



Buenos Aires

“2008 – Año de la Enseñanza de las Ciencias”

*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

## **APRUEBA CURSOS DE POSGRADO DE ACTUALIZACIÓN**

Buenos Aires, 13 de marzo de 2008

VISTO la presentación de la Facultad Regional Córdoba, a través de la cual solicita la aprobación y autorización de implementación de los Cursos de Posgrado: “Propiedades Físicas de los Materiales” y “Materiales Magnéticos: Principios y Aplicaciones”, y

### **CONSIDERANDO:**

Que los Cursos propuestos responden a la necesidad de brindar a los estudiantes herramientas necesarias para el abordaje de materiales con propiedades específicas.

Que la Facultad Regional Córdoba cuenta con un plantel de profesores de elevado nivel académico y profesional, además de una prolongada y amplia experiencia en el dictado de cursos y seminarios vinculados al propuesto.

Que la Comisión de Posgrado de la Universidad ha analizado los antecedentes que acompañan la solicitud y avala la presentación.

Que la Comisión de Enseñanza recomienda su aprobación.

Que el dictado de la medida se efectúa en uso de las atribuciones otorgadas por el Estatuto Universitario.

Por ello,

EL CONSEJO SUPERIOR DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

ORDENA:



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

ARTÍCULO 1°.- Aprobar el currículum de los Cursos de Posgrado de Actualización "Propiedades Físicas de los Materiales" y "Materiales Magnéticos: Principios y Aplicaciones", que figuran en el Anexo I y es parte integrante de la presente Ordenanza.

ARTÍCULO 2°.- Autorizar el dictado de los mencionados Cursos en la Facultad Regional Córdoba con el Cuerpo Docente que figura en el Anexo II y es parte integrante de la presente Ordenanza.

ARTÍCULO 3°.- Regístrese. Comuníquese y archívese.

ORDENANZA Nº 1173

Ing. HÉCTOR CARLOS BROTTTO  
RECTOR

A. U. S. RICARDO F. O. SALLER  
Secretario del Consejo Superior



**ORDENANZA Nº 1173**

**ANEXO I**

**CURSOS DE POSGRADO DE ACTUALIZACIÓN**

**I - PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES**

**1. FUNDAMENTACIÓN**

El curso aborda temas básicos de la física de la materia condensada, en particular de la física de metales, con el propósito de brindar al estudiante elementos necesarios para la comprensión de los mecanismos microscópicos responsables de las propiedades macroscópicas observadas (mecánicas, térmicas, ópticas, magnéticas, entre otras extremadamente sensibles a la microestructura). Se estudian los elementos microestructurales relevantes, los procesos de obtención de las diferentes microestructuras y la estabilidad de las mismas.

**2. JUSTIFICACIÓN**

Doctorandos de FAMAF-UNC, de la FCEFyN, y del CITeQ-FRC-UTN desarrollan sus carreras de maestría o doctorado en temas donde el conocimiento de la física del sólido es de importancia.

**3. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo es brindar herramientas para el diseño y la optimización de materiales con propiedades específicas, a partir del conocimiento de las microestructuras y de los diferentes mecanismos operativos en ellas.

**4. CONTENIDOS MÍNIMOS**

*R*



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

### **UNIDAD I: Estructuras de metales puros**

Introducción a la teoría de electrones en sólidos. Tipos de enlaces. Tipos de sólidos característicos. La molécula de polímero, enlace y estructura. Potenciales de interacción. Influencia de los enlaces en las propiedades físicas. Propiedades de los sólidos dependientes del tipo de potencial de interacción: temperatura de fusión, módulo elástico y coeficiente de dilatación térmica. Resolución de problemas.

