



TÍTULO: FABRICACION DE UNA SONDA MAGNETICA PARA MEDIDA DE DEFORMACIONES ESTATICAS EN EJES

Autor: Pablo Varas González

Área de Física Aplicada. Tutor: José Ángel García Díaz

Área de Mecánica de Fluidos. Tutor: José González Pérez

Área de Mecánica de Fluidos. Tutor: Julián Martínez de la Calle

E-mail@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de la aplicación del efecto Villari en cintas de $Fe-Al$, obtenida por enfriamiento ultrarrápido, a la medida de deformaciones en sistemas. El objetivo de este estudio es medir el efecto que produce el elemento sensor adherido a dos probetas de distinto material (Acero inoxidable y un acero rápido HSS), sometidas a esfuerzos de tracción entre 0 a 5 N., sin que exista contacto físico entre la probeta y el receptor de la señal. Este sensor se desarrollara para determinar las deformaciones que se producen en los ejes sometidos a esfuerzos de tracción.

OBJETIVO

El presente trabajo se ha realizado en el Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo, concretamente en el área de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, como parte del "Máster de Ingeniería Energética" de la Universidad de Oviedo (curso 2011-2012).

El principal objetivo de este trabajo es continuar con dos estudios anteriores, que también fueron objeto de un trabajo fin de máster, en el primero de los cuales se obtuvieron resultados sobre el efecto Villari de dos cintas con alta magnetostricción una cristalina de composición $Fe_{81}Al_{19}$ [1] y otra amorfa de composición $(Fe_{81}Al_{19})_{80}B_{20}$ [2] y en el segundo se realizó un estudio del mencionado efecto en la cinta cristalina sometida a diferentes tratamientos.

En la actualidad los materiales magnetostrictivos más utilizados son el Terfenol y los vidrios metálicos, obtenidos por enfriamiento ultrarrápido.

Los vidrios metálicos tienen magnetostricciones bajas comparadas con el Terfenol, pero su anisotropía magnética es inexistente debido a la falta de orden cristalino, por lo que su imanación presenta una alta sensibilidad a las tensiones mecánicas aplicadas igual o incluso mayor que el Terfenol.

Nuevos materiales como el Galfenol (Ga-Fe) y las aleaciones con memoria de forma ferromagnética (Ni₂-Mn-Ga) se presentan como alternativas prometedoras en estudio [3].

Aquí se pretende seguir en esa línea de trabajo y en base a los resultados obtenidos en los anteriores estudios se ha profundizado en el comportamiento de cintas de aleación $Fe_{81}Al_{19}$ de estructura cristalina, pasando a la aplicación de los mismos en la detección de esfuerzos en ejes. La probeta 1 será de Acero inoxidable austenítico y la probeta 2 será un acero rápido HSS, con estructura de carburos complejos de vanadio, tungsteno, niobio y molibdeno sobre una matriz martensítica.

INTRODUCCIÓN

Los sensores magnéticos son sistemas de medida que utilizan las propiedades magnéticas o magnetoelásticas de un material magnético, que se suele denominar núcleo del sensor, para obtener una señal eléctrica, proporcional a la magnitud que se pretende medir, detectar o controlar. El principal atractivo de los sensores magnéticos es que están basados en una interacción a distancia, por lo que en la mayoría de los casos, funcionan de forma remota, esto es, no hay necesidad de colocar el sensor en contacto con lo que se pretende medir.

Esta característica multiplica el número de sus aplicaciones. Así, los sensores magnéticos encuentran aplicaciones médicas, como son las exploraciones internas como endoscopias, colonoscopias o incluso para observar movimientos externos, se colocan pequeños materiales magnéticos cuya posición se puede detectar magnéticamente con facilidad, en magnetoneumografías, resonancias magnéticas; en navegación, donde se emplean brújulas de tipo fluxgate y sensores magnéticos triaxiales en los sistemas de control de altitud; aplicaciones militares, como la detección de minas no explosionadas, detección y localización de vehículos, guiado de misiles autónomos, detección de submarinos, etc; aplicaciones de seguridad como sistemas antirrobo; en automoción para la localización de vehículos, en sistemas de navegación de vehículos en tierra, en monitorización de tráfico y control de paso de vehículos e incluso identificación de los



mismos a través de sus componentes magnéticos; también en aplicaciones científicas como método de caracterización no destructiva.

