

Asignatura: **Análisis Estructural**

Código: 10-09009	RTF	6,5
Semestre: Sexto	Carga Horaria	80
Bloque: Tecnologías Básicas	Horas de Práctica	28

Departamento: Estructuras

Correlativas:

- Mecánica de las Estructuras

Contenido Sintético:

- Teoremas energéticos. Energía interna de deformación.
- Principio de trabajos virtuales.
- Estados de carga básicos. Combinaciones de cargas.
- Método de las Fuerzas. Análisis de estructuras hiperestáticas a través del planteo de condiciones de compatibilidad.
- Método de Rigidez. Aplicación para reticulado ideal, vigas continuas, pórticos y emparrillados planos.
- Dinámica Estructural. Respuesta de sistemas de uno y múltiples grados de libertad frente a cargas impulsivas, cargas armónicas y movimientos de apoyo.
- Acciones sísmicas. Método Modal Espectral.

Competencias Genéricas:

- CG1: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería civil.
- CG4: Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en ingeniería civil.
- CG7: Comunicarse con efectividad.

Aprobado por HCD: 920-HCD-2023

RES: Fecha:8/11/2023

Competencias Específicas:

CE1.2: Aplicar las herramientas para analizar y calcular tensiones, deformaciones y esfuerzos en secciones y estructuras de barras sometidas a cargas estáticas y dinámicas.

CE1.4: Aplicar los métodos aproximados para solución de las ecuaciones diferenciales de sólidos elásticos, como los métodos de Ritz y de Elementos Finitos.

CE1.10: Planificar, diseñar, calcular, proyectar y construir obras e instalaciones para la captación, tratamiento, conducción y distribución de agua potable, líquidos cloacales y pluviales urbanos y rurales.

CE1.11: Planificar, proyectar, dirigir, construir y mantener obras hidráulicas, tales como presas de embalse y centrales hidroeléctricas, canales de navegación, obras de riego, obras de saneamiento rural, obras fluviales, obras de arte de proyectos viales, obras portuarias y todas aquellas relacionadas con el aprovechamiento del recurso hídrico.

CE1.12: Proyectar, calcular, dirigir, construir y mantener estructuras metálicas, de madera y de hormigón armado, según la normativa vigente.

Presentación

La asignatura **Análisis Estructural** involucra la generalización del concepto de elemento estructural tipo "barra" visto en Mecánica de las Estructuras, para el estudio de estructuras compuestas por barras. El comportamiento del elemento barra en el campo elástico es el punto de partida para la formulación del concepto de "sistema estructural", donde a partir de la barra individual se analiza el comportamiento de un conjunto o sistema de barras. En la materia Estática se plantean técnicas para el cálculo de las reacciones y los esfuerzos en estructuras isostáticas de barras en base a las ecuaciones de equilibrio. En el caso de las estructuras hiperestáticas con distintos grados de redundancia estructural que se estudian en este curso, se recurre a diferentes procedimientos que permiten aumentar el número de ecuaciones para resolver este tipo de sistemas, dado que las ecuaciones de equilibrio por sí mismas no resultan suficientes.

A manera de introducción general, el curso comienza con el estudio de las deformaciones de estructuras isostáticas aplicando consideraciones de conservación de energía mecánica (energía interna de deformación y energía externa aplicada al sistema). A continuación, se plantea el principio de trabajos virtuales para estructuras deformables que permite abordar el cálculo de las deformaciones de estructuras isostáticas sometidas a cargas estáticas.

La introducción general también cubre una clasificación de los distintos tipos de cargas que actúan sobre las estructuras civiles (gravitatorias, sobrecargas, eólicas, sísmicas, térmicas, postensado, asentamientos, etc.), donde se introducen los conceptos de "Estados básicos de carga", "Factores de carga" y "Combinaciones de cargas".

El curso continúa con la presentación del Método de las Fuerzas para calcular esfuerzos y deformaciones en estructuras constituidas por barras en forma de reticulados planos o de pórticos planos. Las ecuaciones de compatibilidad de deformaciones formuladas permiten el cálculo de las incógnitas hiperestáticas, dando origen a conceptos de "matriz de flexibilidad", vector de cargas, y vector de incógnitas hiperestáticas. Aunque este método de análisis es poco utilizado en la práctica, se lo mantiene en el programa a los efectos de plantear la discusión sobre el funcionamiento de la estructura en su conjunto en base al concepto de "redundancia estructural".

