

## **Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales**

### **30026 - Mecánica de sólidos deformables**

**Guía docente para el curso 2014 - 2015**

**Curso: 3, Semestre: 2, Créditos: 6.0**

---

### **Información básica**

---

#### **Profesores**

- **María Begoña Calvo Calzada** bcalvo@unizar.es
- **Estefanía Peña Baquedano** fany@unizar.es
- **Miguel Ángel Martínez Barca** miguelam@unizar.es
- **José Antonio Bea Cascarosa** jabea@unizar.es
- **José Cegoñino Banzo** jcegoni@unizar.es
- **Sergio Estanislao Puértolas Broto** spb@unizar.es
- **María de los Ángeles Pérez Ansón** angeles@unizar.es
- **Jorge Grasa Orús** jgrasa@unizar.es

#### **Recomendaciones para cursar esta asignatura**

Aunque no se exige tener aprobadas las asignaturas de Matemáticas y Física de primer curso, es muy recomendable haber adquirido unas determinadas destrezas en las mismas. El alumno, antes de comenzar este curso, debería ser capaz de:

##### **Cálculo**

- Derivar una función y realizar integrales simples y múltiples incluyendo cambios de variables
- Comprender fundamentos básicos de cálculo variacional y análisis de máximos y mínimos.

##### **Algebra**

- Poseer cierta soltura en conceptos básicos de espacios vectoriales, dimensiones, base y fundamentos de operaciones matriciales.
- Concepto de tensor e invarianza frente a cambios de coordenadas.
- Notación y operativa indicial.
- Manejo de operadores gradiente, divergencia y laplaciano.

##### **Mecánica**

- Comprensión y manejo de resultantes de fuerzas y momentos.
- Dinámica del sólido rígido. Ecuaciones de Newton.

## **Termodinámica**

- Primera y segunda leyes de la termodinámica.
- Balance de energía.

## **Resistencia de Materiales**

- Conocer los conceptos de esfuerzo, tensión y deformación.
- Resolución de problemas de barras.

El seguimiento continuo de la asignatura, tanto en sus clases de teoría y problemas como en las de prácticas, es esencial, así como el estudio personal y la elaboración de los trabajos de la asignatura.

## **Actividades y fechas clave de la asignatura**

Cada curso académico las fechas de inicio y finalización de la asignatura, las horas concretas de impartición y las fechas de los exámenes de las dos convocatorias oficiales se podrán encontrar en la página web de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura: <http://eina.unizar.es/>

Los trabajos de la asignatura deberán ser entregados antes de la fecha del examen de la convocatoria correspondiente.

Por otra parte, desde el inicio del cuatrimestre los alumnos dispondrán del calendario detallado de actividades (conferencias, prácticas de laboratorio y de ordenador...).

---

## **Inicio**

---

## **Resultados de aprendizaje que definen la asignatura**

**El estudiante, para superar esta asignatura, deberá demostrar los siguientes resultados...**

**1:** Saber identificar problemas donde sea necesario aplicar las ecuaciones de la mecánica del sólido deformable, manejando conceptos de tensión, deformación y leyes constitutivas

**2:** Comprender el significado de los tensores de tensión y deformación y debe ser capaz de expresar dichos tensores en distintos sistemas de referencia, entre ellos el sistema principal, y conocer la importancia de las tensiones y direcciones principales

**3:** Saber identificar y aplicar los modelos de comportamiento del material (elástico lineal, elástico no-lineal, inelástico, etc.) a partir de curvas tensión-deformación experimentales

**4:** Saber aplicar las ecuaciones básicas de la Elasticidad. El alumno ha de estar en condiciones de poder plantear las ecuaciones del modelo matemático: equilibrio, comportamiento y compatibilidad a distintos niveles punto, elemento y estructura y resolver analíticamente problemas sencillos

**5:** Conocer la metodología necesaria para resolver el problema elástico mediante elementos finitos y manejar un software de EF, identificando y seleccionando el tipo de elemento finito.

**6:** Saber valorar la admisibilidad de los resultados analíticos y numéricos.

# Introducción

## Breve presentación de la asignatura

Esta asignatura introduce al alumno en el diseño resistente de componentes mecánicos y estructuras permitiéndole alcanzar los resultados de aprendizaje comentados anteriormente. Para la resolución de los problemas es imprescindible tener destreza en matemáticas y conocimientos de mecánica y resistencia de materiales, como los adquiridos en los primeros cursos de la titulación.

