

Asignatura: **CÁLCULO ESTRUCTURAL 2**

Código: 10-04084

RTF

7

Semestre: Octavo

Carga Horaria

72

Bloque: Tecnologías Aplicadas

Horas de Práctica

15

Departamento: Estructuras

Correlativas:

- Cálculo Estructural 1

Contenido Sintético:

- Teoría de la elasticidad
- Criterios de falla
- Componentes estructurales
- Inestabilidad estructural
- Método de elementos finitos
- Concentración de tensiones y fatiga
- Mecánica de fractura
- Vigas de pared delgada
- Estructuras a recubrimiento resistente
- Uniones

Competencias Genéricas:

- **CG 1.** Competencia para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.
- **CG 4.** Competencia para utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en ingeniería.
- **CG 7.** Competencia para comunicarse con efectividad.

Aprobado por HCD:

RES: Fecha:

Competencias Específicas:

**CE1 B.** Competencia para calcular, diseñar, proyectar y construir estructuras y componentes estructurales alas, fuselajes, costillas, cuadernas, largueros, tanque, estructuras auxiliares, plataformas para la operación excepto sus fundaciones, de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.

**CE1 E.** Competencia para calcular, diseñar, proyectar y construir plantas de propulsoras principales y auxiliares motores alternativos, a reacción, cohetes, compresores, cámaras de combustión, turbinas, hélices de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo

**CE1 F.** Competencia para calcular y diseñar los diferentes sistemas mecánicos y elementos de máquinas aplicados a las aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.

**CE1 G.** Competencia para diseñar y proyectar la realización del sistema de navegación, guiado y control de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.

**CE1 I.** Competencia para diseñar, proyectar y ensayar los principales parámetros pertinentes a laboratorios de ensayos y calibraciones de equipos aplicados a las aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.

**CE2 A.** Competencia para proyectar, dirigir y controlar la construcción, operación y mantenimiento de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.

**CE3 A.** Competencia para certificar el funcionamiento, condición de uso o estado y aptitud para el vuelo de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.

**CE4 A.** Competencia para proyectar y dirigir lo referido a la higiene y seguridad en el campo aeroespacial.

## Presentación

Esta asignatura es una actividad curricular que pertenece al penúltimo año (octavo semestre) de la carrera de Ingeniería Aeronáutica, que completa el desarrollo de las teorías fundamentales relativas a la Mecánica de Materiales y avanza sobre aspectos del Análisis Estructural.

Las actividades están orientadas a desarrollar aptitud para resolver problemas concernientes al Diseño Estructural empleando los fundamentos de la mecánica de sólidos, la teoría de la elasticidad lineal y los métodos numéricos aproximados (por computadora) para resolver problemas concretos de la ingeniería aeronáutica.

A través del cursado de la asignatura el alumno adquiere las habilidades necesarias para diseñar, desarrollar y analizar partes de máquinas, sistemas auxiliares y estructuras de uso aeronáutico. Al finalizar el curso, el alumno debe mostrar la capacidad de resolver problemas de diseño estructural. Para ello debe conocer: a) los distintos tipos de estructuras, su comportamiento y su modelación adecuada, b) las cargas actuantes, c) los modos de falla y los coeficientes de seguridad, d) los criterios de diseño y e) los métodos de Análisis Estructural y en especial los métodos numéricos utilizando computadora.

## Contenidos

Los contenidos de la asignatura son:

**Unidad 1 – Ecuaciones fundamentales.** Ecuaciones de la elasticidad lineal. Análisis de tensiones y de deformaciones. Ecuaciones constitutivas. Métodos generales de la elasticidad lineal.

**Unidad 2 – Criterios de falla para tensiones combinadas.** Principales criterios de falla para tensiones combinadas. Comparación y evaluación de los distintos criterios. Coeficiente de seguridad para tensiones combinadas.

**Unidad 3 – Componentes estructurales.** Teoría de placas. Soluciones analíticas y empíricas tabuladas.

**Unidad 4 – Inestabilidad estructural.** Cargas críticas en pandeo de placas. Consideraciones para placas ortótropas y placas sándwich. Pandeo de cáscaras delgadas y cilindros. Criterios de diseño. Pandeo local en vigas y columnas de pared delgada.

