



## Programa de METALURGIA FÍSICA

### 1. NOMBRE DE LA UNIDAD CURRICULAR

Metalurgia Física (código en Bedelía: 1719)

### 2. CRÉDITOS

12 créditos

### 3. OBJETIVOS DE LA UNIDAD CURRICULAR

Conocer, comprender y aplicar los fundamentos físicos de los materiales metálicos que se utilizan en ingeniería mecánica para el diseño, la fabricación y el mantenimiento de maquinaria, herramientas, estructuras o productos industriales, incluyendo conocimientos sobre tecnología de manufactura termo-mecánica de materiales metálicos utilizada en talleres mecánicos-metalúrgicos, y uso de normas de materiales y ensayos asociadas.

Para lograr los objetivos planteados, se espera que el estudiante que apruebe el curso, adquiera bases de metalurgia física sobre endurecimiento, recocido, formabilidad, fractura y soldadura de materiales metálicos, para crear un diseño básico o análisis de un proceso metalúrgico de naturaleza termica, mecánica o termo-mecánica, que sea verificable por ensayos. Los propósitos de análisis y diseño de procesos pueden ser seleccionar materiales para diseño mecánico, fabricar componentes y construir sistemas, desarrollar/utilizar criterios de calidad para aceptación y/o calificación de materiales y procedimientos, anticipar fallas en servicio o analizar fallas acontecidas. Se enfatizará que el estudiante aprenda a diseñar procesos de recocido, temple y revenido en aceros al carbono y analizar procesos de trabajado mecánico y fractura.

### 4. METODOLOGÍA DE ENSEÑANZA

El curso tendrá una intensidad semanal de 6 horas de clases presenciales teórico-prácticas que podrán incluir actividades en laboratorio o visitas a industrias. Estas horas presenciales se complementan aproximadamente con 6 horas semanales de dedicación personal, entre las cuales se dedicará esfuerzo a la entrega obligatoria de tareas domiciliarias denominadas Tareas Aplicadas en Metalurgia (TAMs), en formato de informes y en equipos de máximo 3 integrantes. Las TAMs serán actividades integradoras obligatorias. La evaluación repartirá un total de 100 puntos entre 2 pruebas parciales escritas de 40 puntos cada una y la nota final asociada a las TAMs de 20 puntos.



## 5. TEMARIO

1. Metalurgia en la ingeniería mecánica: introducción a metalurgia física como composición de mecánica y termodinámica de materiales metálicos, y su vinculación intrínseca con la ingeniería mecánica a través de los conceptos de diseño, fabricación, ensayos, calidad, instalación, operación, mantenimiento, estado límite, confiabilidad, daño, integridad, vida residual y análisis de fallas.
2. Procesos, propiedades, composición y estructuras: introducción a la historia de un material metálico descrita en procesos y a sus comportamientos descritos en propiedades, destacando al comportamiento termo-mecánico. Introducción a la composición química de un material metálico y a las estructuras posibles a todos los niveles de escala (nano, micro y macro). Introducción al Paradigma de la Ciencia e Ingeniería de Materiales como herramienta de análisis dónde se vinculan procesos, propiedades, composición y estructuras con desempeño.
3. Metalografía (análisis estructural de materiales metálicos): análisis microestructural y macroestructural por microscopía óptica, preparación de muestras, revelación de estructuras, identificación de objetos estructurales, metalografía cuantitativa (tamaños de grano, áreas de fases, distribuciones, isotropía, anisotropía, segregación), uso de microscopía electrónica de barrido.
4. Bases físicas para comprender procesos metalúrgicos: termodinámica y cinética, energía libre, fuerza motriz para una transformación, estabilidad, procesos termo-activados y Ley de Arrhenius, transferencia de calor y propiedades térmicas, transferencia de masa por difusión, imperfecciones cristalinas (0D, 1D y 2D), discontinuidades, fases, interfases, diagramas de estructuras de equilibrio, transformaciones de fases y mezclas de fases, deformación plástica y tensiones residuales, mecanismos de endurecimiento, transformaciones difusionales y el modelo de nucleación y crecimiento, diagramas de temperatura-tiempo-transformación, Ostwald ripening, esferoidización, procesos de recuperación-recristalización-crecimiento de grano, definición de recocidos y el uso del modelo de Larson-Miller, relaciones entre estructuras y propiedades mecánicas.
5. Generalización de transformaciones metalúrgicas: transformaciones de fases y transformaciones de formación/destrucción de imperfecciones cristalinas, estado metalúrgico, procesos térmicos y/o mecánicos, tratamientos térmicos de recocido (annealing) y de endurecimiento (hardening), productos metalúrgicos -placas y perfiles-.
6. Aceros al carbono: simples (plain carbon steels) y levemente aleados (low alloy carbon steels), transformaciones difusionales (ferríticas, perlíticas, bainíticas), transformación martensítica, características de la martensita de hierro, descomposición térmica de estructuras (revenido generalizado), tratamientos térmicos de endurecimiento por temple y revenido (QT = quench and temper).