En la asignatura se va a potenciar la evaluación continuada y el trabajo tanto individual como en equipo. Las competencias adquiridas en este curso permitirán al futuro egresado trabajar en equipo con ingenieros en el diseño mecánico y resistente utilizando software de elementos finitos.

### Ejemplo del tipo de problema que será capaz de resolver el alumno

**Enunciado:** Determinar el estado tensional en la pared de una tubería (infinita, es decir con una longitud muy superior al diámetro) de pared gruesa solicitada a presión interna.

**Solución:** El problema puede ser resuelto de forma analítica utilizando el planteamiento de Navier. Para ello es necesario trabajar en coordenadas cilíndricas y proponer una solución en desplazamientos simplificada ( $u_r=f(r)$ ) al tener en cuenta la simetría de revolución del problema y ser infinito el problema en dirección longitudinal. El problema también puede ser resuelto numéricamente mediante elementos finitos.

- Es necesario establecer las condiciones de contorno del problema para poder resolver la ecuación diferencial que permite calcular  $u_r$ .
- Conocida la solución en desplazamientos, aplicando las ecuaciones cinemáticas se obtendrán la solución en deformaciones. También es posible evaluar el cambio de volumen.
- Aplicando las ecuaciones de comportamiento determinaríamos las tensiones en la tubería.
- Podríamos evaluar si el espesor de la tubería garantiza la no plastificación de la misma.

---

## Contexto y competencias

---

## Sentido, contexto, relevancia y objetivos generales de la asignatura

### **La asignatura y sus resultados previstos responden a los siguientes planteamientos y objetivos:**

El objetivo de la asignatura es capacitar al alumno para analizar y diseñar cualquier elemento deformable, como por ejemplo, estructuras de edificación, instalaciones industriales, así como innumerables elementos de máquinas.

Se introduce al alumno al Método de los Elementos Finitos como método numérico para la resolución del problema elástico general que permite el análisis y diseño de elementos más complejos.

La asignatura abarca tanto los fundamentos de la Mecánica de Sólidos Deformables como del Método de los Elementos Finitos y sus aspectos más aplicados.

La realización de sesiones de prácticas permite comprobar la validez de las hipótesis básicas y las distintas simplificaciones propuestas a lo largo de la exposición teórica de los distintos conceptos desarrollados. En esta misma línea se encuentran las clases de problemas, que permiten la aplicación de la teoría y la continuación en la comprensión y asimilación de los conceptos tratados a lo largo del curso.

Las diferentes actividades que se proponen durante el desarrollo de esta asignatura (prácticas, trabajos y clases de problemas) no sólo buscan la asimilación de los distintos conceptos expuestos a lo largo del curso, sino que también pretenden la potenciación del razonamiento, síntesis, resolución y posterior análisis de los resultados de diferentes problemas.

## **Contexto y sentido de la asignatura en la titulación**

La asignatura de Mecánica de Sólidos Deformables forma parte del bloque de asignaturas de la Rama de Tecnologías industriales del Plan de estudios del Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales. Se trata de una asignatura de 6 créditos ECTS que se imparte en el segundo cuatrimestre del tercer curso de la titulación.

La asignatura aplica y desarrolla algunos conceptos presentados en asignaturas de semestres anteriores como Mecánica o Resistencia de Materiales – utilizando muchas de las herramientas proporcionadas por Matemáticas I, II y III – y presenta otros nuevos: tensión, deformación, comportamiento, formulación débil, resolución numérica, etc. que serán utilizados profusamente en asignaturas posteriores de los módulos optativos de Instalaciones y construcciones industriales, Mecatrónica y Medios de transporte.

### **Al superar la asignatura, el estudiante será más competente para...**

- 1:** Capacidad para resolver problemas y tomar decisiones con iniciativa, creatividad y razonamiento crítico (C4).
- 2:** Capacidad para usar las técnicas, habilidades y herramientas de la Ingeniería Industrial necesarias para la práctica de la misma (C7).
- 3:** Capacidad para la gestión de la información, manejo y aplicación de las especificaciones técnicas y la legislación necesarias para la práctica de la Ingeniería Industrial (C10).
- 4:** Capacidad para aprender de forma continuada y desarrollar estrategias de aprendizaje autónomo (C11).
- 5:** Conocimientos y capacidades para aplicar los fundamentos de la elasticidad y resistencia de materiales al comportamiento de sólidos reales (C37).

