2006. Characteristics of soft magnetic composites materials under rotating magnetic fluxes. *Journal of magnetism and magnetic materials*, Volumen 299, pp. 29-34.