Se pueden establecer varias clasificaciones entre los sensores magnéticos de acuerdo con su principio de actuación o según su rango de medida. Una posible clasificación divide a los sensores magnéticos entre sensores que miden magnitudes magnéticas y sensores que miden magnitudes no magnéticas [4].

Entre los primeros están los sensores de campo magnético, de momento magnético o de susceptibilidad, de magnetostricción, etc, como son los sensores de inducción magnética, los sensores fluxgate, los sensores magnetorresistivos, los sensores de efecto Hall, los sensores magnetoópticos, los sensores de resonancia magnética, los SQUID (*superconducting quantum interference device*), los sensores basados en la magnetoimpedancia y magnetoinductancia, los sensores magnetoelásticos, los sensores híbridos piezoeléctrico-magnetostrictivo y sensores de magnetostricción con fibra óptica.

Entre los sensores magnéticos para medir magnitudes no magnéticas, se puede hablar de sensores de posición, sensores de corriente y sensores de corrientes de Foucault, sensores magnetostrictivos de deformación, detectores de proximidad y rotación, sensores de fuerza, de presión, acelerómetros, sensores de par, sensores de flujo, de nivel, identificadores y contadores de vehículos, documentos y artículos de venta, etc

Efectos magnetoelásticos

Existen varios efectos magnetoelásticos, a modo de resumen citaremos los que tienen una mayor relevancia en la aplicación en sensores.

Magnetostricción: propiedad de los materiales magnéticos que hace que estos cambien de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético. Estos sólidos se alargan o se acortan en la dirección del campo según que su magnetostricción sea positiva (se alarga) o negativa (se acorta).

Efecto Villari: cuando se aplica un esfuerzo a un material ferromagnético se producen cambios reversibles de sus curvas de imanación, es decir cambio en la imanación de un material ferromagnético al ser sometido a una tensión o compresión mecánica.

Efecto Wiedemann inverso: este efecto consiste en la aparición de una componente longitudinal de la imanación de un material ferromagnético torsionado cuando se le imana "circularmente".

Efecto Matteucci: es el opuesto al efecto Wiedemann inverso y consiste en la aparición de una componente "circular" de la imanación de un material ferromagnético torsionado, cuando se le imana longitudinalmente.

En nuestro estudio nos apoyaremos en las propiedades del efecto Villari, que como decíamos, establece que cuando se aplica un esfuerzo tensional a un material ferromagnético se producen cambios reversibles de sus curvas de imanación (Figura 1).

En algunos materiales la dependencia entre la tensión mecánica σ y la curva de imanación es lineal cuando se les somete a compresión o a tracción, pero no a ambos tipos de esfuerzos:

Donde k es una constante que depende del material y μ_r es la permeabilidad relativa. [5], [6]

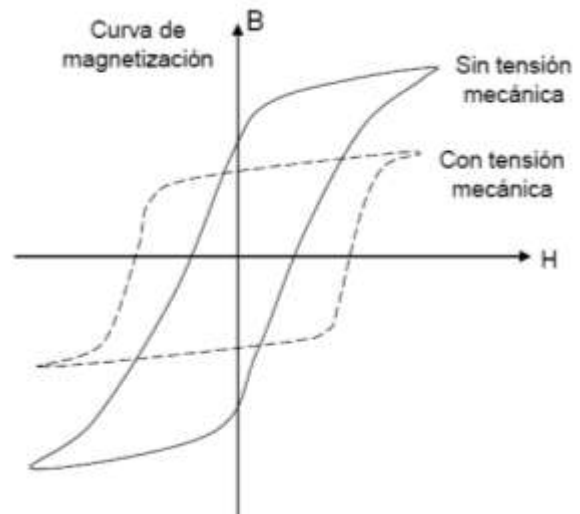


Fig.1. Curva de imanación de un material sometido a tensión

Aplicaciones en sensores

Una aplicación directa de los materiales magnetoelásticos es la medida de tensiones mecánicas. Por ejemplo el sensor de par Torductor-S de ABB, proporciona una medición coherente de par sin hacer contacto con el eje. Diseñado para un uso en continuo, el sensor es apropiado para aplicaciones que requieren fiabilidad y precisión. Con el sensor de par en el tren motriz, se obtienen datos directos en tiempo real tanto del motor como de la transmisión (Fig.2).

