

# Comportamiento estructural y magnético del sistema FECO obtenido mediante aleamiento mecánico

Structural and magnetic behavior of FeCo System obtained by mechanical alloying

Anderson Iván Rincón Soler<sup>1</sup>, Beatriz Cruz Muñoz<sup>1</sup>

Ingeniería Física, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

airs@utp.edu.co

bacruz@utp.edu.co

**Resumen**— Dentro de los diferentes compuestos granulares que exhiben propiedades magnéticas encontramos el sistema FeCo, el cual es de gran interés ya que presenta una única combinación de alta magnetización de saturación, elevada temperatura de Curie, baja anisotropía magnetocristalina y buena resistencia mecánica; propiedades ideales para aplicaciones en donde se requieren materiales magnéticamente blandos con características especiales. Esta revisión abordará las propiedades estructurales y magnéticas de este sistema cuando es obtenido por procesos de aleamiento mecánico (A.M.), así como también se darán las bases para entender la técnica de A.M. y su importancia en el trabajo con sistemas en bulk.

**Palabras claves**— Materiales magnéticos blandos, magnetización de saturación, aleamiento mecánico, Sistema FeCo.

**Abstract**— Within the granular compounds that exhibit different magnetic properties we find the FeCo System, which is very interesting because it presents a unique combination of high saturation magnetization, high Curie temperature, low magneto-crystalline anisotropy and good mechanical resistance; ideal properties for applications where soft magnetic materials are required with special characteristics. In this review will tackle the structural and magnetic properties of this system when it is obtained by mechanical alloying processes (M.A.), besides, a short review of Mechanical Alloying technique will be present with the aim of understand the implications of this process when is used in bulk systems.

**Keywords**— Soft magnetic materials, High saturation magnetization, Mechanical alloying, FeCo System

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la física de la materia condensada a llevado en los últimos años a un avance científico y tecnológico enorme, principalmente en el desarrollo de nuevos materiales, logrando obtener sistemas cristalinos que presentan características únicas, como dureza, alta magnetización, buena resistencia mecánica, etc., algunos de estos materiales poseen una combinación de éstas características [1, 2, 3]. La producción de nuevos materiales que cumplan una tarea determinada es hoy en día una de las líneas de investigación más fuertes tanto en Colombia como en el mundo. Un ejemplo de esto son los materiales empleados para mejorar el desempeño y la capacidad de almacenamiento de información en dispositivos tales como video grabadoras, sistemas móviles audiovisuales, discos duros (Hard Disk Drive-HDD) [2, 4]; así como también en otro tipo de importantes aplicaciones como microinductores, transformadores integrados (microtransformadores), sensores magnéticos y motores de tamaño micrométricos [2].

A fin de obtener un sistema con buena respuesta magnética es necesaria la utilización de elementos que permitan un adecuado comportamiento final; sin embargo es conveniente aclarar que la estequiometría trabajada es sin duda un factor determinante en todo este proceso.

Dentro de los materiales magnéticos usados en aplicaciones de grabación magnética se encuentran elementos como hierro (Fe) y mezclas de éste con otros como el cobalto (Co) y/o el carbono (C), obteniendo sistemas denominados Carburos Metálicos (C-M) [5, 6, 7]; Los cuales son interesantes debido a sus interesantes propiedades magnéticas, mecánicas y

<sup>1</sup> Ingeniero Físico, <sup>1</sup>Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales, GIMM.

<sup>2</sup> Física, Ph.D, Profesora Asistente, <sup>1</sup>Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales, GIMM

Fecha de Recepción: 28 de Marzo de 2010

Fecha de Aceptación: 31 de Diciembre de 2012

termodinámicas originadas por el tipo de enlace presente en estos sistemas [8, 5, 9].

La obtención del sistema FeCo puede ser abordada para su estudio de diversas formas, es decir, mediante la utilización de diferentes métodos experimentales como lo son: Aleamiento Mecánico (AM), Deposición por Láser Pulsado (PLD) y Magnetron Sputtering [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] entre otros; destacando la técnica PLD y Magnetron Sputtering que permiten obtener el sistema deseado en forma de película delgada.

Es importante recalcar que los materiales magnéticamente blandos, como la aleación FeCo, FeC y FeCoC, son de gran importancia en aplicaciones de ingeniería debido a que pueden ser fácilmente magnetizados y desmagnetizados por la presencia de un pequeño campo magnético externo; algunas de las principales aplicaciones del sistema FeCo son presentadas en la tabla 1.

Anteriormente se han mencionado algunas características y ventaja al momento de usar el sistema FeCo, sin embargo se debe tener en cuenta que las aplicaciones de este sistema se encuentran restringidas por los altos costos del Co. A pesar de este hecho y debido a la gran aplicabilidad de este sistema, se hace posible la reducción de otros elementos en el desarrollo de sistemas que cumplan una característica específica, compensando de algún modo la relación costo beneficio y haciendo posible la investigación con este tipo de elementos (Fe- Co – Pd, etc.).

<b>Aplicaciones del sistema FeCo.</b>
Transformadores de alto desempeño.
Actuadores magnéticos.
Válvulas selenoidales.
Transductores magnetoresistivos.
Controladores electromagnéticos.
Desarrollos aeroespaciales.
Micro-transformadores.

Tabla 1: Aplicaciones del sistema FeCo (Tomada de P. R. Soni: Mechanical Alloying [21]).

Muchas son las investigaciones que se han hecho sobre el sistema FeCo, sin embargo y a pesar del amplio estudio que se ha realizado, todavía existen aspectos de esta aleación tales como la influencia de la temperatura, las condiciones y tiempos de molienda y el proceso de templado, que no son de claro entendimiento; conllevando así a la posibilidad de realizar futuras investigaciones.