El curso continúa con la presentación del Método de Rigidez para reticulados, pórticos y emparrillados utilizando el formato matricial para la formulación y solución de las ecuaciones de equilibrio estático. El Trabajo Práctico planteado durante el cursado requiere la utilización de programas comerciales de cálculo basados en este método para la resolución de algún problema estructural de cierta complejidad.

En la última parte de la materia se analizan las características y efectos de los principales tipos de cargas dinámicas (impulsivas, armónicas, periódicas, etc.). El tratamiento de los problemas dinámicos comienza con la formulación y solución de la ecuación de equilibrio dinámico para un oscilador simple, incluyendo las fuerzas exteriores variables en el tiempo, las fuerzas dinámicas de disipación viscosa, las fuerzas de inercia y las fuerzas elásticas. El curso continúa con el análisis dinámico de estructuras con múltiples grados de libertad dinámicos, definiendo y calculando las frecuencias y modos naturales de vibración. Luego se presenta el Método de Descomposición Modal para la solución general de problemas dinámicos de estructuras con múltiples grados de libertad dinámicos. El curso finaliza con la descripción de las acciones sísmicas y la presentación del Método Modal Espectral para la obtención de esfuerzos y deformaciones de estructuras sometidas a estas solicitaciones.

Contenidos

UNIDAD 1. Teoremas energéticos. Energía interna de deformación.

Introducción al análisis de estructuras elásticas de barras. Energía interna de deformación. Trabajo externo de las fuerzas exteriores. Conservación de energía en sistemas elásticos. Aplicación al cálculo de desplazamientos en estructuras isostáticas.

UNIDAD 2. Principio de trabajos virtuales.

Planteo del principio de trabajos virtuales como expresión de las ecuaciones de equilibrio. Cálculo general de desplazamientos en estructuras isostáticas. Teorema de Reciprocidad.

UNIDAD 3. Estados de carga básicos. Combinaciones de cargas.

Estados básicos de cargas estáticas. Cargas gravitatorias. Desplazamientos impuestos. Acciones térmicas. Efecto de cables en vigas pre/postensados. Combinaciones de carga. Factores de combinación de cargas básicas. Estados Límites de Servicio y Estados Límites Últimos. Líneas de influencia de esfuerzos internos y de reacciones.

UNIDAD 4. Método de las Fuerzas.

Grado de indeterminación estática. Ecuaciones de equilibrio y ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos. Análisis de estructuras hiperestáticas mediante planteo de condiciones de compatibilidad de deformaciones. Matriz de flexibilidad y sus propiedades. Estructura isostática fundamental. Incógnitas hiperestáticas en vigas continuas, reticulados y pórticos. Aplicación del método de las fuerzas al análisis de estructuras hiperestáticas simples: vigas continuas, reticulados planos y pórticos planos.

UNIDAD 5. Método de Rigidez.

Método de Rigidez para reticulados ideales. Ecuaciones de equilibrio en función de los desplazamientos nodales. Matriz de rigidez de una barra de reticulado en coordenadas globales. Ensamblaje de la matriz de rigidez de toda la estructura. Reducción del número de grados de libertad por las condiciones de vínculo. Cálculo de desplazamientos nodales, esfuerzos en barras y reacciones externas. Desplazamientos nodales impuestos. Método de Rigidez para pórticos y emparrillados. Ecuaciones de equilibrio de una barra de pórtico en coordenadas locales en función de desplazamientos y giros nodales para cargas aplicadas en los nudos. Transformación de la matriz de rigidez de una barra a coordenadas globales. Ensamblaje de la matriz de rigidez de barras de un pórtico plano o un emparrillado plano. Ecuaciones de equilibrio para cargas aplicadas en el interior de las barras de un pórtico o un emparrillado. Cargas nodales equivalentes. Superposición del estado de empotramiento perfecto y del estado complementario con desplazamientos nodales y cargas nodales equivalentes. Tratamiento de efectos térmicos. Desplazamientos nodales impuestos.

UNIDAD 6. Dinámica Estructural.

Acciones dinámicas sobre las estructuras. Grado de libertad dinámico (GLD). Clasificación de las cargas según los efectos sobre un sistema de grado de libertad dinámico: a) cargas impulsivas, b) cargas periódicas y c) acciones sísmicas. Ecuaciones de equilibrio dinámico. Principio de D'Alembert incluyendo fuerzas elásticas, disipativas e inerciales. Respuesta de un sistema de 1 GLD dinámico a cargas impulsivas. Integral de Duhamel. Factor dinámico máximo. Respuesta de un sistema de 1 GLD a carga armónica estacionaria. Resonancia. Amplificación dinámica. Respuesta de un sistema de 1 GLD a desplazamientos de apoyos.