**Unidad 5 – Método de elementos finitos.** Conceptos generales del método. Desarrollo de un elemento básico de dos dimensiones. Aspectos de la discretización. Aplicaciones a las estructuras en Ingeniería Aeronáutica.

**Unidad 6 – Concentración de tensiones y fatiga.** Concentración de tensiones. Tensiones uniaxiales y combinadas. Daño acumulado. Enfoque probabilístico.

**Unidad 7 – Introducción a la mecánica de fractura.** Factor de intensidad de tensión elástica. Resistencia a la fractura del material. Consideraciones de diseño.

**Unidad 8 – Vigas de pared delgada.** Torsión en vigas de pared delgada. Flexión en vigas de pared delgada. Flujo de corte por torsión y por corte. Efectos del alabeo.

**Unidad 9 – Estructuras de recubrimiento resistente.** Simplificación de la teoría de vigas de pared delgada para vigas compuestas. Cálculo de cuadernas.

**Unidad 10 – Uniones.** Vinculación de elementos estructurales. Uniones permanentes y desmontables.

## Metodología de enseñanza

Las clases son de tipo teórico prácticas y consisten en exposiciones dialogadas entre los docentes y los alumnos, orientadas a desarrollar en los alumnos la capacidad de diseñar y analizar estructuras y componentes mecánicos.

Durante las clases prácticas se realizan actividades que ayudan al estudiante a desarrollar habilidades para predimensionar estructuras, analizarlas y finalmente evaluarlas. Las tareas no presenciales que se proponen generalmente tienen un enfoque hacia actividades de proyecto y diseño. El enunciado del problema se bosqueja en clase y luego cada alumno en forma individual debe precisar el enunciado como parte de la solución, buscar datos sobre los materiales a utilizar, dimensionar, verificar y dar conclusiones. Se da especial énfasis a la temática de la comunicación escrita en forma de informes conteniendo enunciado, desarrollo y conclusiones.

Se proponen a los alumnos proyectos de diseño de componentes mecánicos y de estructuras aeronáuticas, los cuales se abordan con software de cálculo estructural para determinar esfuerzos y optimizar sus diseños. En estos proyectos los docentes guían a los alumnos sobre las distintas alternativas en cuanto a selección de materiales y métodos de cálculo.

## Evaluación

La evaluación del cumplimiento de los indicadores de desempeño del estudiante, y consecuentemente de las competencias, se realiza con rúbrica mediante:

- Parciales teórico-prácticos que incluyen: preguntas cortas, elección entre alternativas múltiples, desarrollos teóricos y resolución de casos prácticos.

- Un proyecto de diseño con informe técnico, de acuerdo con pautas preestablecidas.
- Resolución de trabajos prácticos durante el cursado..
- Rúbrica.

## Condiciones de aprobación

### Regularidad

- Asistencia a las clases: mínimo 80%
- Aprobación del 100% de las actividades prácticas: trabajos prácticos y práctico de diseño
- Aprobación de todas menos una de los parciales teórico-prácticos, incluida la instancia de recuperación sobre uno de los parciales indicados.
- Alcanzar un nivel de desarrollo aceptable en todos los indicadores establecidos en la rúbrica.

### Promoción

- Asistencia a clases: mínimo 80%.
- Aprobación del 100% de las actividades prácticas propuestas: trabajos prácticos y proyectos de diseño.
- Aprobación de todos los parciales teórico-prácticos, incluida la instancia de recuperación sobre uno de los parciales indicados.
- Alcanzar un nivel de desarrollo aceptable en todos los indicadores establecidos en la rúbrica.

### Criterios de evaluación

- Calidad de la formulación de la producción
- Escritura académica-profesional, Claridad conceptual.
- Puntualidad
- Vinculación teórico-práctica

### Calificación

La calificación se obtiene a través del siguiente polinomio:

$$\text{Calificación} = 0,4 \times P1 + 0,3 \times P2 + 0,3 \times P3$$

donde:

P1: es el promedio de las calificaciones de los parciales teórico-prácticos.

P2: es el promedio de la calificación de las actividades prácticas.

P3: es la valoración numérica obtenida de la rúbrica.