### **UNIDAD 2: Estructuras cristalinas**

Revisión de conceptos básicos de cristalografía. Sólidos amorfos y cristalinos. Redes espaciales. Celda unitaria. Celda Primitiva. Redes de Bravais. Principales estructuras cristalinas metálicas. Cristales cúbicos: simples (SC), centrados en las caras (FCC), centrados en el cuerpo (BCC). Estructura Hexagonal (HCP). Otras estructuras cristalinas. Índices de Miller. Índices de planos y direcciones cristalográficas en sistemas cúbicos y hexagonales. Modelo de esferas rígidas. Densidad de distintas estructuras cristalinas. Número de coordinación. Sitios intersticiales, tamaños. Sitios intersticiales en diferentes estructuras. Alotropía o polimorfismo. Análisis de estructuras cristalinas. Proyección estereográfica. Grupo de simetría puntual. Grupo de simetría espacial. Textura Rayos X. Difracción de rayos X. Difracción por un cristal. Condiciones de difracción. Ley de Bragg. Métodos experimentales de difracción. Factor de estructura. Resolución de problemas.

### **UNIDAD 3: Estructura de Soluciones sólidas**

Soluciones. Estructura de las soluciones sólidas. Soluciones intersticiales y sustitucionales. Reglas de solubilidad. Cantidades parciales molares. Energía libre de formación de una solución. Solución ideal. Aproximación cuasiquímica aplicada a soluciones ideales y regulares. Fases intermedias con solubilidad sólida ancha.

Espaciados de la red en solución sólida. Orden en soluciones. Tipo de superredes.



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

Superredes de largo alcance. Orden de corto y largo alcance. Resolución de problemas.

#### **UNIDAD 4: Estructura y propiedades de algunos intermetálicos**

Energía libre de fases intermetálicas. Concentración de electrones y zonas de Brillouin. Defectos en la red. Fases de Laves. Fase sigma. Fases intermedias intersticiales. Resolución de problemas.

#### **UNIDAD 5: Diagramas de fase y su determinación**

Equilibrio entre fases de composición variable. Solubilidad de una componente entre otra fase. Ecuación de Thompson-Freundlich. Solubilidad retrógrada. Energía libre de sistemas binarios (AB). Energía libre versus composición para el caso: a) A y B tienen la misma estructura cristalina y b) A y B tienen diferente estructura cristalina. Sólidos y líquidos para una solución ideal. Diagramas de fase; diferentes tipos. Gap de solubilidad. Eutéctico simple. Monotécticos. Peritécticos. Diagramas ternarios: el triángulo de composición. Sistemas cuaternarios. Técnicas experimentales para medir diagramas de fases. Diagrama de Fe-C. Diagrama de aleaciones livianas. Resolución de problemas.

#### **UNIDAD 6: Difusión**

Leyes de Fick de la difusión. Solución de la ecuación de difusión. Naturaleza de la difusión. Mecanismos de difusión atómica en sólidos. El mecanismo de vacancias. Energía libre de formación y migración de vacancias. Autodifusión en metales puros. Autodifusión y difusión de soluto en aleaciones diluidas y concentradas. Efecto Kirkendall. Cortocircuitos de difusión. La ecuación de difusión. Difusión en estado estacionario. Difusión en aleaciones sustitucionales. Difusión a lo largo del borde de grano. Concentración de defectos en no-equilibrio. Ejemplos en aleaciones ferrosas y no ferrosas. Resolución de problemas.



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

### **UNIDAD 7: Defectos en cristales**

Dislocaciones. Dislocaciones de borde, de hélice y mixtas. Dislocaciones extendidas. Dislocaciones parciales. Fallas de apilamiento. Propiedades de las dislocaciones. Dislocaciones en cristales iónicos. Movimiento de dislocaciones. Trepado y deslizamiento cruzado. Interacción entre dislocaciones. Jogs y kinks. Multiplicación de dislocaciones. Interacción entre dislocaciones y defectos puntuales. Difusión atómica en dislocaciones. Fallas de apilamiento. Maclas. Energía de falla de apilamiento. Bordes de grano. Tipos de bordes de grano y sus propiedades. Movimiento del borde de grano: deslizamiento y migración. Difusión por borde de grano. Poros internos. Interfases. Resolución de problemas.

### **UNIDAD 8: Solidificación**

Nucleación homogénea y crecimiento de una segunda fase. Nucleación heterogénea. Solidificación de materiales puros y de aleaciones. Cinética de la interfaz, redistribución de soluto frente a una interfaz plana. Morfologías de la interfaz sólido líquido. Crecimiento dendrítico. Solidificación unidireccional. Resolución de problemas.