El sensor se basa en la propiedad de la magnetostricción del elemento sensor depositado sobre el eje, que está rodeado por una bobina fija. El sensor es excitado por una corriente en el bobinado primario, y cualquier cambio en la



permeabilidad es recogido por la bobina secundaria, dando una señal de salida que nos da el estado de carga del eje. Mide directamente en el eje de transmisión y puede presentar una señal del par actuante en el tren motriz. El Torductor-S es adecuado para control en circuito cerrado, el diagnóstico de los conceptos de combustión y futuras transmisiones avanzadas, y basado en la condición de mantenimiento proactivo.



Fig. 2. Dispositivo para la medida de tensión y par

Sensores de posición:

Las líneas de retardo magnetostrictivas están formadas por un hilo, cinta o tubo de material suficientemente sensible como para poder excitar ondas elásticas mediante pulsos de campo magnético. La propagación de estas ondas se puede ver influenciada por parámetros externos tales como la presencia de imanes o campos magnéticos en determinadas zonas de la línea, lo que produce reflexiones de las ondas que pueden detectarse fácilmente por medios eléctricos.

Así las líneas de retardo magnetostrictivas permiten determinar, también sin contacto, la posición de un objeto, siendo ésta una de las aplicaciones más extendidas.

Los vidrios metálicos en forma de cinta se utilizan también como resonadores magnetoelásticos. En ellos se excita una vibración mediante un campo magnético alterno $H(t)$ de frecuencia tal que se establezca una onda estacionaria en la cinta en cuestión. La frecuencia de esta onda es muy sensible a parámetros externos como:

- Un campo magnético constante aplicado expresamente o presente por cualquier causa externa.
- Cambios de masa en la cinta por depositarse en ella sustancias, humedad, etc.

- Cambios de temperatura.

Los resonadores magnetoelásticos se utilizan corrientemente en diversas aplicaciones:

- Sistemas antihurto.
- Etiquetas de identificación remota.
- Detectores de parámetros físicos (temperatura, humedad, campo magnético) y químicos o biológicos (concentración de gases, moléculas, etc.)

Las aleaciones Fe-Al han despertado gran interés para su aplicación en sensores magnéticos, debido a su alta magnetostricción y bajo coste de producción. Cuando estos materiales se fabrican por enfriamiento ultrarrápido se obtiene una mejora sustancial del valor de su magnetostricción. Estos materiales serán los que se utilizarán en el presente trabajo.

MÉTODO TRABAJO

Fabricación de las cintas:

Se prepararon aleaciones binarias de composición nominal $Fe_{81}Al_{19}$ fundiendo cantidades apropiadas de alta pureza de Al (99-96%) y Fe (99-98%), en atmósfera de vacío en un horno de inducción de alta frecuencia. La fusión de las aleaciones se llevó a cabo en un crisol de grafito cerrado en el extremo con una tapa de nitruro de boro con el fin de minimizar la contaminación en la aleación madre durante la fusión. El proceso de solidificación rápida de la aleación madre se llevó a cabo por melt spinning en atmósfera de vacío con la rueda de cobre 200 mm de diámetro a una velocidad lineal de 17,5 m / s (figuras 3, 4 y 5). Las cintas obtenidas tenían unas dimensiones de 2 mm de ancho y 60 micras de espesor.