### **Importancia de los resultados de aprendizaje que se obtienen en la asignatura:**

Los resultados de aprendizaje obtenidos en la asignatura capacitan al alumno para poder abordar los problemas relacionados con la mecánica estructural que se presentan en el ámbito de la Ingeniería Industrial: diseño y comprobación de componentes mecánicos, estructuras industriales y de edificación, análisis resistente de elementos de todo tipo de máquinas e instalaciones, diseño de vehículos, etc.

---

## **Evaluación**

---

### **Actividades de evaluación**

**El estudiante deberá demostrar que ha alcanzado los resultados de aprendizaje previstos mediante las siguientes actividades de evaluación**

- 1: Actividades de evaluación:**

A continuación se presentan las dos modalidades de evaluación ofertadas a los estudiantes para superar la asignatura: gradual y global.

Para permitir la **evaluación gradual** del estudiante que vaya estudiando la asignatura a medida que se imparte, se plantean las siguientes pruebas con su correspondiente ponderación en la calificación final:

*Trabajos de asignatura (Ponderación: 20 %)*

- Se planteará el análisis por elementos finitos del diseño mecánico de un elemento estructural, trabajando

en grupos reducidos de dos personas. Asimismo, se planteará la formulación e implementación numérica de un elemento finito.

- Se fijarán fechas para las revisiones parciales y la entrega definitiva.
- Su evaluación se basará en el informe escrito presentado.

*Prácticas (Ponderación: 20 %)*

- Se realizarán seis sesiones de prácticas de ordenador y laboratorio en grupos de menos de veinte alumnos divididos en equipos de entre dos y cuatro personas.
- Su evaluación se basará en cuestionarios llenados por los alumnos durante las mismas y podrá requerir de la obtención de algún resultado teórico previo relacionado con el contenido de la práctica.

*Examen (Ponderación: 60 %)*

- Examen final en el que se evaluará el contenido completo de la asignatura.
- Constará de una parte teórica y otra de problemas (ejercicios)
- Tendrá una duración estimada de tres horas.

Para permitir una **evaluación global** de la asignatura, se plantea la realización de una prueba global en la que se evaluará el contenido completo de la asignatura:

- Parte teórica, problemas: (Ponderación 80%)
- Parte práctica: (Ponderación 20%)

---

## Actividades y recursos

---

### Presentación metodológica general

**El proceso de aprendizaje que se ha diseñado para esta asignatura se basa en lo siguiente:**

La evaluación continuada con hitos evaluables intermedios, y el trabajo individual y en equipo.

### Actividades de aprendizaje programadas (Se incluye programa)

**El programa que se ofrece al estudiante para ayudarle a lograr los resultados previstos comprende las siguientes actividades...**

**1:**  
La asignatura se desarrollará a partir de las siguientes actividades:

1. Clases Teóricas (T1). En ellas, se desarrolla el cuerpo científico contenido en el programa y se presentan ejemplos de su aplicación.

Temario previsto:

Bloque I: Mecánica del sólido deformable

1. Introducción a la Mecánica del Sólido Elástico Lineal
2. Análisis de deformaciones
3. Definición de tensiones
4. Tensiones y deformaciones principales
5. Ecuaciones de comportamiento.
6. Planteamiento diferencial del problema elástico

7. Límites del comportamiento elástico

Bloque II: Elementos Finitos Mecánicos

1. Introducción al MEF

2. Formulación del MEF en problemas 1-D

3. Formulación del MEF en barras

4. Formulación del MEF en elasticidad plana

5. Formulación del MEF en elasticidad 3D

6. Indicaciones de usuario del MEF

2. Clases Prácticas de Problemas (T2). Las clases de problemas complementan a las teóricas permitiendo al estudiante la aplicación de los conceptos a la resolución de problemas de la práctica ingenieril.