Sistemas con Múltiples Grados de Libertad Dinámicos (MGLD). Ecuaciones de equilibrio dinámico de sistemas de múltiples grados de libertad dinámicos. Matrices de rigidez, masa y amortiguamiento. Vibraciones libres. Determinación de frecuencias y modos naturales de vibración. Propiedades de los modos. Respuesta dinámica de un sistema de MGLD por el Método de Descomposición Modal.

UNIDAD 7. Acciones sísmicas. Método Modal Espectral.

Caracterización de las acciones sísmicas. Acelerogramas. Espectros de respuesta sísmica: a) espectro de desplazamientos relativos, b) espectro de pseudo-aceleración, c) espectro de aceleración absoluta. Fuerzas nodales equivalentes a la acción sísmica. Aplicación del Método de Descomposición Modal. Análisis sísmico por el Método Modal Espectral. Análisis sísmico por el Método Estático Equivalente. Método aproximado para considerar el efecto del comportamiento elastoplástico frente a las acciones sísmicas.

Metodología de enseñanza

El desarrollo de la materia se plantea principalmente por medio de clases expositivas teórico-prácticas. Se introducen conceptos teóricos básicos y su fundamentación para luego presentar aplicaciones prácticas enfatizando aspectos metodológicos y de comportamiento. Luego de la presentación del Método de Rigidez, se plantea un Trabajo Práctico para la resolución en grupos de un problema real utilizando un programa comercial de cálculo. La evaluación de este trabajo se realiza por etapas, a los efectos de tener un mayor contacto con los estudiantes, permitiendo al mismo tiempo una mayor interacción. Los resultados deben presentarse en un informe técnico siguiendo pautas preestablecidas, donde se evalúan las habilidades relacionadas con la capacidad de una comunicación eficiente y fluida.

La totalidad de las clases se encuentran pregrabadas, permitiendo a los estudiantes asistir al aula con los temas previamente vistos para facilitar la comprensión de las explicaciones de los docentes, aclarar dudas y realizar consultas. Esto también habilita la posibilidad de plantear clases de tipo invertida en algunos módulos, donde los estudiantes pueden explicar lo que han comprendido de dichas clases pregrabadas y eventualmente evacuar sus dudas.

Evaluación

Los conocimientos y competencias adquiridas se evalúan mediante evaluaciones parciales teórico-prácticas escritas e individuales. En el cuatrimestre del dictado se rinden 3 (tres) parciales principalmente prácticos con énfasis en los aspectos metodológicos, incluyendo conceptos teóricos globales. Puede recuperarse 1 (una) de las 3 (tres) instancias previstas, donde la nota del recuperatorio reemplaza a la original. Al final del cuatrimestre se realiza un coloquio integrador sobre temas teóricos.

El reparcializado que se ofrece durante el cuatrimestre del dictado permite a los alumnos regulares rendir los parciales, y en caso de aprobar la totalidad de los mismos deben rendir un Examen Final que cubre solamente temas teóricos. El otro reparcializado que se ofrece en el cuatrimestre siguiente al dictado contempla clases de apoyo presenciales o virtuales, parciales teórico-prácticos y un Examen Final sólo con temas teóricos.

El régimen de promoción contempla el desarrollo de 1 (un) Trabajo Práctico realizado en grupos de hasta 4 (cuatro) integrantes. El mismo consiste en la resolución de un problema

estructural utilizando algún programa comercial de cálculo. Los resultados y conclusiones de este trabajo deben presentarse en un informe técnico, del cual se evalúan la calidad de la redacción y el uso apropiado de la terminología técnica disciplinar. La presentación del Trabajo Práctico se realiza en forma oral. El estudiante que haya aprobado los parciales y el Trabajo Práctico deberá rendir un coloquio final integrador de carácter oral sobre temas teóricos, lo cual permite a los docentes evaluar la competencia de comunicación efectiva.

Condiciones de aprobación

La asignatura se aprueba a través de alguna de las formas indicadas a continuación.