## II. CONTENIDO

Como se mencionó anteriormente, el interés de este documento radica en analizar el compuesto FeCo cuando es obtenido por el método de AM; es por esto que se hace necesario dar una breve introducción a lo que significa la técnica del aleamiento mecánico, sus ventajas, los equipos más utilizados, con el fin de dar una base sólida sobre lo que este método representa y su importancia en el campo

de la ciencia e ingeniería de materiales. Luego de abordar el tema del Aleamiento Mecánico, se presentan en detalle las características estructurales y magnéticas del sistema FeCo obtenido por este método.

### A. Aleamiento Mecánico (A.M)

El aleamiento mecánico es un método de utilidad para obtener sistemas nanoestructurados y que presenten una estructura bien definida. Es importante establecer que durante el proceso de molienda los polvos se encuentran en constante unión y fractura, formando estructuras o aglomeraciones que van reduciendo su tamaño de forma considerable a medida que el tiempo de trabajo aumenta (Tiempo de molienda) [14].

El proceso de unión y fractura de los polvos precursores permite la aparición de nuevas fases incluyendo soluciones sólidas supersaturadas, compuestos cristalinos y cuasi-cristalinos, sistemas nanoestructurados y fases amorfas [14,17]. Ventajas de usar la técnica de A.M se encuentran en la tabla 2, aunque no son todas, ya que este proceso exhibe infinidad de utilidades y características a medida que se implementa en el tratamiento de nuevos sistemas cristalinos y no cristalinos.

<b>Ventajas de Aleamiento Mecánico.</b>
Extensión en los límites de solubilidad.
Reducción del tamaño de partícula (al orden de los nm).
Síntesis de diferentes fases cristalinas y cuasi-cristalinas.
Desarrollo de fases amorfas.
Inducción de reacciones químicas a bajas temperaturas.
Posibilidad de aleamiento entre elementos de difícil unión.
Proceso escalable.
Desorden en compuestos intermetálicos ordenados.

Tabla 2: Algunas ventajas de utilizar la técnica de A.M. (Tomada de M. S. El-Eskandarany: Mechanical Alloying For Fabrication of Advanced Engineering Materials [17]).

El proceso de A.M comienza con la mezcla de los polvos precursores en la proporción deseada y su posterior llevada al equipo de molienda, en donde se mezcla con el denominado medio de molienda (generalmente bolas de acero). Algunas veces es necesario un agente de control para el proceso de molienda, denominado *Process Control Agent* (PCA), el cual evita el efecto de soldadura por parte de los polvos entre sí o entre estos y el medio de molienda [18, 19, 20]. La mezcla de polvos es entonces llevada a cabo durante el período de tiempo que se considere necesario hasta que el estado estable es alcanzado.

Durante todo el proceso, el medio de molienda (Bolas de molienda) colisiona con las partículas de muestra atrapadas entre ellas (como se muestra en la figura 1). La fuerza del impacto deforma las partículas creando una nueva superficie; la cual al entrar en contacto con otra de estas superficies se unen formando una sola y así una nueva estructura. Este proceso es recurrente y se lleva a cabo una y otra vez mientras transcurre el tiempo programado de molienda.

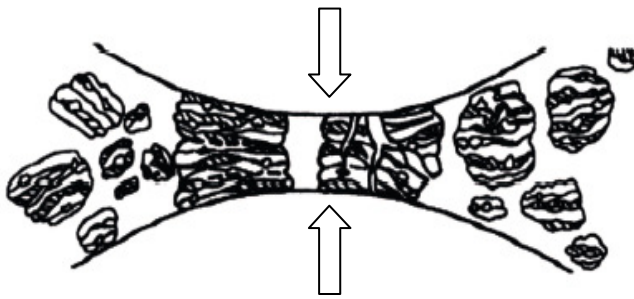


Figura 1: Colisión entre las partículas de polvo y las bolas durante el proceso de molienda (Tomada De: Mechanical Alloying for Fabrication of Advanced Engineering Materials [17])

### 1. Equipos para realizar Aleamiento Mecánico.

En el proceso de aleamiento mecánico de un sistema cualquiera, pueden ser usados molinos de alta energía (Molino de bolas tipo attritor, molino planetario de bolas, molino de bolas tipo centrífuga y molino vibratorio de bolas) o un molinos de bajo consumo de energía (molinos de bolas o de barras) esto depende específicamente de las características finales que se quieran obtener [17, 19, 21]; sin embargo son el molino planetario de bolas (Figura 2), el molino attritor (Figura 3) y el molino vibratorio de alta energía (Figura 4) los equipos más utilizados hoy en día. Los distintos tipos de molinos existentes difieren unos de otros principalmente en su capacidad, eficiencia de molienda, velocidad de operación y dispositivos adicionales para enfriamiento o calentamiento de las muestras trabajadas.



Figura 2: Molino Planetario de Bolas (Tomada de C. Suryanarayana: Mechanical Alloying and Milling [53])

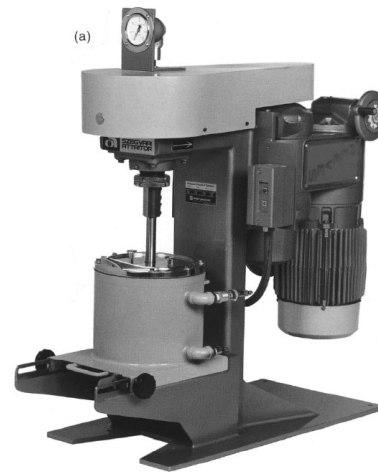


Figura 3: Molino Attritor modelo 1-S (Tomada de C. Suryanarayana: Mechanical Alloying and Milling [53]).



Figura 4: Molino Vibratorio de alta energía modelo Spex 8000 (Tomada de C. Suryanarayana: Mechanical Alloying and Milling [53]).