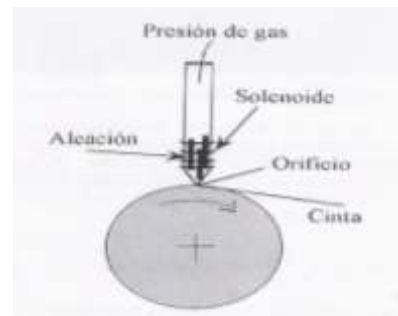


Figura 3. Esquema del dispositivo de fabricación de cintas mediante solidificación rápida, conocido como melt-spinning

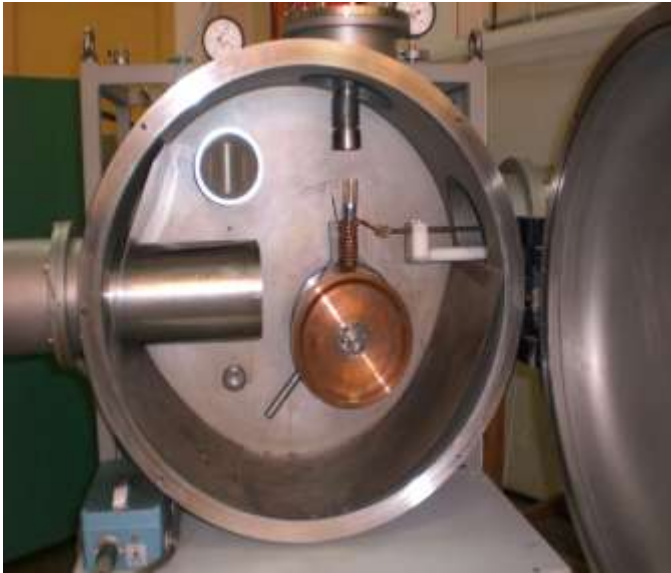


Fig.4 Horno rueda enfriamiento



Fig. 5 Crisol con "master alloy"

La composición química de las cintas se determinó por Plasma Acoplado Inductivo (ICP). Un sistema que hace que los metales emitan su onda específica de luz, la cual se puede medir con un espectrógrafo.

En resumen el proceso de fabricación de las cintas por enfriamiento ultrarrápido es bastante estándar y consta de los siguientes pasos:

I. Preparación de la aleación mediante la mezcla de los materiales en la proporción adecuada.

II. Prensado de la mezcla para obtener una pastilla compacta.

III. Sinterización de la pastilla para eliminar todas las impurezas que puedan dar lugar a núcleos de germinación de cristales.

IV. Primera fusión de la pastilla a una temperatura adecuada por encima de la temperatura de fusión de los componentes. Con los procesos anteriores se obtiene lo que se denomina "master alloy".

V. El paso final consiste en la introducción de la "master alloy" en un crisol en el horno de la rueda de enfriamiento ultrarrápido para una segunda fusión y posterior eyección sobre la rueda.

En el método de producción de las cintas por enfriamiento ultrarrápido intervienen una serie de parámetros que es importante controlar pues van a afectar a sus propiedades.

Caracterización estructural:

La caracterización estructural de las cintas se realizó de dos maneras:

- Rayos X

Interactúan con los electrones que rodean los átomos y el haz emergente contiene información sobre la posición y tipo de átomos encontrados en el camino. El sistema utilizado por nosotros fue un Seifert XRD 3000 con radiación Cu-K α de los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Oviedo.

- Microscopia de transmisión electrónica (TEM).

Un microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés, o MET, en español) es un microscopio que utiliza un haz de electrones para visualizar un objeto, debido a que la potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. Lo característico de este microscopio es el uso de una muestra ultrafina y que la imagen se obtenga de los electrones que atraviesan la muestra. Estos microscopios electrónicos de transmisión pueden aumentar un objeto hasta un millón de veces. El equipo utilizado por nosotros fue un T Philips CM30 electron microscope operating at 300 K de los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Oviedo. El adelgazamiento de las cintas para su caracterización por TEM se realizó por ion milling.

Sistema de medida (Figura6):

La cinta de $Fe_{81}Al_{19}$ de 2 cm de longitud se pega en la superficie de la probeta que se va a someter a tracción. Un devanado primario y otro secundario abrazan a la cinta sensora.