3. Prácticas de Laboratorio (T3). Estas servirán para acercar al alumno a la realidad experimental, pudiendo comprobar la veracidad y exactitud de los resultados explicados en las lecciones teóricas.

4. Prácticas de Simulación Informática (T3). Se pretende de esta forma familiarizar a los alumnos con otra de las herramientas básicas de la asignatura, como es el cálculo y la simulación numérica. El objetivo fundamental de estas prácticas ser capaces de interpretar los resultados obtenidos mediante el ordenador, pudiendo discernir si los éstos obtenidos son adecuados o no.

Prácticas previstas:

a. Introducción a ABAQUS: Viga plana

b. Placa con agujero

c. Cilindro 2D/3D

d. Extensometría y fotoelasticidad

e. Tecnología Elementos Finitos

5. Trabajo de Asignatura (T6). Pretende desarrollar la fórmula de aprendizaje basado en proyectos, para reforzar el resto de actividades docentes y, junto con las prácticas de laboratorio y simulación, permitir que el estudiante adquiera competencias de trabajo en equipo.

6. Tutorías. Permiten de forma más individualizada o mediante grupos pequeños, que los alumnos integren los diversos contenidos y consoliden el objeto de su aprendizaje.

## Planificación y calendario

### Calendario de sesiones presenciales y presentación de trabajos

Las clases magistrales y de problemas y las sesiones de se imparten según el calendario y los horarios establecidos por la Escuela, que son publicados con anterioridad a la fecha de comienzo del curso.

El Trabajo de Asignatura deberá presentarse con anterioridad a la fecha de convocatoria oficial de examen establecida por la Escuela.

Cada profesor informará de su horario de atención de tutorías.

## Bibliografía, materiales y recursos

### Bibliografía, materiales y recursos

#### Durante todo el curso

- Apuntes de la asignatura
- Documentación existente en el ADD de la asignatura

### **Bloque I: Teoría de Elasticidad**

- París F, Teoría de la Elasticidad, Universidad de Sevilla, 2000.
- Oliver X, Agelet de Saracíbar C, Mecánica de Medios Continuos para Ingenieros, Ediciones de la UPC, 2002.
- Doblaré M, Villa L, Fundamentos de la Elasticidad Lineal, Editorial Síntesis, 1998.
- Samartín A. Curso de Elasticidad. Editorial Bellisco. 1990.

### **Bloque II: Método de Elementos Finitos**

- Oñate E, Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. Análisis estático lineal, Editorial CIMNE, 1995.
- Fish J, Belytschko T. A First Course in Finite Elements. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

## **Referencias bibliográficas de la bibliografía recomendada**

- [Bloque I: Teoría de Elasticidad] - Doblaré Castellano, Manuel. Fundamentos de la elasticidad lineal / Manuel Doblaré Castellano, Luis Gracia Villa . Madrid : Síntesis, D.L. 1998 [Bloque 1: Teoría de elasticidad]
- [Bloque I: Teoría de Elasticidad] - Oliver Olivella, Xavier. Mecánica de medios continuos para ingenieros / Xavier Oliver Olivella, Carlos Agelet de Saracíbar Bosch ; compilación, Eduardo Vieira Chaves, Eduardo Car . [1a. ed.] Barcelona : Edicions UPC, 2000 [Bloque 1: Teoría de elasticidad]
- [Bloque I: Teoría de Elasticidad] - París Carballo, Federico. Teoría de la elasticidad / Federico París . 2a. ed. Sevilla : Universidad, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 1998 [Bloque 1: Teoría de elasticidad]
- [Bloque I: Teoría de Elasticidad] - Samartín Quiroga, Avelino. Curso de elasticidad / por Avelino Samartín Quiroga . [1a. ed.] Madrid : Bellisco, 1990 [Bloque 1: Teoría de elasticidad]
- [Bloque II: Método de Elementos Finitos] - Fish, Jacob. A first course in finite elements / Jacob Fish, Ted Belytschko . Chichester (England) : John Wiley & Sons, 2009 [Bloque II: Elementos finitos]
- [Bloque II: Método de Elementos Finitos] - Oñate Ibañez de Navarra, Eugenio. Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos : análisis estático lineal / Eugenio Oñate Ibañez de Navarra . [2a. ed.] Barcelona : Centro internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1995 [Bloque II: Elementos finitos]