Régimen de promoción

Las condiciones para aprobar la asignatura por promoción son las siguientes:

- Mínimo de 80% de asistencia a clases
- Aprobar los 3 (tres) parciales teórico-prácticos (nota mínima 4)
- Aprobar 1 (un) Trabajo Práctico: resolución de un problema en un programa de cálculo
- Aprobar 1 (un) Coloquio Integrador sobre temas teóricos

El estudiante puede recuperar 1 (un) parcial para alcanzar las condiciones de promoción.

El Coloquio Integrador debe rendirse antes del cierre del cuatrimestre, y el estudiante que no lo apruebe en esta instancia pasará a la condición de alumno regular, debiendo rendir un Examen Final durante los turnos de examen.

Examen Final para alumnos regulares

Las condiciones para aprobar en condición de alumno regular son las siguientes:

- Mínimo de 80% de asistencia a clases
- Aprobar durante el cursado un mínimo de 2 (dos) parciales (nota mínima 4)
- Aprobar el Examen Final teórico-práctico

El estudiante puede recuperar 1 (un) parcial para alcanzar las condiciones de regularidad, debiendo rendir el primer parcial que haya desaprobado durante el cursado.

A los efectos de aprobar la materia, el estudiante debe presentarse en algún turno de examen fijado en el calendario académico. El Examen Final consiste en la resolución de 2 (dos) problemas prácticos y la evaluación de un mínimo de 2 (dos) temas teóricos de la materia, pudiendo esta evaluación ser de carácter oral o escrito.

Examen Final para alumnos libres

El alumno debe presentarse en algún turno de examen fijado en el calendario académico. El examen consiste en la resolución de 3 (tres) problemas prácticos y la evaluación de 3 (tres) temas teóricos de la asignatura, pudiendo esta evaluación ser de carácter oral o escrito.

Reparcializado en el 1° Cuatrimestre

El alumno que se encuentre en la condición regular podrá anotarse para rendir los parciales, teniendo la posibilidad de recuperar 1 (un) parcial. En caso de aprobar todos los parciales se le dará por aprobada la parte práctica del Examen Final hasta el segundo turno de la época de Diciembre del año del reparcializado, aunque solamente en 2 (dos) oportunidades.

Reparcializado en el 2° Cuatrimestre

El alumno que se encuentre en la condición regular podrá anotarse para rendir los parciales, el coloquio, y eventualmente desarrollar el Trabajo Práctico durante este cuatrimestre de

cursado. En el caso de aprobar todas las instancias del régimen de promoción, excepto la asistencia, deberá anotarse en un turno de examen de la época de Diciembre del año de cursado donde se le dará por aprobado el Examen Final. En el caso de aprobar todos los parciales y el Trabajo Práctico, se les dará por aprobada la parte práctica del Examen Final hasta el segundo turno de la época de Febrero del año siguiente al de cursado, aunque sólo en 2 (dos) oportunidades.

Actividades prácticas y de laboratorio

La asignatura requiere durante el cursado el planteo y resolución de un importante número de ejercicios prácticos a los efectos de visualizar y afrontar las dificultades que solamente se evidencian durante la etapa de cálculo. Por tal motivo, los libros tomados de referencia dedican una gran parte de su contenido al desarrollo de problemas prácticos.

Estos ejercicios se complementan con el planteo de 1 (un) Trabajo Práctico grupal que requiere 7 (siete) semanas para su desarrollo, y consiste en la resolución de un problema estructural utilizando un programa comercial de cálculo. El tipo de problema cambia todos los años, y puede eventualmente estar provisto de datos experimentales que permitan a los estudiantes verificar la validez de las distintas hipótesis que suelen asumirse en la modelación. Estas hipótesis están referidas principalmente a la vinculación de las barras entre sí, y a la vinculación de la estructura con los apoyos.

Desagregado de competencias y resultados de aprendizaje

El desagregado de las competencias genéricas y los indicadores de desempeño asociados se indica a continuación.

CG1. Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería civil.

Identificar y organizar los datos pertinentes al problema.

Generar diversas alternativas de solución a un problema ya formulado.

Realizar el diseño de la solución tecnológica, incluyendo el modelado.

Establecer supuestos, de usar técnicas eficaces de resolución y de estimar errores.

Monitorear, evaluar y ajustar el proceso de resolución del problema.