El primario será el que imane a la cinta y está alimentado mediante un autotransformador conectado a la red. El secundario será el encargado de recoger las variaciones de la imanación (ley de Faraday) que se producen en la cinta sensora cuando la probeta (y la cinta sensora unida a ella) es sometida a esfuerzos de tracción, esta señal se lleva a un fluxmetro integrador en donde se lee la señal en μV .

La probeta se monta en un arco de sierra que está adaptado con unas mordazas para su sujeción y tiene un sistema calibrado que nos permite aplicar a la misma, tensiones conocidas.



Figura 6. Montaje para el experimento.

Se trata de verificar que con las cintas de las que se dispone y los devanados diseñados para este caso en concreto se obtienen resultados posibles de cuantificar, es decir, verificar que podemos determinar una relación entre tensión aplicada y la variación de la imanación para las probetas fabricadas. La tabla 1 muestra las características principales de diseño del devanado primario, así como la tabla 2 hace lo propio para el devanado secundario

Hilo Cu macizo/esmaltado. S [mm ²]	1
Diámetro del soporte, D _e [cm]	5
Longitud soporte. L [cm]	25
Longitud devanado. L _d [cm]	20

Tabla 1. Devanado excitación

Hilo Cu macizo/esmaltado, S [mm ²]	0,2
Diámetro del soporte. D _e [cm]	1,6
Longitud soporte. L [cm]	7,5
Longitud devanado. L _d [cm]	7,5

Tabla 2. Devanado captación

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 7 muestra los patrones de difracción de rayos X del lado del aire de la cinta, en la que se pueden observar los tres picos (110), (200) y (211) que indica que la fase de las muestras tiene una estructura desordenada bcc pura, la ausencia de otros picos indica que no hay fases intermetálicas y solamente tenemos una solución sólida (FeAl).

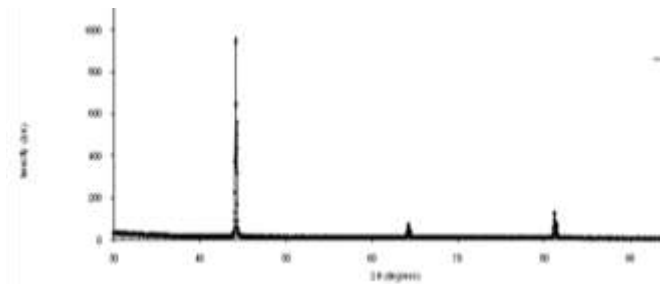


Figura 7. Difracción rayos X de una cinta amorfa Fe-Al.

De la observación TEM de la cinta (fig. 8) se distingue una estructura cristalina con nanocristales de aproximadamente 10 nm. Estos nanocristales se distribuyen de una manera no uniforme, hay regiones con una alta concentración de ellos y otro con una concentración muy baja.



Figura 8. Distribución nanocristales vista con TEM

Los resultados que se obtienen en la medida de deformaciones en las probetas son significativos en cuanto que confirman el correcto comportamiento de las cintas magnetostrictivas adheridas sobre probetas de material no magnético sometidos a esfuerzos de tracción. Los ensayos se han realizado con distintos campos magnéticos aplicados con el fin de comprobar su espectro de respuesta y buscando la mejor señal posible para el diseño de la alimentación del sensor. Se observa unas relaciones lineales para todos los campos aplicados, entre el esfuerzo al que se somete la probeta y la señal recogida por el devanado secundario de la bobina, de manera que conforme se va aumentando el campo, la pendiente de la recta de tendencia aumenta del mismo modo.



En la figura 9 se pueden observar los resultados obtenidos para la probeta de Acero Inoxidable con una tira de material cristalino adherida y sometida a tensiones de tracción longitudinales en distintos campos magnéticos.

linealidad de la señal obtenida es mejor para un campo aplicado de 5.2 mT. Consideramos que teniendo en cuenta sensibilidad y linealidad el mejor resultado lo obtenemos para el campo aplicado de 5.2 mT.

