



## **Programa de LABORATORIO DE MODELADO DE PROCESOS TÉRMICOS METALÚRGICOS**

### **1. NOMBRE DE LA UNIDAD CURRICULAR**

Laboratorio de Modelado de Procesos Térmicos Metalúrgicos

### **2. CRÉDITOS**

3 créditos

### **3. OBJETIVOS DE LA UNIDAD CURRICULAR**

Partiendo de la base construida en los cursos de Metalurgia Física, Transferencia de Calor y Computación, se propone continuar desarrollando en un estudiante avanzado de ingeniería físico-matemática, industrial mecánica, o naval, la capacidad de análisis y desarrollo en situaciones reales de ingeniería aplicada, basada en el uso de los fundamentos físicos y metalúrgicos de los materiales metálicos. Se busca generar una experiencia específica en modelado analítico, modelado numérico, modelado experimental y validación entre modelos como herramientas básicas de la ingeniería.

La metodología será de laboratorio, enseñanza directa y tareas en equipo que devienen en un informe final.

Los procesos térmicos metalúrgicos que son objeto de estudio, involucran procesos de transferencia de calor, en régimen estacionario o transitorio, aplicados a materiales metálicos. Se espera que el estudiante adquiera técnicas de uso típico en modelado de procesos térmicos metalúrgicos, que involucran integrar conocimientos, interpretar y utilizar bibliografía, hacer ensayos en materiales y procesar la información generada. Se enfatiza que el estudiante aprenda a realizar programación matemática mediante lenguajes tipo Octave para hacer modelados numéricos y analíticos, modelar y armar experimentos físicos reales, manejar instrumentos de medición y hacer ensayos con énfasis en uso de durometría, termometría y metalografía por microscopía óptica, con procesamiento de imágenes digitales mediante software libre tipo ImageJ.

### **4. METODOLOGÍA DE ENSEÑANZA**

El curso se dicta en un hemisemestre y la carga horaria semanal es de 3 horas de enseñanza directa, que incluyen teórico, práctico y laboratorio, y 3 horas de estudio o tarea



domiciliaria por estudiante. Los estudiantes trabajarán en grupos de entre 2 y 4 personas, que se establecerán al principio del curso y deberán perdurar hasta el final del hemisemestre, buscando desarrollar experiencia de trabajo y aprendizaje en equipo. Durante la semana 6, donde se realizan los tratamientos térmicos para validación del modelo numérico desarrollado en las clases anteriores, cada equipo trabajará individualmente en un horario asignado y con su conjunto particular de probetas. La evaluación final será 40% mediante una prueba parcial escrita, individual, y 60% mediante la entrega de un informe grupal con su correspondiente presentación.

## 5. TEMARIO

1. Introducción a modelado en ingeniería, estrategias, modelos analíticos, modelos experimentales, modelos numéricos, validación.
2. Modelado numérico en Octave de procesos térmicos 1D en régimen estacionario y validación por modelos analíticos.
3. Modelado numérico en Octave de procesos térmicos 1D en régimen transitorio y validación por modelos analíticos.
4. Aplicaciones de procesos térmicos transitorios 1D. Análisis de casos ideales y sus limitaciones. Aplicación en sistema de ejes cartesiano y cilíndrico.
5. Validación de modelos numéricos en Octave de temple de aceros al carbono mediante modelado experimental y uso de durometría, análisis metalográfico y la Analogía Jominy. según Rosenthal. Aplicaciones para determinar tamaño de zonas afectadas por el calor (ZAC) y velocidades de enfriamiento involucradas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Tema	Básica	Complementaria
Ecuaciones de transferencia de calor por conducción y convección. Solución numérica (discretización).	(1)	(4)
Modelado numérico en Octave o Matlab	(2)	(-)
Transformaciones metalúrgicas, templabilidad, ensayo de Jominy. Correlación entre velocidad de enfriamiento, microestructura y dureza.	(3)	(5)

### 6.1 Básica

1. Frank Incropera, David de Witt. (2010). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 9° edición.



2. Grupo CeCal del Instituto de Computación. (2010). Texto para la asignatura Computación 1 - Introducción a la Informática para estudiantes de Ingeniería. Oficina de Publicaciones del Centro de Estudiantes de Ingeniería.
3. William D. Callister, Jr. y David G. Rethwisch. (2018). Ciencia e ingeniería de materiales, 9° edición

## 6.2 Complementaria

4. Dossett & G.E. Totten, ASM Handbook, Volumen 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. editores. (Año).
5. ISO 642 (1999). Steel – Hardenability test by end quenching (Jominy test).