Controlar el propio desempeño y saber cómo encontrar los recursos necesarios para superar dificultades

Establecer supuestos, de usar técnicas eficaces de resolución y de estimar errores

Monitorear, evaluar y ajustar el proceso de resolución del problema

Usar lo que ya se conoce; identificar lo que es relevante conocer, y disponer de estrategias para adquirir los conocimientos necesarios

El estudiante deberá adquirir la capacidad de relevar las características geométricas y mecánicas de la estructura a analizar, así como reconocer los estados de carga a los que estará sometida. Deberá comprender las implicancias en el comportamiento estructural de considerar diferentes hipótesis de cálculo. Deberá estar en condiciones de juzgar la veracidad de los resultados de programas computacionales mediante cálculos simples de verificación.

CG4. Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en ingeniería civil.

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.

Interpretar los resultados que se obtengan de la aplicación de las diferentes técnicas y herramientas utilizadas.

El estudiante deberá tener la capacidad de realizar los análisis de sensibilidad necesarios para adoptar las condiciones más desfavorables de carga y resistencia. Deberá saber interpretar los resultados experimentales y toda otra evidencia empírica que permita ajustar tanto las hipótesis de cálculo como los parámetros y las características de los modelos de cálculo. Deberá poder realizar un análisis crítico del problema y de los resultados obtenidos.

CG7. Comunicarse con efectividad.

Usar eficazmente las herramientas tecnológicas apropiadas para la comunicación.

Expresarse de manera concisa, clara y precisa, tanto en forma oral como escrita.

Producir textos técnicos (descriptivos, argumentativos y explicativos), rigurosos y convincentes.

El estudiante deberá tener la habilidad de elaborar informes técnicos con formato profesional, y realizar presentaciones orales de manera clara, ordenada y con terminología adecuada. Para ello, deberá saber utilizar medios tecnológicos adecuados que le ayuden a transmitir con mayor eficiencia los procedimientos utilizados para modelación y cálculo, los resultados obtenidos y las conclusiones.

A continuación, se describen indicadores de desempeño de las competencias específicas.

CE1.2: Aplicar las herramientas para analizar y calcular tensiones, deformaciones y esfuerzos en secciones y estructuras de barras sometidas a cargas estáticas y dinámicas.

El estudiante deberá ser capaz de elegir las hipótesis adecuadas para la modelación en el cálculo de la respuesta estructural, y de seleccionar programas de cálculo adecuados para el tipo de estructura y de análisis a realizar.

CE1.4: Aplicar los métodos aproximados para solución de las ecuaciones diferenciales de sólidos elásticos, como los métodos de Ritz y de Elementos Finitos.

El estudiante deberá adquirir la capacidad de usar métodos aproximados de cálculo sabiendo como estimar el grado de exactitud que es posible lograr para cada uno de ellos.

CE1.10: Planificar, diseñar, calcular, proyectar y construir obras e instalaciones para la captación, tratamiento, conducción y distribución de agua potable, líquidos cloacales y pluviales urbanos y rurales.

CE1.11: Planificar, proyectar, dirigir, construir y mantener obras hidráulicas, tales como presas de embalse y centrales hidroeléctricas, canales de navegación, obras de riego, obras de saneamiento rural, obras fluviales, obras de arte de proyectos viales, obras portuarias y todas aquellas relacionadas con el aprovechamiento del recurso hídrico.

CE1.12: Proyectar, calcular, dirigir, construir y mantener estructuras metálicas, de madera y de hormigón armado, según la normativa vigente.

El estudiante deberá ser capaz de realizar los cálculos preliminares y definitivos de estos tipos de estructuras en base a los métodos aprendidos en el curso, aunque utilizando cuando sea necesario elementos estructurales bi y tri-dimensionales.

Bibliografía

Prato, C.A. y Massa, J.C. (2009), "Análisis Estructural", Notas de clase de la Cátedra.

Kassimali, Aslam (2015), "Análisis Estructural", 5° edición, Cengage Learning.

Hibbeler, R.C. (2012), "Análisis Estructural", 8° edición, Prentice Hall.

McCormac, J.C. (2007), "Structural Analysis Using Classical and Matrix Methods", 4° Edition, John Wiley and Sons Inc.

Clough R.W. and Penzien, J. (2003), "Dynamics of Structures", 3° edition, Computers & Structures.

Reglamento INPRES-CIRSOC 103 (2018), Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes – Parte I: Construcciones en General.

Manuales de programas de cálculo

SAP2000 Version 15.2.1 (2012), Computers and Structures Inc.

RAM Elements Version 23.00.00.196 (2023), Bentley Systems Inc.