### **UNIDAD 9: Transformaciones de fase**

Transformaciones de fase. Fuerzas impulsoras. Transformaciones difusivas y displacidas. Transformaciones controladas por difusión en volumen y por difusión en la interfase. Cinética de transformaciones de fase difusivas. Ecuación de Avrami. Diagramas TTT. Transformación martensítica. Diagramas de fases metaestables. Cinética de precipitación de fases metaestables. Ejemplos en aleaciones ferrosas y no ferrosas. Resolución de problemas.

### **UNIDAD 10. Estabilidad de microestructuras**

Contribuciones a la energía libre de una dada microestructura. Energía libre química, de



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

deformación, interfacial, magnética. Exceso de energía libre de una microestructura. Fuerza impulsora de la transformación microestructural. Mecanismos de reducción del exceso de energía libre: crecimiento y disolución de segundas fases, engrosamiento de precipitados, recuperación, poligonización, recristalización, crecimiento de grano. Crecimiento anómalo de grano. Efecto de la deformación y la temperatura. Resolución de problemas.

## **5. DURACIÓN**

OCHENTA (80) horas, las cuales incluyen clases teóricas y prácticas.

## **6. METODOLOGÍA**

El régimen de cursado previsto es presencial.

El cursado contempla el dictado de clases teóricas, clases prácticas y el desarrollo de tres trabajos experimentales sobre temas del curso.

## **7. EVALUACIÓN Y PROMOCIÓN**

La promoción la obtienen los cursantes que, habiendo asistido con regularidad a las clases (mínimo 80% de asistencia) y cumplido con los trabajos prácticos, aprueben la evaluación final prevista.

## **II - MATERIALES MAGNÉTICOS: PRINCIPIOS Y APLICACIONES**

### **1. FUNDAMENTACIÓN**

El enfoque del curso y los temas que se abordan apuntan a iniciar al estudiante en la problemática del “diseño para el funcionamiento óptimo” de materiales con propiedades magnéticas específicas. Sin tocar temas de física atómica en profundidad ni realizar un estudio exhaustivo de los distintos materiales magnéticos que se encuentran en la



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

actualidad, el curso trata de ligar las propiedades estructurales a niveles microscópicos y mesoscópicos con las diferentes propiedades magnéticas (magnetización, coercitividad, pérdidas, magnetoresistencia, piezomagnetismo) que se observan.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

Investigadores de FAMAF y del CiTQ desarrollan conjuntamente líneas de trabajo que abarcan materiales magnéticos nanoestructurados.

## **3. OBJETIVOS GENERALES**

Brindar un panorama amplio de los materiales magnéticos de interés tecnológico en la actualidad y de sus propiedades, poniendo énfasis en el origen microscópico de las mismas.

Identificar y comprender las diferencias entre los cursos de electromagnetismo y el diseño de materiales magnéticos de interés práctico.

## **4. CONTENIDOS MÍNIMOS**

### **UNIDAD I: Introducción**

Cómo es un material magnético. Ecuaciones de Maxwell. Magnitudes magnéticas fundamentales y magnitudes magnéticas de interés práctico. Unidades. Interacciones magnéticas. Microestructuras magnéticas. Dominios. Partículas pequeñas. Materiales magnéticos duros, blandos y ultra-blandos.

### **UNIDAD 2: Diamagnetismo y paramagnetismo**

Momentos de átomos e iones: momentos de iones 3d y 4f, reglas de Hund. Efecto del campo cristalino, complejos octaédricos, tetraédricos y planos. Paramagnetismo, función de Brillouin. Susceptibilidad de un paramagneto, ley de Curie. Límite clásico, función de Langevin, ejemplos.



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

### **UNIDAD 3: Interacción de intercambio y orden magnético**

Superposición de orbitales de átomos hidrogenoides vecinos, asimetría de los estados cuánticos electrónicos. Intercambio directo. Teoría del campo molecular. Ferromagnetismo, ley de Curie-Weiss, dependencia de la magnetización con la temperatura. Antiferromagnetismo, casos de dos subredes. Temperaturas características, ejemplos. Ferrimagnetismo, óxidos de metales de transición. Puntos de compensación. Garnets de metales de transición y tierras raras. Expresiones empíricas para  $M(T)$ . Comparación de la energía de intercambio con la interacción dipolar.