## 7. CONOCIMIENTOS PREVIOS EXIGIDOS Y RECOMENDADOS

**7.1 Conocimientos Previos Exigidos:** Nociones de transferencia de calor por conducción y convección; transformaciones metalúrgicas, relación entre microestructuras del acero y sus propiedades mecánicas, templabilidad y ensayo de Jominy; manejo seguro de equipo de laboratorio durante ensayos mecánicos; programación básica en Matlab u Octave.

**7.2 Conocimientos Previos Recomendados:** No corresponde.



## ANEXO A

### Para todas las Carreras

#### A1) INSTITUTO

Instituto de Ensayo de Materiales.

#### A2) CRONOGRAMA TENTATIVO

Semana 1	Calor y métodos de transferencia. Ecuaciones de conducción y convección. Solución numérica de las ecuaciones de calor. (3 hrs de clase teórica)
Semana 2	Modelo 1D (una dimensión) de transferencia de calor estacionario. (1 hr de clase teórica). Implementación del modelo en Octave (1 hr de clase práctica). Modelo 1D de transferencia de calor transitorio (1 hr de clase teórica)
Semana 3	Implementación del modelo anterior en Octave (1 hr de clase práctica). Soluciones en sistema cartesiano y cilíndrico (1 hr de clase teórica). Implementaciones del cambio entre sistemas (1 hr de clase práctica).
Semana 4	Templabilidad, tratamiento térmico de temple en aceros, dureza, transformaciones metalúrgicas. Ensayo de Jominy y Analogía Jominy. (1 hr de clase teórica). Análisis de resultados de ensayos de Jominy de años anteriores y ajuste de parámetros del modelo para esos casos (1 hr de clase práctica). Diseño preliminar del experimento: asignación por subgrupo de los materiales, diámetros y medios de enfriamiento. Resolución de su caso particular en función de aproximación de las variables (1 hr de clase teórico-práctica)
Semana 5	Trabajo por subgrupos*. Discusión de resultados esperados. Tratamientos térmicos en laboratorio de las probetas correspondientes a cada subgrupo. Corte, lijado, pulido y ataque de las probetas ensayadas (3 hrs de laboratorio).
Semana 6	Prueba parcial del contenido teórico del curso (1 hr de teórico). Análisis metalográfico y medición de durezas de las probetas ensayadas en la sesión anterior (2 hrs de laboratorio).
Semana 7	Presentación de resultados al público invitado, por subgrupo. Entrega de informe final de resultados.

(\*) En la semana 5, cada subgrupo de 2-4 personas trabaja de forma independiente con las probetas para las que hicieron un diseño preliminar.



### **A3) MODALIDAD DEL CURSO Y PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN**

El curso se desarrollará mediante clases teóricas, prácticas y laboratorios. Las clases teóricas se dictarán en aulas comunes, las prácticas en salas de máquinas (para facilitar la implementación del código) y los laboratorios en las instalaciones del IEM. Cada semana se dictará una clase de 3 hrs, que se divide en módulos de 1 hr, pudiendo cada uno tener una modalidad diferente (teórico, práctico o laboratorio). Se pretende de esta forma incentivar la aplicación directa del contenido dictado, la validación experimental de los modelos y el análisis teórico de los resultados físicos.

Los estudiantes conformarán equipos de mínimo 2 y máximo 4 integrantes que deberán mantener durante el resto del curso. Cada equipo deberá ajustar el modelo desarrollado durante el curso al conjunto de probetas asignado a su equipo, y realizar los tratamientos térmicos necesarios para la validación del modelo, incluyendo la preparación de las probetas para los ensayos de dureza y metalográficos. La evaluación se desarrollará mediante:

- Prueba parcial escrita del contenido teórico, realizada en la semana 6 (40% del total de puntos de curso).
- Entrega de informe final de resultados obtenidos y presentación de los resultados (60% del total de puntos entre ambas instancias).

En caso de que el informe fuera insuficiente, se puede realizar una re-entrega con un plazo de una semana extra.

Para poder aprobar curso y rendir el examen se debe:

- 1) asistir, como mínimo, al 75% de instancias de laboratorio/práctico,
- 2) obtener, como mínimo, 12 puntos en la prueba escrita,
- 3) obtener, como mínimo, 18 puntos en la entrega del informe final y presentación de resultados

Para exonerar el curso se debe:

- 1) asistir, como mínimo, al 75% de instancias de laboratorio/práctico,
- 2) obtener, como mínimo, 24 puntos en la prueba escrita,
- 3) obtener, como mínimo, 36 puntos en la entrega del informe final y presentación de resultados

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

No corresponde calidad de libre.

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



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

Formato Aprobado por resolución N°113 del  
CFI de fecha 04.07.2017

Cupos mínimos: 2  
Cupos máximos: 12