## Actividades prácticas y de laboratorio

Las actividades propuestas son trabajos prácticos, proyectos de diseño y ensayos en laboratorio, sobre casos típicos de estructuras y componentes mecánicos que estudia la asignatura.

Durante el desarrollo del curso, el alumno completa actividades prácticas referentes a las distintas unidades, tales como: Análisis de tensiones y de deformaciones, Criterios de falla y Coeficiente de seguridad para tensiones combinadas, Solicitaciones en placas, Estudio de cilindros con elevada presión, Cargas críticas en pandeo de placas y en cilindros, Análisis de fatiga y de fractura en componentes estructurales y mecánicos, Dimensionamiento de vigas compuestas como idealización de estructuras aeronáuticas, considerando ancho de colaboración y/o elementos de unión.

El desarrollo de los trabajos prácticos no sólo resulta fundamental para afianzar los conocimientos teóricos, sino que además es un medio para la incorporación de habilidades adicionales (estrategias de estudio, metodologías de análisis y propuestas de solución) y para que el estudiante adquiera destreza en el manejo de las herramientas necesarias para la resolución de problemas. Los trabajos prácticos son realizados directamente en medios digitales (o bien escritos con lápiz y papel, para luego ser escaneados) y con ayuda de herramientas informáticas (Python, Matlab, Excel, etc.). Se propende al uso de software de cálculo numérico y de matemática simbólica. Algunas de estas actividades implican la confección de programas de computadoras. Durante el dictado de la materia se proporcionan códigos de computadora a los estudiantes como modelos para la implementación de métodos numéricos en el análisis estructural.

Asimismo, se realizan actividades en el Laboratorio de Computación para fomentar la aplicación del software Ansys Mechanical, el cual es empleado en el desarrollo de un proyecto de análisis estructural orientado al diseño y análisis de estructuras aeronáuticas a través de elementos finitos. Este Proyecto de Diseño (PD) consta de dos fases, una primera parte (3 semanas) donde el alumno se familiariza con el software reproduciendo algunos tutoriales elegidos convenientemente. Posteriormente, en la segunda parte del PD (8 semanas) el alumno desarrolla su práctico de diseño empleando consideraciones teóricas brindadas a la par en el dictado de la materia. El objeto del PD es que el alumno sea capaz de realizar los siguientes procesos: i) acondicionamiento de geometría entendiendo de forma clara el dominio de análisis; ii) mallado y análisis de mallas comprendiendo el impacto en los resultados; iii) análisis estático, análisis modal y/o análisis de pandeo lineal que le permita caracterizar la respuesta del componente estudiado; iv) interpretación de resultados pudiendo verificar y validar los mismos con soluciones analíticas si fuera necesario; y v) confeccionar de un informe de resultados que transmita de forma eficiente y completa las conclusiones del análisis.

Se realizan clases con ensayos en el Laboratorio de Estructuras sobre los siguientes aspectos: mediciones de deformaciones con el uso de galgas extensiométricas (strain gauge) e interpretación de resultados, ensayos de inestabilidad de equilibrio de distintos elementos estructurales: placas, cilindros de pared delgada y pandeos locales, ensayos de fatiga y fractura de probetas y piezas simples, Análisis de tensiones en recipientes de presión, análisis de las normativas, reglamentos y criterios de diseño de torres de transmisión eléctrica, sistemas de cañerías y recipientes de presión.

## Desagregado de competencias y resultados de aprendizaje

### **Competencias desagregadas**

Para las siguientes competencias se requiere la articulación entre las siguientes capacidades:

#### **CG1: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.**

- Ser capaz de delimitar el problema y formularlo de manera clara y precisa.
- Ser capaz de generar diversas alternativas de solución a un problema ya formulado.
- Ser capaz de desarrollar criterios profesionales para la evaluación de las alternativas y seleccionar la más adecuada en un contexto particular.

#### **CG4: Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería.**

- Ser capaz de conocer los alcances y limitaciones de las técnicas y herramientas a utilizar y de reconocer los campos de aplicación de cada una de ellas y de aprovechar toda la potencialidad que ofrecen.
- Ser capaz de interpretar los resultados que se obtengan de la aplicación de las diferentes técnicas y herramientas utilizadas.