### **UNIDAD 4: Otras interacciones**

Orbitales atómicos y moleculares. Estados ligantes y antiligantes. Superintercambio, ejemplos:  $MnO$ ,  $Fe_3O_4$ . Espinelas  $M_2+Fe_2O_4$  ( $M= Cu, Ni, Co, Fe, Mn$ ). Doble intercambio, manganitas. Intercambio en metales, electrones itinerantes. Curva de Slater-Pauling. Elementos de transición con diferente llenado de la banda 3d. Curva de Bethe-Slater. Modelo de bandas rígidas. Ferromagnetos débiles y fuertes. Intercambio indirecto en metales: RKKY. Caso de átomos magnéticos diluidos. Oscilaciones de Friedel y acoplamiento RKKY. Vidrios de spin, vidrios de clusters de spin, acoplamientos en multicapas.

### **UNIDAD 5: Histéresis magnética**

Tipos de histéresis. Histéresis independiente del tiempo. Fenómenos dependientes del tiempo. Corrientes parásitas y pérdidas magnéticas. Relajación térmicamente activada. Reptación. Viscosidad magnética.

### **UNIDAD 6: Energía libre magnética**

Términos de la energía libre. Breve introducción a sus diferentes contribuciones. Anisotropía, Anisotropía en metales y aislantes, Magnetostricción en metales y aislantes.



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

Anisotropía magneto elástica. Influencia de las tensiones sobre la magnetización. Energía dipolar. Energía de intercambio. Energía en un campo externo. Dominios y paredes de dominios magnéticos. Espesor y densidad de energía de paredes de dominio de Bloch y de paredes de Néel. Dominios de clausura. Dominios en films delgados. Partículas finas mono-dominio. Superparamagnetismo. Microestructura atómica y microestructura magnética.

#### **UNIDAD 7: Anisotropía magnetocristalina**

Efectos de los acoplamientos spinórbita y con el campo cristalino. Diferentes simetrías: cúbica, tetragonal, hexagonal, etc. Expresiones fenomenológicas. Curvas de energía constante. Ejemplos: Fe, Co, Ni, magnetita. Medidas en monocristales. Ejes fáciles y duros. Campo de anisotropía. Anisotropías de superficie e interfaz.

#### **UNIDAD 8: Partículas pequeñas monodominio**

Partícula anisotrópica en presencia de un campo externo, modelo de Stoner-Wohlfarth. Frecuencia de salto y tiempo de relajación. Contribución superficial a la anisotropía de partículas nanométricas. Viscosidad magnética de un sistema de partículas. Regímenes bloqueados y superparamagnéticos para diferentes técnicas de observación. Ejemplos: del comportamiento de sistemas de partículas de hematita; comportamiento superparamagnético de una aleación CoCu.

#### **UNIDAD 9: Energía magnetostática (EM) y dominios magnéticos**

Determinación de EM a partir de la distribución de magnetización en un cuerpo. Solución de las ecuaciones de Maxwell, aplicación a: esferas, cilindros y elipsoides. Dependencia de EM con el número de dominios. Extensión a cuerpos con superficies no cuadráticas. Campo y factor demagnetizantes, campo efectivo, ejemplos. Anisotropía de forma. Paredes de dominio, energía de pared. Ancho de pared de equilibrio. Número de



*Luciano Ruiz*

“2008 – Año de la Enseñanza de las Ciencias”

*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

dominios en equilibrio y tamaño característico. Técnicas de observación de dominios: Bitter, efecto Kerr (microscopía y MOKE), dispositivos de almacenamiento magneto-óptico de datos. Observación de dominios por efecto Faraday, microscopía TEM Lorentz, microscopía SEM, y SEM con análisis de polarización (SEMPA), microscopía de fuerza magnética, topografía por difracción de RX y neutrones. Comparación de escalas de medición de los diferentes métodos.

#### **UNIDAD 10: Magnetostricción y energía magnetoelástica**

Definiciones. Expresiones fenomenológicas de la magnetostricción para diferentes simetrías. Acoplamiento de la magnetostricción con la magnetización. Efectos mecánicos sobre la magnetización, energía magnetoelástica. Generalización de la anisotropía: magnetocristalina, magnetostática o de forma, magnetoelástica, etc. Sensores magnetoelásticos microcompuestos bi y tricapa basados en aleaciones amorfas. Aplicaciones.

