



**Departament de Física  
Facultat de Ciències  
Universitat Autònoma de Barcelona**

**MAGNETIC HARDENING INDUCED  
BY  
FERROMAGNETIC-ANTIFERROMAGNETIC  
COUPLING**

Thesis presented by  
**Jordi Sort Viñas**  
Bellaterra, September 2002

## Agraïments

En primer lloc voldria fer extensiu el meu agraïment a totes aquelles persones que han contribuït d'alguna manera al desenvolupament d'aquest treball de recerca. He d'admetre que sense la seva col·laboració un treball com aquest no s'hauria pogut dur a terme.

Voldria agrair especialment la permanent dedicació, suport i orientació científica que he rebut per part dels meus directors de tesi, la Prof. Maria Dolors Baró i el Dr. Josep Nogués. Agraïco la confiança que es va dipositar en mi en acollir-me en el *Grup de Física de Materials II* i en posar a la meua disposició els equipaments tècnics del grup. En especial, agraïco a la Prof. Maria Dolors Baró el seu ajut per buscar el suport econòmic que ha permès que pogués realitzar còmodament la tesi doctoral i també assistir i participar en nombrosos congressos d'àmbit nacional i internacional. Al Dr. Josep Nogués li agraïco la seva crítica (sempre constructiva) i inestimable consell que m'ha subministrat en tot moment. La seva experiència i coneixements han estat essencials en aquest treball. Als meus directors de tesi els agraïco que hagin invertit bona part del seu temps en la meua formació científica.

Vull fer extensiu aquest agraïment al Dr. Santiago Suriñach per haver -me introduït en el món de la Ciència dels Materials durant els darrers anys de la Llicenciatura de Física i també per la seva total disponibilitat a l'hora de resoldre els problemes experimentals que han anat sorgint durant la realització d'aquest treball.

Dono les gràcies al Dr. Xavier Amils per la paciència i temps que va dedicar a ensenyar-me a utilitzar bona part de les tècniques experimentals amb les que s'ha dut a terme aquest treball, així com per l'ajut en l'anàlisi i discussió de part dels resultats presentats en aquesta tesi.

Agraïco al Prof. Juan Santiago Muñoz que hagi posat a la meua disposició part de l'equipament del Laboratori de Mesures Tèrmiques i Magnètiques de la UAB. A ell i també al Dr. Vassil Skumryev els agraïco els ensenyaments en Magnetisme de Materials que he rebut durant els cursos de Doctorat.

Vull destacar també la total disposició del Jordi, el Manel, el Rafa i el Ramón pel suport tècnic que donen al nostre grup.

He d'agrair als Serveis Científico-tècnics de la UAB i, en especial, al Dr. Ángel Álvarez, i als Srs. Francesc Bohils i Onofre Castell la seva col·laboració en la realització i anàlisi de les experiències de Difracció de Raigs X i Microscòpia Electrònica, respectivament.

Vull agrair als Drs. Gérard Chouteau, Sophie de Brion, Eric Chappel i Frederic Dupont pel suport tècnic en l'ús de les instal·lacions del *Grenoble High Magnetic Field Laboratory* i als Drs. Luca Lutterotti i Stefano Gialanella per subministrar-nos i instruir-nos en l'ús del programa *MAUD* de tractament de les dades de Difracció de Raigs X.

Un record molt especial per a la resta de membres que hi són o han passat pel *Grup de Física de Materials II*, que han contribuït a crear una bona atmosfera de treball i amb qui hem compartit moments que segur mai oblidarem: Martí Gich, Zulia Caamaño, Mónica Rico, Thierry Gloriant, Aziz Khalladi, Tong Zexin, Alex Zyliaev, Ádám Révész, Tony Spassov, Pau Solsona, Amadeu Concustell, Daciana Ile, Nora Mateescu i Stefania Doppiu.

Vull agrair a la Direcció General d'Universitats de la Generalitat de Catalunya per la beca de Formació de Personal Investigador que em van concedir per a realitzar els estudis de Tercer Cicle.

Finalment vull donar les gràcies als meus pares i molt en especial a la Maria Josep pel constant suport i comprensió que sempre he rebut d'ells.

# Index

INTRODUCTION	1
1.1.- Antiferromagnetic and ferromagnetic materials: soft and hard	1
1.2.- Conventional hard magnetic materials	5
1.2.1.- Ferromagnetic materials consisting of a single ferromagnetic phase	5
1.2.2.- The concept of spring-magnet	8
1.3.- Phenomenology and fundamentals of ferromagnetic-antiferromagnetic coupling	9
1.3.1.- Ferromagnetic-antiferromagnetic exchange anisotropy	9
1.3.2.- Phenomenology	9
1.3.3.- Intuitive picture	12
1.3.4.- Theoretical outline	15
1.4.- Ferromagnetic-antiferromagnetic coupling in nanostructures and fine-particle materials	19
1.4.1.- Exchange bias in “artificially-fabricated” magnetic nanostructures	19
1.4.2.- Exchange bias in fine powders systems	20
1.5.- Objectives of our work	21
RESULTS AND DISCUSSION	23
2.1.- Morphological characterization	24
2.2.- Structural characterization	27
2.2.1.- The case of Co-NiO	27
2.2.2.- The case of SmCo <sub>5</sub> -NiO	30
2.3.- Magnetic characterization	31
2.3.1.- The case of Co-NiO	31
2.3.2.- The case of SmCo <sub>5</sub> + NiO	39

*Chapter 4*

ARTICLES	49
Article I	51
Article II	57
Article III	65
Article IV	75
Article V	83
Article VI	93
Article VII	99
Article VIII	109
Article IX	117
CONCLUSIONS	123
REFERENCES	127