#### **CG 7. Competencia para comunicarse con efectividad.**

- Ser capaz de producir textos técnicos, rigurosos y convincentes.
- Ser capaz de analizar la validez y la coherencia de la información.

#### **CEI B. Competencia para calcular, diseñar, proyectar y construir estructuras y componentes estructurales alas, fuselajes, costillas, cuadernas, largueros, tanque, estructuras auxiliares, plataformas para la operación excepto sus fundaciones, de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.**

- Ser capaz de calcular estructuras de vehículos aeroespaciales y estructuras de soporte operativo y/o constructivo, considerando las alternativas más apropiadas para establecer el correcto comportamiento estructural.

- Ser capaz de diseñar estructuras de vehículos aeroespaciales y estructuras de soporte operativo y/o constructivo, comprendiendo las limitaciones y alcances establecidos por las metodologías típicas de diseño.
- Ser capaz de proyectar estructuras de vehículos aeroespaciales y estructuras de soporte operativo y/o constructivo, considerando los objetivos del diseño y los alcances normativos dependiendo de la aplicación de estas estructuras.
- Ser capaz de construir estructuras de vehículos aeroespaciales y estructuras de soporte operativo y/o constructivo, articulando adecuadamente las características de las estructuras calculadas, diseñadas y proyectadas con los métodos constructivos disponibles.

**CEI E. Competencia para calcular, diseñar, proyectar y construir plantas propulsoras principales y auxiliares, motores alternativos, a reacción, cohetes, compresores, cámaras de combustión, turbinas, hélices de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.**

- Ser capaz de calcular componentes de sistemas y elementos propulsivos de vehículos aeroespaciales, considerando las alternativas más apropiadas para establecer el correcto funcionamiento desde el punto de vista de la mecánica estructural.
- Ser capaz de diseñar componentes de sistemas y elementos propulsivos de vehículos aeroespaciales, comprendiendo las limitaciones y alcances establecidos por las metodologías típicas de diseño en la mecánica estructural.

**CEI F. Competencia para calcular y diseñar los diferentes sistemas mecánicos y elementos de máquinas aplicados a las aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.**

- Ser capaz de calcular componentes mecánicos y elementos de máquinas para vehículos aeroespaciales, considerando las alternativas y métodos más apropiados para establecer el correcto análisis desde el punto de vista de la mecánica estructural.
- Ser capaz de diseñar componentes mecánicos y elementos de máquinas para vehículos aeroespaciales, comprendiendo las limitaciones y alcances establecidos por las metodologías típicas de diseño en la mecánica estructural.

**CEI G. Competencia para diseñar y proyectar la realización del sistema de navegación, guiado y control de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.**

- Ser capaz de diseñar elementos y componentes mecánicos vinculados a los sistemas de asistencia al vuelo en vehículos aeroespaciales, considerando las alternativas y métodos más apropiados para establecer el correcto análisis desde el punto de vista de la mecánica estructural.

**CE1 I. Competencia para diseñar, proyectar y ensayar los principales parámetros pertinentes a laboratorios de ensayos y calibraciones de equipos aplicados a las aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.**

- Ser capaz de diseñar elementos resistentes, sistemas mecánicos y estructuras auxiliares aplicadas a los ensayos en laboratorio y de calibración para vehículos aeroespaciales, considerando las alternativas y métodos más apropiados para establecer el correcto análisis desde el punto de vista de la mecánica estructural.

**CE2 A. Competencia para proyectar, dirigir y controlar la construcción, operación y mantenimiento de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.**

- Ser capaz de proyectar elementos resistentes, sistemas mecánicos y estructuras auxiliares aplicadas a la operación y mantenimiento de vehículos aeroespaciales, considerando las alternativas y métodos más apropiados para establecer el correcto análisis desde el punto de vista de la mecánica estructural.

**CE3 A. Competencia para certificar el funcionamiento, condición de uso o estado y aptitud para el vuelo de aeronaves, vehículos espaciales y toda máquina de vuelo.**

- Ser capaz de certificar el normal funcionamiento, aptitud de uso y/o estado, condición de operación de las estructuras en vehículos aeroespaciales, considerando las alternativas y métodos más apropiados para establecer el correcto análisis desde el punto de vista de la mecánica estructural.