En algunos textos sobre aleamiento mecánico como el de C. Suryanarayana [18], M. El-Eskandarany [17], P. R. Soni [19] y E. Toten [21] se puede encontrar información detallada sobre el funcionamiento de este tipo de molinos y sobre el funcionamiento de muchos otros, incluyendo los aquellos que son utilizados a nivel industrial con el fin de trabajar grandes cantidades de muestra. Descripciones que incluyen los principios físicos y toda la teoría necesaria para entender completamente el proceso de A.M. de un sistema ya sea binario o ternario.

### 2. Parámetros de molienda.

Es bien conocido que las propiedades del producto final de molienda, tales como distribución del tamaño de partícula, grado de desorden y la estequiometría final, dependen de los parámetros de molienda y de un control sobre el proceso al momento de llevar éste a cabo.

Un resumen de los principales factores que controlan y afectan el proceso de aleamiento mecánico se muestra de manera esquemática en la figura 5.

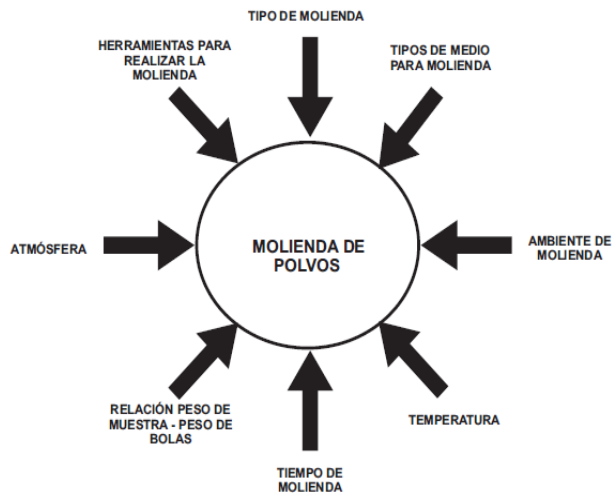


Figura 5: Principales factores que afectan el proceso de molienda.

A continuación se dará una breve descripción de los principales parámetros de molienda y su influencia durante el proceso de molienda. Estos parámetros son muy importantes ya que de ellos dependerán en gran medida las características del sistema final.

- **Tipos de Molienda**

Dependiendo del tipo de polvo, la cantidad a ser molida y la constitución requerida, podemos escoger un molino adecuado. Comúnmente, los molinos vibratorios SPEX son usados para buscar y explorar las propiedades de nuevas aleaciones, ya que requieren de pocas cantidades de muestra a usar. Por otra parte, los molinos planetarios de bolas Fritsch Pulverisette o los molinos tipo attritor son usados cuando se requiere producir grandes cantidades de polvo.

- **Tamaño de las bolas para molienda**

El tamaño de las bolas utilizadas para la molienda afecta en gran medida el tamaño, temperatura de recristalización y entalpía de los polvos aleados [19]. Además se sabe que un tamaño adecuado de bolas ayuda en el proceso de moldeo y fractura de los polvos.

- **Relación: Peso de Bolas – Peso de muestra (RBM)**

Esta relación es de gran importancia ya que un incremento en ésta reduce de manera considerable el espacio libre de movimiento de las partículas, mientras que una baja RBM reduce la frecuencia de colisión en el proceso. Es importante recalcar que la frecuencia de impacto

y el consumo total de energía por segundo incrementan si RBM también lo hace, mientras que la energía promedio de impacto por colisión decrece con el incremento de la RBM [19]. En general, una efectiva RBM ha sido encontrada en el rango de 5 a 30 [14,19].

- **Temperatura**

Especialmente la temperatura ambiente del A.M, es un parámetro importante ya que tiene influencia en la estructura final de los polvos. Uno de los principales efectos es la amorfización del sistema con el incremento de la temperatura, tal amorfización se debe la rápida mezcla de los elemento durante el proceso de molienda [19]; sin embargo la interdifusión de los polvos es efectiva solo cuando el tamaño promedio de los polvos ha alcanzado cierto mínimo.

- **Atmósfera**

El proceso de A.M es normalmente llevado a cabo bajo vacío o en una atmósfera gaseosa inerte con el fin de prevenir/minimizar la oxidación y/o contaminación de los polvos. El principal efecto de la atmósfera de molienda es sobre la expansión de contaminación en los polvos. Los gases usados normalmente como atmósfera durante el proceso de molienda son argón o helio, no se usa nitrógeno ya que se ha encontrado que reacciona con polvo metálicos produciendo fases de nitruro y por consecuencia no previene la contaminación durante el proceso, a menos que se esté interesado en la producción de nitruros.

- **Tiempo de molienda**

Este es uno de los parámetros más importantes para la molienda de polvos; normalmente el tiempo de molienda es escogido de tal manera que permite alcanzar un estado estable entre la fractura y mezcla de los elementos involucrados en el proceso. Es necesario hacer notar que el tiempo de molienda varía según el molino, la intensidad de molienda, RBM y la temperatura. Por otro lado, elevados tiempos de molienda pueden incrementar el nivel de contaminación y la aparición de algunas fases indeseables, especialmente si se trabaja con metales reactivos como Titanio y Zirconio [14].

#### B. Sistema FeCo Mecánicamente Aleado.

El aleamiento mecánico partiendo de polvos elementales de hierro (Fe) y cobalto (Co), como es en este caso, conlleva a la formación de una solución sólida en estructura BCC para muestras con contenidos de Co no mayores al 70 % at., mientras que para muestras que sobrepasen este límite lo que se espera es una solución en estructura FCC [20, 22, 23, 24]. Estos cambios de fase han sido estudiados anteriormente, ya que tiene fuertes implicaciones en las propiedades estructurales y magnéticas del sistema final [25, 26, 27]. Por otra parte debemos considerar que el éxito del proceso y las buenas características del sistema final,

dependen de los parámetros de molienda escogidos para el trabajo a realizar.

