

Ano Letivo 2019-20

Unidade Curricular MECÂNICA ESTRUTURAL

Cursos ENGENHARIA CIVIL (2.º Ciclo)  
ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS  
ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO

Unidade Orgânica Instituto Superior de Engenharia

Código da Unidade Curricular 17231002

Área Científica ESTRUTURAS

Sigla

Línguas de Aprendizagem Português

Modalidade de ensino Presencial

Docente Responsável Rui Carlos Gonçalves Graça e Costa

DOCENTE	TIPO DE AULA	TURMAS	TOTAL HORAS DE CONTACTO (*)
Rui Carlos Gonçalves Graça e Costa	OT; T; TP	T1; TP1; OT1	7T; 15TP; 3,8OT
Vítor Manuel Lopes de Brito Saraiva Barreto	OT; T; TP	T1; TP1; OT1	8T; 15TP; 3,8OT

\* Para turmas lecionadas conjuntamente, apenas é contabilizada a carga horária de uma delas.

ANO	PERÍODO DE FUNCIONAMENTO*	HORAS DE CONTACTO	HORAS TOTAIS DE TRABALHO	ECTS
1º	S1	15T; 30TP; 7,5E; 7,5OT	175,5	6,5

\* A-Anual;S-Semestral;Q-Quadrimestral;T-Trimestral

#### Precedências

Sem precedências

#### Conhecimentos Prévios recomendados

Licenciatura em Engenharia Civil

#### Objetivos de aprendizagem (conhecimentos, aptidões e competências)

A disciplina de Mecânica Estrutural é aqui apresentada através de uma abordagem moderna que, dando ao aluno uma visão global e integrada dos aspetos formais e práticos da discretização, tanto direta como indireta, torna-o apto a elaborar modelos discretos para os diversos sistemas físicos, de cuja solução requer a aplicação do método dos elementos finitos. Estes sistemas físicos incidirão fundamentalmente em problemas de elasticidade de comportamento elástico linear. Em termos do comportamento material a análise plástica limite de pórticos e lajes é um bom complemento da formação anterior. Finalmente abordam-se os problemas geometricamente não lineares de estruturas reticuladas. No decurso da formação o aluno irá também ter a capacidade de verificar a ocorrência de erros de modelação e outros tipos de erro comuns no uso de software.

#### Conteúdos programáticos

Elasticidade Plana: Introdução à Elasticidade. Estados Planos de Tensão e de Deformação;

Método dos Elementos Finitos: Introdução ao Método. Elementos de barra e bidimensionais. Formulação matricial. Funções de Aproximação. Elasticidade Plana. Apoios elásticos. Assentamentos e Reações de Apoio. Apoios Inclinados. Formulação de elementos de Laje;

Análise Plástica Limite: Conceitos básicos: Secções Críticas. Mecanismos. Condições de cedência, escoamento e paridade. Admissibilidade Estática e Cinemática. Teoremas da análise limite. Soluções estaticamente e cinematicamente admissíveis. Formulação matricial. Mecanismos múltiplos e parciais. Interação de esforços. Aplicação em pórticos planos e lajes;

Análise geometricamente não-linear e Instabilidade bifurcacional: Instabilidade por ponto limite. Análise geometricamente não-linear de estruturas reticuladas planas. Carga crítica. Trajetórias de equilíbrio. Método de Newton-Raphson e da Matriz Secante.

#### Demonstração da coerência dos conteúdos programáticos com os objetivos de aprendizagem da unidade curricular

A aprendizagem pelo aluno dos conceitos genéricos da elasticidade tridimensional é fundamental para o uso do método dos elementos finitos, nomeadamente as interação entre as relações cinemáticas, relações de equilíbrio e relações constitutivas do material. Posteriormente é feita a introdução ao método dos elementos finitos de forma progressiva iniciando-se com elementos unidimensionais (barra de treliça, de viga, de barra de pórtico e de viga coluna), até aos elementos bidimensionais (estados planos de tensão e deformação, elementos de laje, e elementos de junta). Para cada um dos elementos adotam-se as funções de aproximação de deslocamentos adequadas, gradualmente mais complexas e com as suas particularidades, consideram-se as relações constitutivas consoante o problema físico em causa, e aplicando o Princípio dos Trabalhos Virtuais concretiza-se o equilíbrio nodal do sistema.

---

### Metodologias de ensino (avaliação incluída)

Apresentação das aulas com recurso a slides PowerPoint, os quais são fornecidos no início da semana em ficheiro tipo pdf aos alunos. A apresentação teórica de cada tema é seguida da exemplificação com exercício já resolvido. Resolução autónoma de outros exercícios com recurso aos programas; Scilab, Q7Q8Q9-Estados planos de tensão e deformação (desenvolvido por um dos docentes) e SAP2000.

A avaliação será contínua constituída por 2 testes individuais, com pesos de 50% e nota mínima de 7.50 valores em cada um. O aluno obtém aprovação perfazendo uma média mínima de 10.00 valores entre os dois testes. Os testes são fundamentalmente teóricos podendo eventualmente conter problemas questões de resolução simples e imediata.