**CE4 A. Competencia para proyectar y dirigir lo referido a la higiene y seguridad en el campo aeroespacial.**

- Ser capaz de identificar y desarrollar los procedimientos, operaciones y revisiones asociadas con las estructuras en vehículos aeroespaciales, considerando las alternativas apropiadas para mantener la higiene y seguridad de acuerdo a los estándares normativos del área.

**Resultados de aprendizaje**

Este desagregado de competencias permite la definición de los siguiente indicadores de desempeño:

- Conocer e interpretar las ecuaciones de la elasticidad de la mecánica de sólidos.
- Entender los criterios de falla y coeficientes de seguridad que se aplican en los componentes estructurales aeroespaciales.
- Aprender los conceptos de teoría de placas y cáscaras delgadas.

- Diseñar partes de equipos contemplando las condiciones de inestabilidad estructural.
- Entender y utilizar los conceptos de la mecánica de fractura y fatiga en el diseño estructural.
- Aplicar métodos numéricos para el diseño y verificación de instalaciones aeroespaciales.
- Calcular y verificar estructuras a recubrimiento resistente
- Conocer y verificar los elementos de unión de componentes estructurales

La evaluación del cumplimiento de los indicadores de desempeño se realiza con rúbrica. Este instrumento de evaluación toma como base: a) las siguientes actividades áulicas del estudiante: participación en la resolución conjunta de los trabajos propuestos, talleres, y aulas invertidas y b) las siguientes actividades individuales: coloquio integrador, estudios de casos, resolución de trabajos prácticos y proyectos de diseño.

## Bibliografía

Compendio de Cálculo Estructural II, Julio C. Massa, Juan F. Giro y Alejandro J. Giudici, 2022.

Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Budynas y Nisbett , 11º Ed., McGraw-Hill, 2024.

Diseño de Elementos de Máquinas, Robert L. Mott, 6ta Ed., Pearson Educación, 2017.

Diseño de Elementos de Máquinas, Virgil M. Faired, 4ta Ed., Limusa, 1998.

Diseño de Máquinas, Hall, Holowenko y Lauglin, Series Schaum, McGraw-Hill, 1990.  
Advanced Mechanics of Materials, Arthur P. Boresi and Richard J. Schmidt, John Wiley & Sons, 2006.

Failure of Materials in Mechanical Design, 2da Edición, Jack A. Collins, John Wiley & Sons., 1993.

Advanced Mechanics of Materials, Cook and Young, McMillan Publishing Co. 2da Edición, 1998.

Mechanical behavior of materials, Dowling, Norman E., 5th, Pearson Education, 2019.

Roark's Formulas for Stress and Strain, 9th Edition, Warren Young, Richard Budynas and Ali Sadegh, McGraw Hill Companies, 2020.

Fundamentals of Machine Component Design, 7th Ed., Juvinall y Marshek, John Wiley, 2020.

Buckling of Bars, Plates and Shells, Don O. Brush and Bo Almroth, McGraw Hill Companies, 1975.

Buckling of Bars, Plates and Shells, Robert Millard Jones, Bull Ridge Publishing, 2006.

Fracture and Fatigue Control in Structures, Third Edition: Applications of Fracture Mechanics - 3rd Edition, John Barsom and Stanley Rolfe, ASTM, 1999.

Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. Análisis Estático Lineal, Eugenio Oñate, CIMNE, 1995.

El método de los elementos finitos, Volumen 1: Formulación Básica, 4ta Edición, Zienkiewicz O., Taylor, R., Zhu J., McGraw-Hill, 2012.

El método de los elementos finitos, Volumen 2: Mecánica de Sólidos, 4ta Edición, Zienkiewicz O., Taylor, R., McGraw-Hill, 2010.

Megson, Thomas H. G.. Aircraft Structures for Engineering Students. Elsevier Aerospace Engineering Series, Oxford, fourth edition, 2007.

Megson, Thomas H. G. Introduction to Aircraft Structural Analysis, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2014, ISBN: 978-0080982014.

Donaldson, B. K., Analysis of aircraft structures: an introduction, 2nd Edition, (Cambridge Aerospace Series), Cambridge University Press, 2008, ISBN-13: 978-1107668669.