Es de nuestro conocimiento que existen diferentes equipos para realizar aleamiento mecánico [19, 20]; sin embargo la literatura muestra que para el sistema FeCo, los más utilizados son el molino planetario de bolas [30, 33] y el molino vibratorio Spex [29, 31, 32], los cuales debido a sus características de funcionamiento brindan ventajas al momento del proceso, tales como: disminución en los tiempos de molienda [29, 26], disminución en la cantidad de muestra a usar [30, 17], diferentes velocidades de molienda, entre otras.

Realizando una revisión de los principales parámetros a tener en cuenta para dar al sistema FeCo las características deseadas, se han encontrado diversos datos, como lo son las variaciones entre la relación de peso de bolas-peso de muestra (RBM) [2, 32, 26], la cual permite que la molienda no tome tiempos tan largos, es decir, tiempos superiores a 60 horas para este sistema de interés [33, 34]. Sorescu *et al.* [29], Ramanujan *et al.* [33] y Moumeni *et al.* [35] reportan que luego de 20 horas de molienda la interdifusión del Co en la red del Fe esta completa y los picos de difracción observados obedecen a una estructura BCC del FeCo; la cual en algunos casos especiales puede presentar una organización estructural tipo B2 como la mostrada en la figura 6, la cual será explicada en detalle en una próxima sección.

Otro parámetro importante en el proceso de aleamiento mecánico de este tipo de sistemas metálicos es el tiempo de molienda, característica considerada de las más importantes, puesto que permite a la muestra ser lo más homogénea posible y que el tamaño de cristalito se reduzca considerablemente. De esta forma se puede pasar un sistema micro-estructurado en las primeras horas de molienda, a un sistema nano-estructurado a medida que el tiempo de trabajo se incrementa considerablemente; así como también lo hace el ordenamiento del sistema [30, 36]. Sin embargo Sorescu *et al.* [29] y Samwer *et al.* [26] muestran que evidentemente las características estructurales como el tamaño de grano decrecen a medida que el tiempo de molienda incrementa, pero a su vez se produce un aumento en las micro-tensiones y macro-tensiones de la muestra debido a la energía introducida al sistema durante el proceso de A.M.

Siguiendo con los parámetros de molienda a tener en cuenta al trabajar con el sistema FeCo, se encuentran entre los diferentes gases inertes que se pueden usar como atmósfera, que el Argón (Ar) es el más utilizado [2, 30], debido a que siendo este un gas inerte evita que la aparición de óxidos y la reduce la presencia de impurezas que suelen aparecer en la muestra. El uso de una adecuada atmósfera es de gran importancia ya que tiene una fuerte implicación en las propiedades finales del sistema, afectando directamente la naturaleza de la fase final. Estas implicaciones nos llevan a obtener una fase final completamente amorfa o una fase final que sea

completamente homogénea [18, 37]. La formación de estas fases en el producto final, causa en algunos sistemas como el FeCr o el FeCo, un aumento en algunos picos de difracción cuando las muestras son analizadas los difractogramas de rayos X [38, 39].

### C. Características estructurales del sistema FeCo obtenido por Aleamiento Mecánico (A.M).

Es de nuestro conocimiento que la estructura cristalina para el sistema FeCo mecánicamente aleado tiene dos formas de organizarse, se puede encontrar luego de varias horas de molienda una estructura BCC desordenada en la cual no existe ninguna correlación entre las posiciones atómicas de las celdas adyacentes. Se puede encontrar también bajo condiciones especiales de trabajo, tales como tiempos de molienda pre establecidos y procesos de templado o moliendas hechas a temperaturas establecidas, una estructura completamente ordenada tipo B2 como la mostrada en la figura 6 [20, 37]. Esta dependencia de la estructura con la temperatura se abordará más adelante. Este tipo de estructura, obtenido generalmente cuando se trabaja con la aleación FeCo, hace parte de una interesante categoría de compuestos ordenados; en donde este ordenamiento influencia fuertemente las propiedades mecánicas y magnéticas del sistema final. Por tal motivo ha sido fuente constante de investigación desde hace ya varios años. Además estas características dan al sistema grandes aplicaciones y usos.

Por otro lado, la forma (o cinética) que describe el ordenamiento de la estructura FeCo y que es comúnmente descrita por varios autores se formula usualmente en términos de la evolución del parámetro de largo alcance (Long-Range Order Parameter)  $S$ , el cual es definido para una estructura tipo B2 como:

$$S = 2 \left( p - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

Donde  $S$  es el parámetro de red y  $p$  un valor numérico que representa la cantidad de átomos de hierro ocupando sitios de Fe en dicha red [20].

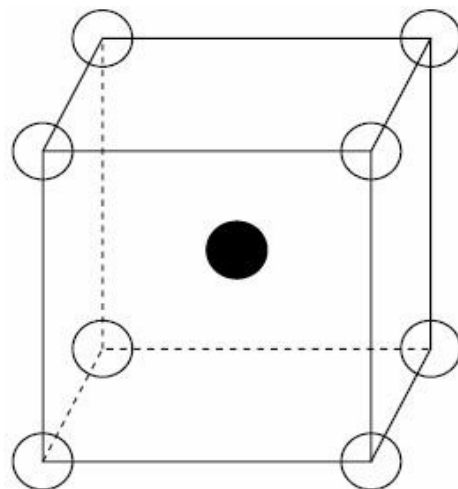


Figura 6: Estructura ordenada tipo B2 (Tomado de T. Sourmail [20]).