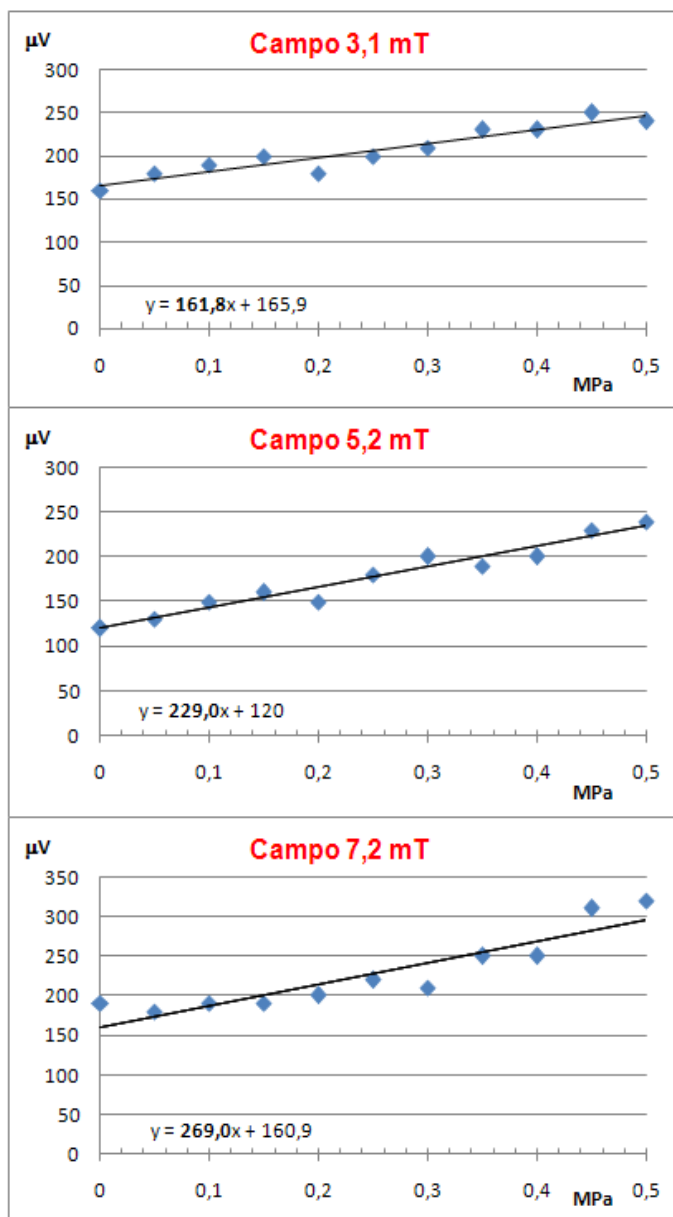


Fig.9 Probeta de acero Inoxidable

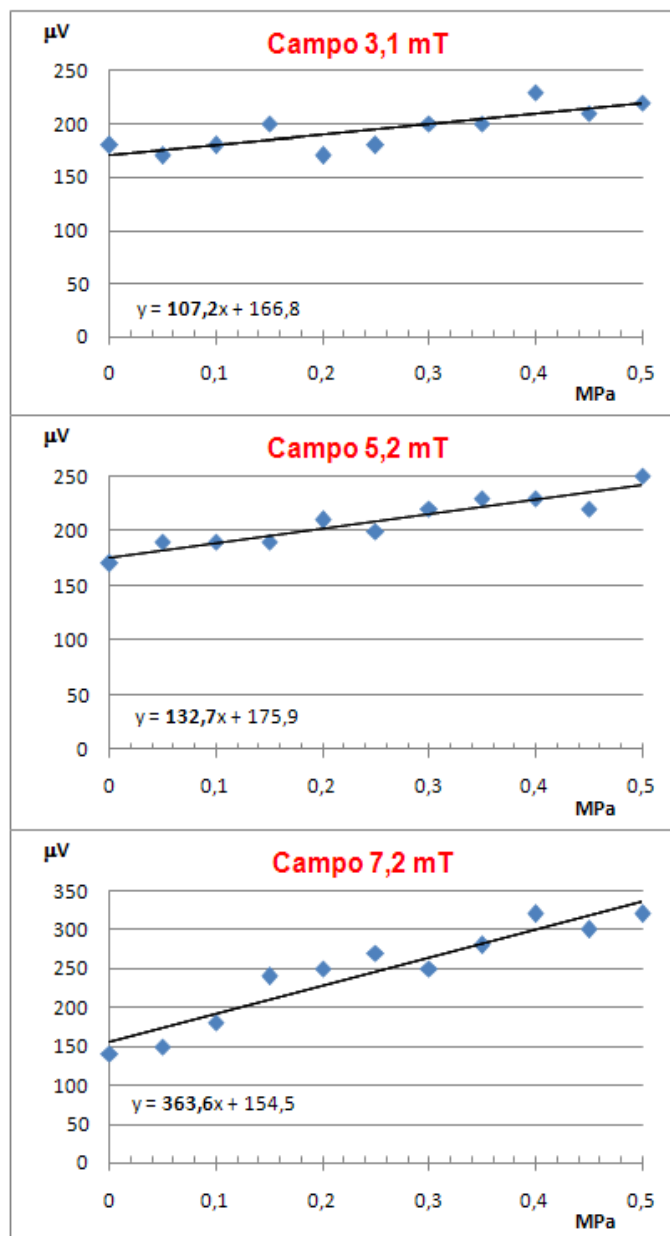


Fig.10 Probeta de acero rápido HSS.

En la figura 10 podemos observar los resultados del experimento realizado sobre una probeta de acero rápido HSS bajo las mismas condiciones que la anterior.

Se observa que en las dos probetas la máxima sensibilidad la obtenemos para un campo aplicado de 7.2 mT, no obstante la

Debemos tener en cuenta que la circuitería electrónica de adaptación de la señal debe de ser muy precisa, exacta y con una sensibilidad que las tolerancias de los materiales empleados no permiten alcanzar. El nivel de la señal obtenida es muy reducido, del orden de μV , lo cual convierte su tratamiento en tarea complicada.



CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos concluimos que la aleación Fe-Al utilizada sobre probetas de materiales no magnéticos genera una señal fácil de captar, cuando se somete a esfuerzos de tracción longitudinales. Observándose una clara linealidad entre la tensión aplicada y la señal captada. Además la pendiente de la recta presenta una tendencia ascendente conforme se va aumentando el campo magnético independientemente del material sobre el que se adhiere el sensor.