7. Diseño de tratamientos térmicos en aceros al carbono: endurecimientos por temple y revenido: definiciones de templabilidad (hardenability) según ensayo Jominy (end-quench test ISO 642), según diagramas CT y según Grossmann, número de Biot y número de Grossmann, redondo equivalente, métodos analíticos (velocidad a 700°C, curvas de Lamont, curvas de Grange-Hbribal-Porter, modelo de Grange y Baughman, método de Zagreb), austenización y disolución de carburos, fisuras de temple, cálculo de tiempos de tratamientos (rampas de calentamiento, enfriamiento y de meseta), tecnología de hornos y de baños, decarburización y oxidación seca, propiedades de aceros templados y revenidos, endurecimiento superficial (case hardening).
8. Diseño de tratamientos térmicos en aceros al carbono: recocidos y normalizados: uso de diagramas IT y CT, cálculo de tiempos de tratamientos, propiedades de aceros recocidos y de aceros normalizados, normas EN 10083, ISO 898, EN 10052.
9. Aleaciones de aluminio forjado (wrought aluminium alloys): características, tratamientos térmicos de endurecimiento por temple y revenido (QT = age hardening = T6), sobreenviejecimiento, comparaciones con aceros al carbono.
10. Solidificación y soldadura de materiales metálicos: características de la transformación solidificación y de las fases implicadas, modos de crecimiento de cristales, productos fundidos y sus propiedades-estructuras, características de procesos de soldadura, factores y tipos de unión en soldaduras por arco eléctrico, productos soldados y sus propiedades-estructuras, soldabilidad.
11. Aceros de alta aleación: fundamentos físicos y usos de aceros para herramientas (tool steels) y de aceros inoxidable (stainless steels).
12. Aleaciones de ingeniería: resumen integrado y actualizado de las aleaciones de ingeniería en bases Fe, Al, Cu y Ti, incluyendo las ya vistas.
13. Análisis de deformación plástica y formabilidad en materiales metálicos: procesos de metalurgia mecánica, plasticidad (tensión y deformación verdadera, conservación del volumen, criterios de fluencia, tensión efectiva para la deformación plástica, curva de flujo, trabajado mecánico en frío y en caliente), inestabilidad plástica en tracción, análisis de procesos monotónicos-planos-proporcionales con aplicaciones industriales (incluyendo formabilidad límite) en trabajado mecánico de chapas y cuerpos (sheet and bulk metal forming).
14. Elementos de mecánica de la fractura lineal elástica en materiales metálicos: resistencia cohesiva teórica, análisis de Inglis sobre la concentración de tensiones en fisuras, teorías de Griffith, Orowan e Irwin sobre la energía de deformación liberada en el avance de una fisura, curva R, análisis de tensiones y plasticidad en fisuras (parámetros K, modos de fractura y zona plástica), tenacidad, fractura monotónica y por fatiga, evaluación de integridad mediante control de fractura y sobrecarga (tamaño crítico de fisuras y colapso plástico - FAD-), criterio de diseño Leak Before Break, fractografía y análisis de fallas.