Teóricamente para este tipo de estructura el orden o desorden se obtiene asignando dos valores a la variable  $p$  de la ecuación (1). En el caso de una estructura totalmente desordenada  $p=0.5$  y por lo tanto  $S=0$ . En el caso de una estructura totalmente ordenada  $p=1$  y por lo tanto  $S=1$ . Los anteriores resultados son una aproximación a la distribución que debe tener la estructura cristalina de nuestro sistema con el fin de que se obtenga al final del proceso esta interesante relación de átomos.

Sourmail [20], Ustinovshikov [27, 28] y S. Alleg [30] muestra por otro lado que cuando se trabaja con el sistema FeCo, se produce un gran acople entre los átomos de Co en la red del Fe esto a causa de que sus tamaños atómicos son muy similares y realizan un estudio detallado de las características estructurales que posee un sistema como este, en el cual los elementos tienen características tan parecidas. También se estudia a fondo el efecto que tiene el A.M. sobre este tipo de aleación y en especial la difusión del cobalto en la red del hierro a medida que el tiempo de molienda transcurre, hipótesis que es verificada mediante DRX y medidas de TEM; esta última con el fin de estimar el grado de ordenamiento del sistema final. Sin embargo, algunos estudios como el reportado por Gray S. Collins *et al.* [23] afirman que en la formación del sistema FeCo por aleamiento mecánico, el desorden atómico no se debe a la interdifusión de un elemento en el otro, más bien se debe a una interdifusión de ambos átomos, formando una red que se fractura continuamente, debido al A.M., originando así cada vez un mayor desorden. Una teoría bastante interesante que ha sido reevaluada y puesta a prueba a medida que son más las investigaciones sobre el sistema FeCo y sus variantes.

Una característica importante cuando se trabaja con el sistema FeCo y que ha sido reportada por la mayoría de los autores es el hecho de que no se encuentran cambios significantes al momento de realizar un análisis de Difracción de Rayos X (DRX), ya que los átomos en cuestión poseen tamaños atómicos muy cercanos ( $Z_{Fe}=26$  y  $Z_{Co}=27$ ), lo cual no permite evidenciar cambios estructurales que demuestren diferencias relevantes en el comportamiento del sistema FeCo [30, 37, 40, 33, 27, 28, 41, 42]. Por tal motivo se hace necesario el uso de técnicas de caracterización estructural más avanzadas a fin de obtener información relevante sobre este aspecto.

#### 1. Influencia de la temperatura en el ordenamiento del sistema FeCo.

El incremento de la temperatura proporciona en los sistemas un aumento en el desorden estructural debido a la energía que se adiciona, la cual se ve reflejada en energía cinética de las partículas presentes. Y. Ustinovshikov *et al.* [27, 28] y Zelenakova *et al.* [40] enfatizan su estudio el cambio de fase que da lugar el incremento de temperatura sobre el sistema FeCo, en el cual el sistema FeCo pasa de un estado ordenado a un estado desordenado cuando se sobrepasan los 730 °C. De igual forma cuando se

incrementa la temperatura poco a poco el sistema FeCo empieza a sufrir cambios estructurales a los 550°C, en donde se presenta una coexistencia de dos fases ordenadas de manera diferente, denominadas A2 y B2. Es importante aclarar que esta coexistencia de dos fases sólo se presenta para muestras que poseen entre un 30% at. y un 80% at. de cobalto; y cuando la temperatura se incrementa a una razón pequeña. Es interesante observar los diagramas de fase de este sistema para ver claramente como es el comportamiento ante cambios de temperatura y de porcentajes atómicos. En [27, 28, 24, 43, 24] se encuentra un estudio detallado sobre los diagramas de fase que se pueden obtener para el sistema FeCo y para otros sistemas cuando se presentan cambios en el contenido atómico o cantidad de muestra en función del incremento de la temperatura.

Las variaciones en el sistema FeCo pueden ser observadas mediante análisis termográficos por calorimetría (Diferencial Scanning Calorimetry - **DSC**) y han sido atribuidos a alteraciones en el ordenamiento de la red, cuando se pasa de una estructura tipo BCC ordenada a una desordenada tipo HCP a medida que se alcanzan temperaturas elevadas. Ustinovshikov [27, 44] e Ikuo Ohnuma *et al.* [43] establecen una relación entre el desorden en la estructura del sistema FeCo y el aumento de la temperatura, encontrando la presencia de fases estructurales que no están reportadas en ninguno de los diagramas de fase conocidos para este sistema.

T. Sourmail [20, 37] muestra cambios, como aumento en el parámetro de red y variaciones en el ordenamiento de la estructura a medida que se incrementa la temperatura, además analiza las propiedades del sistema FeCo cuando es sometido a procesos de templado a diferentes tasas de enfriamiento.

#### D. Características magnéticas del sistema FeCo.

Hasta el momento es bien sabido que el sistema FeCo posee la más alta magnetización de saturación entre todas las aleaciones binarias magnéticas conocidas, además una baja coercitividad, una elevada temperatura de Curie y una alta permeabilidad magnética; propiedades que abren a este sistema una amplia gama de aplicaciones [20, 27, 30, 45, 46].

La figura 7 nos muestra la variación de los momentos magnéticos dipolares como una función de la composición en aleaciones metálicas de transición, esta es más conocida como la curva de Slater-Pauli y es de gran importancia para el diseño de aleaciones magnéticas ya que nos permite ver cuáles de éstas brindan las mejores características magnéticas. El análisis de esta curva es de gran importancia ya que nos permite ver que entre los sistemas binarios conocidos, la aleación FeCo posee el mayor grado de magnetización conocido y es un punto de partida para el estudio de nuevas aleaciones basadas en este sistema.