---

### Demonstração da coerência das metodologias de ensino com os objetivos de aprendizagem da unidade curricular

Após uma revisão prévia das matérias associadas à mecânica dos sólidos, será apresentada ao aluno uma introdução à elasticidade plana, designadamente no cálculo de campos de deslocamentos, deformações e tensões, para análise de estados planos de tensão e deformação. São estabelecidas as relações de equilíbrio, compatibilidade e constitutivas.

Posteriormente, será feita a introdução ao Método dos Elementos Finitos, ao nível dos tipos elementares, seguida da formulação propriamente dita, ao nível matricial. Será apresentada a utilização de funções de aproximação com recurso ao programa SciLab, permitindo ao aluno a visualização gráfica das mesmas. Serão utilizados refinamentos  $h$  e  $p$ . Para além da ação por carga e/ou deslocamento será lecionada ao aluno a análise dos efeitos da ação da temperatura e assentamentos de apoio. Após a aprendizagem pelo aluno, dos tipos de elementos lineares e bilineares, será apresentada a formulação de elementos de laje fina e espessa, através das formulações de Kirchoff e Reissner-Mindlin.

Serão apresentados ao aluno os conceitos básicos de análise plástica, com determinação da localização de secções críticas e possíveis mecanismos. Resolução de problemas de aplicação em pórticos planos recorrendo ao SciLab, ao programa Q7Q8Q9 no caso de paredes e ao programa SAP2000 no caso de lajes.

A parte final da matéria é composta por análise de não-linearidade geométrica, com instabilidade bifurcacional e instabilidade por ponto limite. Será lecionada a determinação de carga crítica e de trajetórias de equilíbrio, recorrendo aos métodos de Newton-Raphson e da Matriz Secante.

---

### Bibliografia principal

- Portela, A., Charafi, A., Finite Elements Using Maple ? A Symbolic Programming Approach, Springer, Berlin, 2002;*
- Zienkiewicz, O.C., Morgan, K., Finite Elements and Approximation, John Wiley & Sons, New York, 1983;*
- Brebbia, C.A., Connor, J.J., Finite Elements for Fluid Flow, Butterworths, London 1975;*
- Bath, K.J., Wilson, E.L., Numerical Methods in Finite Element Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1976;*
- Richard L. Burden, J. Douglas Faires, Numerical Analysis, Brooks/Cole, 1997;*
- Heitor Pina, Métodos Numéricos, McGraw-Hill, 1995;*
- Steven C. Chapra; Raymond Canale, Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill, 1990;*
- J.N.Reddy; Finite Element Method, McGraw-Hill, 2nd Ed., 1993;*
- Tirupathi Chandrupatla, Ashok Belengu; An introduction to the Finite Elements in Engineering, Pentice Hall International, 1991;*
- O.C. Zienkiewicz; El Método de los Elementos Finitos, Ed. Reverté, 1982;*
- Robert Cook; Finite Element Modeling for Stress Analysis, Ed. John Wiley & Sons, 1995.*

**Academic Year** 2019-20

**Course unit** STRUCTURAL MECHANICS

**Courses** CIVIL ENGINEERING  
ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS  
ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO

**Faculty / School** INSTITUTE OF ENGINEERING

**Main Scientific Area** ESTRUTURAS

**Acronym**

**Language of instruction** Portuguese

**Teaching/Learning modality** Presential

**Coordinating teacher** Rui Carlos Gonçalves Graça e Costa

Teaching staff	Type	Classes	Hours (*)
Rui Carlos Gonçalves Graça e Costa	OT; T; TP	T1; TP1; OT1	7T; 15TP; 3,8OT
Vítor Manuel Lopes de Brito Saraiva Barreto	OT; T; TP	T1; TP1; OT1	8T; 15TP; 3,8OT

\* For classes taught jointly, it is only accounted the workload of one.

### Contact hours

T	TP	PL	TC	S	E	OT	O	Total
15	30	0	0	0	7,5	7,5	0	175,5

T - Theoretical; TP - Theoretical and practical ; PL - Practical and laboratorial; TC - Field Work; S - Seminar; E - Training; OT - Tutorial; O - Other

### Pre-requisites

no pre-requisites

### Prior knowledge and skills

Degree in Civil Engineering

### The students intended learning outcomes (knowledge, skills and competences)

The Structural mechanics discipline is presented here using a modern approach, giving the student a global and integrated vision of formal and practical aspects of structural discretization, both directly and indirectly, allowing the student to develop discrete models for the various physical systems, whose solution requires the application of the finite element method. These physical systems will focus mainly on problems of elasticity of linear elastic behaviour. In terms of the material behaviour the plastic limit analysis of beam-column systems and slabs is a adequate complement for previous training. Finally, it will be focused problems geometrically nonlinear framed structures. During the training the student will also have the ability to verify the occurrence of modelling errors and other common error types in the use of software.