15. Síntesis del curso para uso de conocimientos: verificar el cumplimiento de los objetivos del curso, discutiendo, resumiendo e integrando las distintas partes del mismo. Para discutir sobre diseño y fabricación de componentes y calificación de materiales, se introducirá el código ASME para Calderas y Recipientes a Presión. Para discutir sobre anticipar o analizar fallas, se presentará la norma API 579-1/ASME FFS-1 como herramienta para evaluar la integridad de sistemas mecánicos en mantenimiento industrial, conectando el concepto de Fitness For Service (FFS) con los de mecanismos de daño y falla.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Se priorizó el uso de bibliografía perteneciente a la editorial Springer tanto por su calidad académica como por su disponibilidad digital mediante el portal Timbó al año 2023, el cual permite que estudiantes de la Udelar accedan fácilmente a la misma.

Tema	Básica	Complementaria
1) Metalurgia en la ingeniería mecánica	(1) (2) (3) (4)	(23)
2) Procesos, propiedades, composición y estructuras	(1) (3) (4) (5)	-
3) Metalografía	(1) (6)	(24)
4) Bases físicas para comprender procesos metalúrgicos	(1) (7) (8)	(25)
5) Generalización de transformaciones metalúrgicas	(1) (7) (8)	(25)
6) Aceros al carbono	(1) (8) (9)	(25)
7) Diseño de tratamientos térmicos en aceros al carbono: endurecimientos por temple y revenido	(1) (9) (10)	-
8) Diseño de tratamientos térmicos en aceros al carbono: recocidos y normalizados	(1) (9) (10) (11) (12) (13)	-
9) Aleaciones de aluminio forjado	(1) (3) (4)	-
10) Solidificación y soldadura de materiales metálicos	(1) (14) (15)	(25)
11) Aceros de alta aleación	(1) (9) (10)	(25)
12) Aleaciones de ingeniería	(1) (3) (4)	(25)
13) Análisis de deformación plástica y formabilidad en materiales metálicos	(1) (16) (17) (18)	(26)
14) Elementos de mecánica de la fractura lineal elástica en materiales metálicos	(1) (17) (19) (20)	(26)
15) Síntesis del curso para uso de conocimientos	(1) (3) (21) (22)	-



## 6.1 Básica

1. Lecciones en el formato de notas teórico-prácticas y ejercicios, creadas por los docentes del curso, escritas en idioma español y actualizadas periódicamente. Este será el material de estudio principal, objeto de las evaluaciones.

El resto de la bibliografía que se presentará es la principal fuente que se utilizó para crear a (1) y servirá para señalar lecturas puntuales como parte de actividades de aprendizaje o practicar la extracción de información relevante para llevar a cabo aplicaciones, análisis y resoluciones.

2. George Ellwood Dieter autor (2013, 5ta edición). Engineering Design. EEUU: Editorial McGraw-Hill.
3. Karl Grote y Hamid Hefazi editores (2021, 2da edición). Springer Handbook of Mechanical Engineering. Suiza: Editorial Springer Nature Switzerland.
4. Hans Warlimont y Werner Martienssen editores (2018, 2da edición). Springer Handbook of Materials Data. Suiza: Editorial Springer Nature Switzerland.
5. Horst Czichos y Tetsuya Saito y Leslie Smith editores (2011, 2da edición). Springer Handbook of Metrology and Testing. Alemania: Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
6. Bruce L Bramfitt y Arlan O. Benscoter autores (2002, 1era edición). Metallographer's Guide, Practices and Procedures for Irons and Steels. EEUU: Editorial ASM International.
7. Günter Gottstein autor (2004, 1era edición). Physical Foundations of Materials Science. Alemania: Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
8. David A. Porter y Kenneth E. Easterling y Mohamed Y. Sherif autores (2022, 4ta edición). Phase Transformations in Metals and Alloys. EEUU: Editorial CRC Press, Taylor and Francis Group.
9. George E. Totten editor (2007, 2da edición). Steel Heat Treatment Handbook, Metallurgy and Technologies. EEUU: Editorial CRC Press, Taylor and Francis Group.
10. Jon L. Dossett autor (2020, 1era edición). Practical Heat Treating: Basic Principles. EEUU: Editorial ASM International.
11. Norma European Standard EN 10083 Steels for Quenching and Tempering.
12. Norma ISO 898 Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel.
13. Norma European Standard EN 10052 Vocabulary of Heat Treatment Terms for Ferrous Products.
14. Doru Michael Stefanescu autor (2015, 3era edición). Science and Engineering of Casting and Solidification. Suiza: Editorial Springer Nature Switzerland.