Ustinovshikov *et al.* [26, 27], realiza un análisis del comportamiento de este sistema trabajado a diferentes temperaturas de recocido y realizando un templado en agua, encontrando una respuesta magnética que depende en gran medida del ordenamiento de la red. T. Sourmail [20] y L. Schultz *et al.* [47] hacen énfasis en el hecho de que la

magnetización de saturación ( $M_s$ ) obtiene su valor máximo para el sistema FeCo cuando se trabaja con un 35%at. de cobalto; además se obtiene un incremento en el valor de la permeabilidad del sistema; también es mostrado un completo estudio del sistema FeCo, mostrando características magnéticas como lo son la magnetización de saturación del sistema, medidas de Magnetización versus temperatura, medidas de campo coercitivo, entre otras.

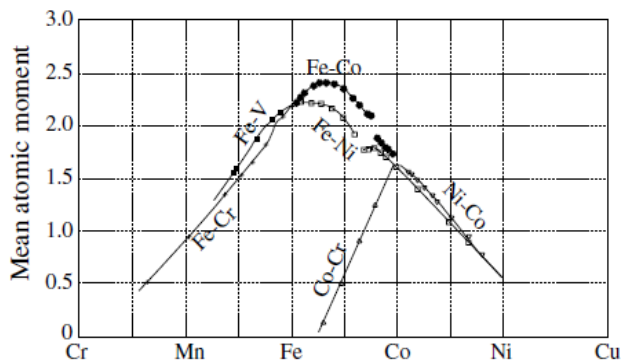


Figura 7: Diagrama de Slater-Pauli para diferentes aleaciones (Tomado de T. Sourmail [20]).

La magnetización de saturación se considera normalmente independiente de la estructura obtenida; sin embargo en algunos estudios se ha observado un incremento en el valor de la magnetización de saturación dependiendo del grado de ordenamiento del sistema; por tal motivo se ha considerado a la magnetización de saturación como un parámetro indicador del ordenamiento del sistema [20, 27].

#### 1. Magnetización en función del contenido de cobalto (Co).

Medidas de magnetización típicas para el sistema FeCo en forma ordenada y sistemas tipo Fe-Co-2V se encuentran alrededor de 2.35 Teslas (T) [20, 37, 48]; sin embargo, es el sistema FeCo el que presenta el mayor valor de magnetización, aunque estos valores también son dependientes en gran medida de la cantidad de cobalto (Co) que posea la aleación. Como se mencionó antes, es conocido que para un valor de 35%at. de cobalto se obtiene un valor máximo de  $M_s$ . La figura 8 muestra el incremento en la magnetización de saturación como función de la cantidad de Co presente.

Por otro lado no todas las aleaciones binarias ni ternarias de la forma FeCo-X exhiben buenas propiedades magnéticas como lo reporta T. Sourmail [20]; en donde se establece que la adición de elementos como *Ti*, *V*, *Cr*, *Ni* y *Cu* tienen un efecto negativo en la magnetización del sistema con excepción del *Mn*, el cual dependiendo de la estequiometría utilizada genera un incremento en los momentos atómicos del sistema en cuestión.

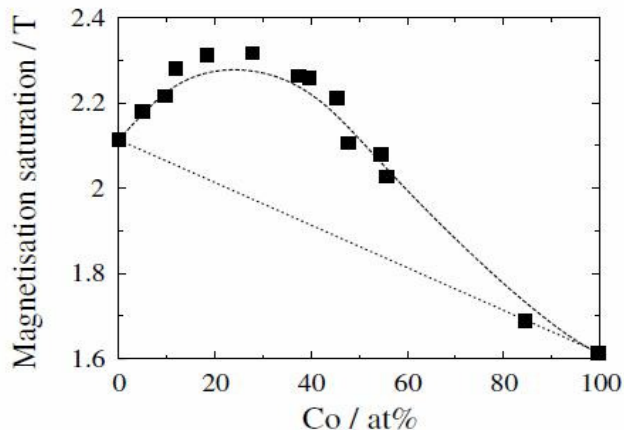


Figura8: Magnetización de saturación del sistema FeCo en función del contenido de cobalto (Tomado de T. Sourmail [20]).

Un comportamiento único presentado por el sistema FeCo es el mostrado por su magnetización de saturación (figura 8), en donde se observa un incremento en ésta a medida que la cantidad de cobalto aumenta en el sistema. Se observa que para un cierto valor de %at. de cobalto se tiene un máximo de  $M_s$ , y posterior a este se presenta un descenso en dicha magnetización. Este comportamiento ha sido abordado por varios autores y obedece a que tanto los átomos de Fe como los de Co poseen características similares y logran un gran acople entre sus momentos magnéticos [45, 46, 49]. Sin embargo, cuando se trabajan con contenidos muy altos de cobalto en el sistema FeCo ocurre una compensación de espines en la capa externa de los átomos, produciéndose una notable reducción en la  $M_s$  y como es bien conocido un posterior paso del estado ferromagnético al estado antiferromagnético [25, 27, 50].

Se debe tener en cuenta que estas propiedades magnéticas son independientes de la estructura del sistema. Estos cambios en la  $M_s$  han sido estudiados con gran detalle y son atribuidos principalmente a procesos de intercambio que ocurren en la banda de valencia del hierro, específicamente en el nivel 3d. H. Hamada [51] y M. Getzlaff *et. al.* [52] realiza una completa descripción físico-matemática de este proceso tomando como base principal los cálculos de bandas y en especial toda la teoría de bandas que encierra este fenómeno. Esta no es la única explicación a este fenómeno, también ha sido tratado en términos de la energía de Fermi y la cantidad de espines alienados en una densidad de estados específica.