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al proyecto MAT 2008 067847MAT, el apoyo económico recibido. También se agradece la aportación de los tutores tanto del Área de Física Aplicada como del Área de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. En especial resaltar la labor de José Ángel García Díaz por su paciencia y optimismo infinito.

REFERENCIAS

- [1] Z.H. Liu, G.D. Liu, M. Zhang, G.H. Wu, F.B. Meng, H.Y. Liu, L.Q. Yan, J.P. Qu and XY.X. Liu, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 1751 (2004)
- [2] J.A. García, J. Carrizo, L. Elbaile, M. Rivas, R.D. Crespo and J.C. Martínez-García. *EPJ Web of Conferences* 15, 03003 (2011)
- [3] Suryarghya Chakrabarti, B.S. *Modeling of 3D Magnetostrictive Systems with Application to Galfenol and Terfenol-D Transducers. Graduate Program in Mechanical Engineering, The Ohio State University, 2011*
- [4] P.Ripka, *magnetic sensors and magnetometers, artech house inc., ed 2001)*
- [5] W. Chug y K Watanabe. *A linear temperature-to-frequency converter using an integrable calpitts oscillator. IEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.34, num4, diciembre 1985, pags. 534-537
- [6] T. Willianson. *Using the 8051 micrcontroller with resonant transducers. IEE Trans. Indus. Electronics*, vol 32. número.4 november 1985, pag 308-312