#### **UNIDAD 11: Procesos de magnetización**

Aproximación de campo aplicado cuasi-estático. Rotación reversible. Rotación homogénea irreversible. Modos de rotación no homogéneos. Movimiento de paredes de dominio. Nucleación y expansión de dominios inversos. Ondas de spin en ferromagnetos. Mecanismos de coercitividad.

#### **UNIDAD 12: Materiales magnéticos blandos**

Comportamiento ferromagnético blando de aleaciones Si-Fe, Fe-Ni, Fe-Co y de ferrites blandas, amorfos y aleaciones nanocristalinas. Permeabilidad, rotación irreversible AC, profundidad de skin. Aplicaciones: pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Resonancia ferromagnética.



*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

**UNIDAD 13: Magnetismo en materiales magnéticos nanocristalinos y amorfos**

Sólidos amorfos. Interacciones competitivas. Fluctuaciones de intercambio. Anisotropía local aleatoria. Modelos de magnetismo en amorfos. Sistemas granulares nanocristalinos. Fluctuaciones de intercambio. Efectos de la anisotropía aleatoria sobre las propiedades. Escalas de longitud características. Mecanismos de coercitividad.

**UNIDAD 14: Materiales magnéticos duros**

M-H, B-H, (B-H)max, partículas finas. Nucleación vs. Pinning. Materiales modelos: Alnico, Ferrita de Ba, Co-RE, Fe-RE-B.

**UNIDAD 15: Magnetismo en superficies y películas delgadas**

Estructura electrónica en la superficie y magnetismo. Momentos superficiales. Fases metastables. Misfitstrain. Crecimiento epitaxial. Anisotropía magnética superficial y magnetostricción. Dominios. Dispositivos.

**5. DURACIÓN**

SESENTA (60) horas, las cuales incluyen clases teóricas y prácticas.

**6. METODOLOGÍA**

El régimen de cursado previsto es presencial.

El cursado contempla el dictado de clases teóricas, clases prácticas y el desarrollo de tres trabajos experimentales sobre temas del curso.

**7. EVALUACIÓN Y PROMOCIÓN**

La promoción la obtienen los cursantes que, habiendo asistido con regularidad a las clases (mínimo 80% de asistencia) y cumplido con los trabajos prácticos, aprueben la evaluación final prevista.

-----



*Asociación Paralela*

“2008 – Año de la Enseñanza de las Ciencias”

*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

**ORDENANZA Nº 1173**

**ANEXO II**

**CURSOS DE POSGRADO DE ACTUALIZACIÓN  
EN LA FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA**

**I- PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES**

***Cuerpo Académico***

- Silvia SILVETTI  
Licenciada en Física, Universidad Nacional de Córdoba.  
Doctora en Física, Universidad Nacional de Córdoba.  
Profesora Asociada en Universidad Nacional de Córdoba.  
Categoría II en Programa de Incentivos a docentes investigadores.  
Dirección de tesis de grado y posgrado.  
Dirección de becarios.
- Silvia Elena URRETA  
Licenciada en Física, Universidad Nacional de Córdoba.  
Doctora en Física, Universidad Nacional de Córdoba.  
Categoría I en Programa de Incentivos a docentes investigadores.  
Profesora Asociada en Universidad Nacional de Córdoba.  
Miembro de Tribunales de Tesis de Posgrado.  
Dirección de tesis de grado y posgrado.  
Dirección de becarios.



*Luciano Bualto*

“2008 – Año de la Enseñanza de las Ciencias”

*Ministerio de Educación,  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rectorado*

## **II- MATERIALES MAGNÉTICOS: PRINCIPIOS Y APLICACIONES**

### **Cuerpo Académico**

- Marcos OLIVA

Licenciado en Física, Universidad Nacional de Córdoba.

Doctor en Física, Universidad Nacional de Córdoba.

Investigador Asistente del CONICET.

Docente en Universidad Nacional de Córdoba.

Dirección de becas de posgrado.

- Silvia URRETA

-----