### III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

FeCo constituye un sistema de gran interés en el campo de los materiales magnéticamente blandos debido a sus interesantes propiedades magnéticas, eléctricas y estructurales y su gran utilidad en diferentes aplicaciones tecnológicas e industriales. Sin embargo se encuentra que es necesario optimizar la aleación con el fin de dar un balance entre sus propiedades estructurales y magnéticas bajo influencia de procesos térmicos.

Los recientes estudios demuestran que la adición de un tercer elemento en el sistema ayuda a dar un balance entre las propiedades mecánicas, eléctricas y magnéticas.

Todos los estudios que dan lugar al entendimiento de las propiedades magnéticas revelan que dicho comportamiento depende fuertemente de la distribución atómica que se tenga en el sistema.

#### REFERENCIAS

- [1] H. Gavrilu y V. Ionita, "Crystalline and amorphous soft magnetic materials and their applications - status of art and challenges," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 173–192, 2002.
- [2] N. Sun, A. M. Crawford y S. X. Wang, "Advanced soft magnetic materials for recording heads and integrated inductors," *Materials Research Society*, vol. 721, pp. 249–258, 2002.
- [3] H. S. Jung, W. D. Doyle y S. Matsunuma, "Influence of underlayers on the soft properties of high magnetization FeCo films", *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 10, pp. 6462- 6465, 2003.
- [4] Y. Song, L. Ma, S. Xie, S. Pang, L. Jiang, and D. Zhu, "Novel organic thin films for ultrahigh density information storage," *Materials Science and Engineering*, vol. 76, pp. 79–82, 2000.
- [5] H. Kawana, T. Morikawa, K. Matsumoto y K. Shono, "Magnetic properties and Noise Characteristics of FeCo Film for Backlayer of Double-layered Perpendicular Magnetic Recording Medium", *Transactional Magnetic Society Japan*, vol. 2, pp. 23-27, 2002.
- [6] S. Cusenza y P. Schaaf, "Amorphous stainless steel coatings prepared by reactive magnetron-sputtering from austenitic stainless steel targets", *Appl. Phys. A*, vol. 94, no. 1, pp. 134-154, 2008.
- [7] S. Cusenza, M. Seibt y P. Schaaf, "Deposition and properties of high-carbon iron films", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 254, no. 4, pp. 955-960, 2007.
- [8] Baek-Hee Lee, Bong Su Ahn, Dae-Gun Kim et. al., "Microstructure and magnetic properties of nanosized Fe–Co alloy powders synthesized by mechanochemical and mechanical alloying process", *Materials Letters*, vol. 57, pp. 1103-1107, 2003.
- [9] A. V. Ilyasov, A. A. Ryzhkin, y V. V. Ilyasov, "Electronic structure and chemical bond in carbides crystallizing in the Fe-W-C system", *Journal of Structural Chemistry*, vol. 49, no.5, pp. 795-802, 2008.
- [10] E. Soo, T. Zhou, and J. Wang, "FeCoC films as the soft magnetic underlayer media," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, pp. 8019–8021, 2002.
- [11] X. Liu, T. Miyao, and A. Morisako, "Magnetic properties of nanocrystalline and amorphous FeCoC thin films," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 42, no. 10, pp. 2772–2774, 2006.
- [12] E. Yu, J. Shim, J. Kim, S. Han, H. Kim, and M. Gamaguchi, "Development of FeCo-based Thin films for gigahertz applications," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 41, no. 10, pp. 3259–3261, 2005.
- [13] V. Peña, "Mecano Síntesis", *Revista de investigación de Física*, vol. 1, 1998.
- [14] C. Suryanarayana, E. Ivanov and V. Boldyrev, "The science and technology of mechanical alloying," *Materials Science and Engineering*, vol. A-304-306, pp. 151-158, 2001.
- [15] R. Elkalkouli, M. Grosbras y J.F. Dinhut, "Mechanical and magnetic properties of nanocrystalline FeCo alloys produced by mechanical alloying", *Nanostructured Materials*, vol. 5, no. 6, pp. 733-743, 1995.
- [16] R. Gupta, K. Lieb, G. Muller, M. Wetsheit y K. Zang, "Influence of substrate and ion irradiation on the magnetic properties of Laser-Deposited CoFe films", *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sec. B*, vol. 246, pp. 373-396, 2006.
- [17] M. S. El-Eskandarany, *Mechanical Alloying For Fabrication of Advanced Engineering Materials*. William Andrew, 2001.
- [18] C. Suryanarayana, E. Ivanovb y V.V. Boldyrev, "The science and technology of mechanical alloying", *Materials Science and Engineering*, A304-306, pp. 151-158, 2001.
- [19] P. R. Soni, "Mechanical Alloying", *Cambridge International Science Publishing*, 2001.
- [20] T. Sourmail, "Near equiatomic feCo alloys: Constitution, mechanical and magnetic properties," *Progress in Materials Science*, vol. 50, p. 816–880, 2005.
- [21] E. Toten, L. Xie y K. Funatani, "Handbook of Mechanical alloying desing", *CRC Press*, 2004.
- [22] Y. Goo y S. Cho Yu, "Magnetic Properties of Nanocrystalline CuFeCo Alloys Processed by Mechanical Alloying" *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 31, no. 6, 1995.
- [23] M. Hillert, "Phase Equilibria, Phase Diagrams and Phase Transformations", *Cambridge University Press*, 2008.
- [24] Materials Science International Team (MSIT), "Ternary Alloy Systems Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data – Part 1", *Springer Berlin Heidelberg New York*, 2006.
- [25] N. Cohen, Q. Pankhurst, and L. Barquín, "Structural and magnetoresistive properties of mechanically alloyed Fe–Co–Ag," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 11, pp. 8839–8853, 1999.
- [26] R. Bruning and K. Samwer, "The mixing of iron and cobalt during mechanical alloying," *Journal of Applied Physics*, vol. 72, no. 7, pp. 2978–2983, 1992.
- [27] Y. Ustinovshikov, B. Pushkarev, and V. Sapagina, "Phase separation and ordering in the Fe-Co system," *Journal of Inorganic Materials*, vol. 42, no. 4, pp. 354–359, 2006.
- [28] Y. Ustinovshikov, B. Pushkarev, I. Shabanova and A. Ulianov, "Phase transformations in the Fe-Co system," *Journal of Interface Science*, vol. 10, no. 4, 2002.
- [29] M. Sorescu and A. Grabias, "Structural and magnetic properties of Fe50Co50 system," *Intermetallics*, vol. 10, pp. 317–321, 2002.