15. J. F. Lancaster autor (1980, 3era edición). Metallurgy of Welding. Holanda: Editorial Springer Dordrecht.
16. William F. Hosford y Robert M. Caddell autores (2011, 4ta edición). Metal Forming, Mechanics and Metallurgy. EEUU: Editorial Cambridge University Press.
17. Amit Bhaduri autor (2018, 1era edición). Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Singapur: Editorial Springer Nature Singapore.
18. Z. Marciniak y J. L. Duncan y S. J. Hu autores (2002, 2da edición). Mechanics of Sheet Metal Forming. Reino Unido: Editorial Butterworth-Heinemann.
19. Nestor Pérez autor (2017, 2da edición). Fracture Mechanics. Suiza: Editorial Springer Nature Switzerland.
20. Jorge Luis González Velázquez autor (2018, 1era edición). Fractography and Failure Analysis. Suiza: Editorial Springer Nature Switzerland.
21. Norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code:2019.
22. Norma API 579-1/ASME FFS-1:2016 Fitness-for-Service.

## 6.2 Complementaria

23. Uday Shanker Dixit y Manjuri Hazarika y J. Paulo Davim autores (2017, 1era edición). A Brief History of Mechanical Engineering. Suiza: Editorial Springer Nature Switzerland.
24. George F. Vander Voort editor (1986, 1era edición). Applied Metallography. EEUU: Editorial Springer New York.
25. Hans Berns y Werner Theisen autores (2008, 1era edición). Ferrous Materials, Steel and Cast Iron. Alemania: Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
26. George Ellwood Dieter autor (1988, 3era edición). Mechanical Metallurgy. Reino Unido: Editorial McGraw-Hill.

## 7. CONOCIMIENTOS PREVIOS EXIGIDOS Y RECOMENDADOS

**7.1 Conocimientos Previos Exigidos:** Bases de Cálculo Diferencial, Álgebra Lineal, Comportamiento Mecánico de Materiales, Física Térmica y Ciencia de Materiales.

**7.2 Conocimientos Previos Recomendados:** Bases de Transferencia de Calor.

### ANEXO A

#### Para todas las Carreras

#### A1) INSTITUTO

Instituto de Ensayo de Materiales (IEM / Departamento de Metales).



## A2) CRONOGRAMA TENTATIVO

Consiste en un cronograma de avance semanal con detalle de las horas de clase asignadas a cada tema.

Semana 1	Tema 1 (4 hs de clase). Tema 2 (2 hs de clase).
Semana 2	Tema 2 (2 hs de clase). Tema 3 (4 hs de clase).
Semana 3	Tema 4 (6 hs de clase).
Semana 4	Tema 4 (6 hs de clase).
Semana 5	Tema 5 (2 hs de clase). Tema 6 (2 hs de clase). Tema 7 (2 hs de clase).
Semana 6	Tema 7 (6 hs de clase).
Semana 7	Tema 7 (4 hs de clase). Repasos y consultas para el 1er Parcial.
Semana 8	Tema 8 (4 hs de clase). Tema 9 (2 hs de clase). Comienzan TAMs.
Semana 9	Tema 10 (6 hs de clase).
Semana 10	Tema 11 (4 hs de clase). Tema 12 (2 hs de clase).
Semana 11	Tema 13 (6 hs de clase)
Semana 12	Tema 13 (6 hs de clase)
Semana 13	Tema 14 (6 hs de clase)
Semana 14	Tema 14 (6 hs de clase) Visitas a industrias mecánicas-metalúrgicas.
Semana 15	Tema 15. Entregas de TAMs. Repasos y consultas para el 2do Parcial.