### Syllabus

Two-dimensional elasticity: introduction to elasticity. Flat States of stress and strain; Finite element method: introduction to the method. Linear and Bi-linear elements. Matrix formulation. Approximation functions. Flat Elasticity. Elastic supports. Settlements and support reactions. Inclined supports. Formulation for slab elements; Plastic Limit analysis: basic concepts: Critical Sections. Mechanisms. Conditions of transfer, disposal and parity. Admissibility statics and kinematics. Theorems of limit analysis. Statically and cinematically admissible solutions. Matrix formulation. Multiple and partial mechanisms. Solicitation interaction. Application in framed structures and slabs; Geometrically nonlinear analysis and bifurcational Instability: Limit point instability. Nonlinear geometrical analysis of planar framed structures. Critical load. Equilibrium trajectories. Newton-Raphson method and the Secant Array Method.

### Demonstration of the syllabus coherence with the curricular unit's learning objectives

The student introduction to the generic concepts of three dimensional elasticity is fundamental to the use of the finite element method, namely the interaction between the kinematic relationships, balance relations and constitutive relations of material. Later it is made the introduction to finite element method in a progressive manner starting with one-dimensional elements (beam, truss bar, column bar and beam-column bar), up to 2-dimensional elements (stress and strain plain states, slab elements, and zero-thickness elements). Choice, for each one of the elements, of the appropriate approximation functions, gradually evolving to more complex functions, presenting its particularities, constitutive relations depending on the physical problem concerned, and applying the principle of virtual works to obtain the nodal equilibrium of the system.

---

### Teaching methodologies (including evaluation)

Lessons will be presented using PowerPoint slides, which are provided at the beginning of the week in pdf file type to the students. The theoretical presentation of each theme is followed by exemplification with an exercise already solved. Resolution of other exercises using the programs; Scilab, Q7Q8Q9-stress and strain plain states (developed by one of the teachers) and SAP2000. Attribution of evaluation work at the beginning of the semester to each working group, supported by tutorial lectures. The continuous evaluation will consist of 2 individual tests, with weights of 0.4 and 0.6 respectively and will worth 50% of the final grade, with the remaining 50% attributed to the elaboration of a practical work with oral defence exam, with weights of 0.70 and 0.30 respectively. The tests are fundamentally theoretical and may eventually contain problems solving questions simple and immediate.

---

### Demonstration of the coherence between the teaching methodologies and the learning outcomes

After a preliminary review of the topics associated with solid mechanics, an introduction to plain elasticity will be presented, in particular to the calculation of displacements, deformations and stresses, for stress and strain plain state analysis. Relations are established for equilibrium, compatibility and constitutive.

Later, the introduction to the finite element method, at the level of elementary types, followed by the formulation itself, at the matrix level. The use of approximation functions with SciLab program will be presented, allowing the student to graphical view. H and p refinements will be used. In addition to loading and displacement will be taught to students in the analysis of the effect of temperature action and supporting settlements. After the apprehension by the student, of the different types of linear and bilinear elements, it will be presented the formulation for thin and thick slab elements, through the formulation of Reissner-Mindlin and Kirchhoff.

The basics of plastic analysis with determining the location of critical sections and possible mechanisms will be presented to the student. Problem solving in application to practical works on framed structures using SciLab program, the Q7Q8Q9 program in the case of walls and SAP2000 program in case of slabs. In addition to teaching, the student will develop a practical work, with application of the syllabus, with questions for e-learning and tutorial. The final subject is composed of geometric nonlinearity analysis with bifurcational instability and instability by limit point. It will also be taught the determination of critical load and balance paths, using the Newton-Raphson methods and matrix Secant.

---

### Main Bibliography

- Portela, A., Charafi, A., Finite Elements Using Maple ? A Symbolic Programming Approach, Springer, Berlin, 2002;*
- Zienkiewicz, O.C., Morgan, K., Finite Elements and Approximation, John Wiley & Sons, New York, 1983;*
- Brebbia, C.A., Connor, J.J., Finite Elements for Fluid Flow, Butterworths, London 1975;*
- Bath, K.J., Wilson, E.L., Numerical Methods in Finite Element Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1976;*
- Richard L. Burden, J. Douglas Faires, Numerical Analysis, Brooks/Cole, 1997;*
- Heitor Pina, Métodos Numéricos, McGraw-Hill, 1995;*
- Steven C. Chapra; Raymond Canale, Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill, 1990;*
- J.N.Reddy; Finite Element Method, McGraw-Hill, 2nd Ed., 1993;*
- Tirupathi Chandrupatla, Ashok Belengu; An introduction to the Finite Elements in Engineering, Pentice Hall International, 1991;*
- O.C. Zienkiewicz; El Método de los Elementos Finitos, Ed. Reverté, 1982;*
- Robert Cook; Finite Element Modeling for Stress Analysis, Ed. John Wiley & Sons, 1995.*