- [30] S. Alleg, F. Bentayeb, R. Bensalem, C. Djebbari, L. Bessais, and J. Greneche, "Effect of the milling conditions on the formation of nanostructured Fe-Co powders," *Physica Status Solidi (a)*, vol. 205, no. 7, p. 1641–1646, 2008.
- [31] G. Gonzalez, A. Sagarzazu, R. Villalba, J. Ochoa, and L. D'Onofrio, "Effect of the milling media on the phases obtained in mechanically alloyed equiatomic Fe-Co," *Materials Science Forum*, vol. 360-362, pp. 355–360, 2001.
- [32] G. Collins and B. Meeves, "Formation of FeCo by mechanical alloying," *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 29, pp. 1319–1323, 1993.
- [33] H. Li and R. Ramanujan, "Mechanical alloying of FeCo nanocrystalline magnetic powders," *Journal of Electronic Materials*, vol. 33, no. 11, pp. 1289–1297, 2004.
- [34] Y. D. Kim, J. Chung, J. Kim and H. Jeon, "Formation of nanocrystalline Fe-Co Powders produced by mechanical alloying," *Materials Science Engineering*, vol. A-291, pp. 17-21, 2000.
- [35] H. Moumeni, S. Alleg, C. Djebbari and F. Bentayeb, "Synthesis and characterization of nanostructured FeCo alloys," *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp. 5441-5443, 2004.
- [36] B. Lee, S. Ahn, D. Kim and C. Hang, "Microstructure and magnetic properties of nanosized Fe-Co alloy powders synthesized by mechanochemical alloying process," *Materials Letters*, vol. 42, 2003.
- [37] T. Sourmail, "Comments on Character of transformations in Fe-Co system", *Scripta Materialia*, vol.52, pp. 1347-1351, 2005.
- [38] Y. Ogino, Y. Yamasaki, S. Matuyama y R. Sakai, "Amorphization of Ti---Zr powders by mechanical alloying in H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> atmospheres", *J. Non-Cryst. Solid.*, vol. 117/118, pp. 737-740, 1990.
- [39] Lee PY, Koch CC., " ", *J. Non-Cryst. Solid.*, vol. 94, pp. 88-100, 1987.
- [40] A. Zelenáková, D. Oleksáková, J. Degmova, J. Kovác, P. Kollára, M. Kusyd, and P. Sovák, "Structural and magnetic properties of mechanically alloyed FeCo powders," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 316, pp. 519–522, 2007.
- [41] R. S. Sundar y S. C. Deevi., "Soft magnetic FeCo alloys: alloy development, processing, and properties", *International Materials Reviews*, vol. 50, no. 3, pp. 157-183., 2005.
- [42] Vladyslav A. Vas'ko, James O. Rantschler, y Mark T. Kief, "Structure, Stress, and Magnetic Properties of High Saturation Magnetization Films of FeCo", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no. 4, pp. 2335-2338, 2004.
- [43] I. Ohnuma, H. Enokia, O. Ikeda, R. Kainuma, H. Ohtani, B. Sundman, K. Ishida, "Phase equilibria in the Fe-Co binary system", *Acta Materialia*, vol. 50, pp. 379-393, 2002.
- [44] Y. Ustinovshikov, N. Lomova, I. Shabanova, "High-temperature B2 ordering in Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub> alloy", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 69, pp. 1753-1757, 2008.
- [45] G. Patette and I. Mirebeau, "Magnetic moment distribution in Iron-Cobalt alloys", *Physica B*, vol. 156-157, pp. 721-723, 1989.
- [46] R. H. Yu, S. Basu, Y. Zhang and J. Q. Xiao, "Magnetic domains and coercivity in FeCo soft magnetic alloys", *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no 8, pp. 6034-6037, 1999.
- [47] Ch. Kuhrt and L. Schultz, "Formation and magnetic properties of nanocrystalline mechanically alloyed Fe-Co", *J. Appl. Phys.*, vol. 71, no 4, 1992.
- [48] A. Arrott, "Production of Magnetically soft materials by mechanical milling", *NanoStructured Materials*, vol. 12, pp. 1135-1140, 1999.
- [49] K. Schwarz, P. Mohnt, P. Blahat and J. Kiibler, "Electronic and magnetic structure of BCC Fe-Co alloys from band theory", *J. Phys. F: Met. Phys.*, vol. 14, pp. 2659-2671, 1984.
- [50] M. McHery, M. Willard and D. Laughlin. "Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets," *Progress in Materials Science*, vol. 44, pp. 291-433, 1999.
- [51] N. Hamada, "Local environment effect on the atomic magnetic moment in Ferromagnetic Transition-Metal Alloys", *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 46, no. 6, 1979.
- [52] M. Getzlaff, J. Bansmann, F. Bulut, R. Gebhardt, A. Kleibert y K. Meiwes-Broer, "Structure, composition and magnetic properties of size-selected FeCo alloy clusters on surfaces", *App. Phys. A.*, vol. 82, pp. 95-101, 2006.
- [53] C. Surayanarayana, "Mechanical Alloying and Milling", Marcel Dekker, 2004.