## A3) MODALIDAD DEL CURSO Y PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

El desempeño de cada estudiante se cuantificará mediante 3 instancias de evaluación que juntas sumarán máximo 100 puntos de curso:

1. Primera prueba parcial escrita de 40 puntos de curso máximo. Se realizará entre la semana 7 y la semana 8 de clases. Evaluará conocimientos teórico-prácticos hasta el tema 7 incluido, sin profundizar en la práctica del diseño y análisis de tratamientos térmicos asociados al tema 7.
2. Tareas domiciliarias de entrega obligatoria denominadas Tareas Aplicadas en Metalurgia -TAMs-. Comenzarán a solicitarse a partir de la semana 8. Los estudiantes conformarán equipos de mínimo 2 y máximo 3 integrantes que deberán mantener durante el resto del curso. Las TAMs serán ejercicios integradores y/o profundizadores de conocimientos, buscando desarrollar habilidades básicas de análisis y diseño. Se deberá entregar un informe escrito por cada una que el cuerpo docente defina. La cantidad de TAMs que se fijará será mínimo 1 y máximo 3, siendo obligatoria la entrega de toda TAM que se defina. De la evaluación de todas las TAMs entregadas por un equipo de estudiantes, el cuerpo docente asignará un máximo de 20 puntos a cada equipo de estudiantes. Cada estudiante de un equipo obtendrá puntos de curso en la misma cantidad que su equipo recibió. Dentro de las TAMs que se definan, siempre alguna de ellas tratará la práctica del diseño y análisis de tratamientos térmicos asociados al tema 7.



3. Segunda prueba parcial escrita de 40 puntos de curso máximo. Se realizará después de la semana 15. Evaluará conocimientos teórico-prácticos desde el tema 8 hasta el tema 15 inclusive.

Para cada estudiante, el resultado del curso se define de la siguiente manera:

- Exoneración de examen final: se debe obtener una cantidad mayor o igual a 60 puntos de curso, cumpliendo haber obtenido un mínimo de 10 puntos por las TAMs y un mínimo de 15 puntos en cada prueba parcial escrita. Este resultado implica la obtención de los créditos de la unidad curricular.
- Suficiencia en el curso (aprobación del curso): se debe obtener una cantidad mayor o igual a 30 puntos de curso, cumpliendo haber obtenido un mínimo de 10 puntos por las TAMs. Este resultado implica la habilitación a rendir un examen final durante 2 años o 3 instancias de examen. El examen final podrá desarrollarse como una prueba escrita teórico-práctica de 100 puntos máximo (aprobación con un mínimo de 60 puntos) o un examen oral. La aprobación del examen final implica la obtención de los créditos de la unidad curricular.
- Insuficiencia en el curso: no cumplir con la suficiencia en el curso da como resultado la reprobación del mismo, lo cual implica que el estudiante deba volver a cursar para intentar obtener los créditos de la unidad curricular.

#### **A4) CALIDAD DE LIBRE**

En esta unidad curricular no se accederá a la calidad de libre por las existencia de las TAMs.

#### **A5) CUPOS DE LA UNIDAD CURRICULAR**

Esta unidad curricular no tiene cupos mínimos ni máximos.

#### **B1) ÁREA DE FORMACIÓN**

Materiales y Diseño Mecánico dentro de las carreras de grado en Ingeniería Industrial Mecánica e Ingeniería Naval.

#### **B2) UNIDADES CURRICULARES PREVIAS**

Curso:

- Física Térmica (curso)
- Introducción a la Ciencia de Materiales (curso)
- Comportamiento Mecánico de Materiales 1 (curso)

Examen:

- Metalurgia Física (curso)