

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

SCUOLA DI INGEGNERIA (DALMINE)

ANNO ACCADEMICO 2020/2121

INSEGNAMENTO: SCIENZA DELLE COSTRUZIONI (9 CFU)

CORSO DI LAUREA: INGEGNERIA DELLE TECNOLOGIE PER L'EDILIZIA / GESTIONALE

DOCENTE: PROF. EGIDIO RIZZI

PROGRAMMA DETTAGLIATO DEL CORSO

| DATA | N. ORE | ARGOMENTO | N. ORE PROGR. |
|---------------------|--------|--|------------------|
| 04/10/21 Lez. 01 | 1 | Introduzione al corso. La Scienza delle Costruzioni. Meccanica dei Solidi e delle Strutture. Programma indicativo del corso. Il solido tipo "trave" (piana). | 01 |
| " | 1 | Analisi cinematica (piana). Gradi di libertà. Vincoli assoluti e gradi di vincolo (o di svincolo). Ipotesi sui vincoli. Vincoli triplo (incastro), doppi (cerniera, pattino, manicotto), semplici (carrello, bipattino). CIR dell'asta, per effetto dei vincoli introdotti. Cerniera propria (cerniera) e cerniera impropria (pattino, manicotto). Luogo di CIR (asse del carrello e del bipattino). | 02 |
| 06/10/21 Lez. 02 | 1 | Computo dei gdv di vincoli assoluti e relativi. Gradi di libertà residui e labilità strutturale. Spostamenti finiti e infinitesimi (atti di moto). | 03 |
| " | 1 | CN di non-labilità. Esempi di vincoli mal posti o inefficaci (schemi labili). Classificazione delle strutture (ipo, iso e iperstatiche). Analisi Cinematica e suoi approcci. Casi elementari ottenuti per sequenza di montaggio di schemi fondamentali. | 04 |
| " | 1 | Schemi isostatici fondamentali del corpo rigido: asta incastrata, asta cerniera-carrello (avente asse del carrello non passante per la cerniera), asta tre-carrelli (avente assi non convergenti in un unico punto). | 05 |
| 08/10/21 Lez. 03 | 1 | Schemi isostatici fondamentali dei sistemi articolati. Asta tre-bielle. Biella (assoluta o relativa). Asse della biella. Ruolo cinematico della biella (equivalenza cinematica a carrello). Arco a tre cerniere. Deduzione cinematica. Esempi labili (cerniere allineate) e non (cerniere non allineate), con cerniere proprie ed improprie. Meccanismo di trave. | 06 |
| " | 1 | Quadrilatero articolato riconducibile ad arco a tre cerniere non allineate. Esempio labile: meccanismo di collasso di parete. | 07 |
| " | 1 | Anello chiuso isostatico. Esempi di anello chiuso isostatico con diverse deduzioni di sequenza di montaggio. Esempi di sequenza di montaggio a realizzazione di schemi elementari. | 08 |

| | | | |
|---------------------|---|--|------|
| 11/10/21 Ese. 01 | 2 | Esercitazione sull'Analisi Cinematica dei corpi rigidi. | E.02 |
| 13/10/21 Lez. 04 | 1 | Calcolo delle Reazioni Vincolari (RV). Connotazione statica dei vincoli. Esempio di asta incastrata con carichi tipici. Carico distribuito: determinazione del risultante. Casi notevoli: $q=cost$ e $q=lin.$ | 09 |
| " | 1 | Equazioni cardinali della statica (piana). RV dei vincoli visti. | 10 |
| " | 1 | Esempi di calcolo delle RV del corpo rigido: trave appoggio-appoggio con forza o con coppia concentrata; trave appoggio-appoggio e asta incastrata con $q=cost$ o $q=lin.$ Esempio di asta tre-carrelli con assi non convergenti in un unico punto, mediante scrittura di tre equazioni di equilibrio alla rotazione. | 11 |
| 15/10/21 Lez. 05 | 1 | Calcolo delle RV dei sistemi articolati. Esempio di anello chiuso isostatico con due possibili sequenze di montaggio. Conseguenti analisi statiche, secondo sequenza inversa a quella di montaggio. Apertura degli anelli chiusi. Scrittura delle equazioni di equilibrio relativo. | 12 |
| " | 1 | Calcolo delle RV di arco a tre cerniere non allineate. Ruolo statico della biella. Soluzione tramite schema ad albero. Esempio simile con variazione del vincolo relativo e conseguente modifica delle RV. | 13 |
| " | 1 | Esempio di quadrilatero articolato soggetto a sistema di forze autoequilibrato: calcolo RV. | 14 |
| 18/10/21 Ese. 02 | 2 | Esercitazione sull'Analisi Cinematica dei sistemi articolati di corpi rigidi. | E.04 |
| 20/10/21 Lez. 06 | 1 | Azioni Interne (AI): azione assiale o normale (N), azione tagliante o taglio (T), azione flettente o momento flettente (M). Convenzioni. Esempi di trave a mensola con carichi concentrati d'estremità e carico uniformemente distribuito. Calcolo delle AI mediante scrittura delle equazioni di equilibrio. | 15 |
| " | 1 | Riscontro dell'andamento funzionale di N,T,M per $q=0$ e $q=cost$. Diagrammi di azione interna: rappresentazione grafica delle AI nei diagrammi N,T,M. Convenzioni di tracciamento. | 16 |
| " | 1 | Andamenti tipici di T e M nelle travi: trave appoggio-appoggio con carico concentrato (discontinuità "salto" di T) o con coppia concentrata (discontinuità "salto" di M); trave appoggio-appoggio o trave a mensola con carico uniformemente ripartito (T lineare e M parabolico). Esempio di quadrilatero articolato soggetto a sistema di forze autoequilibrato: determinazione e rappresentazione AI. | 17 |
| 22/10/21 Lez. 07 | 1 | Equazioni indefinite di equilibrio del concio di trave rettilinea. Legame differenziale tra momento e taglio e tra momento e carico q agente. Concavità di M nel verso di q . | 18 |
| " | 1 | Dipendenze funzionali tipiche per i casi di interesse. Prova di flessione su 4 punti (tratto con $T=0$ e $M=cost$). Determinazione del momento massimo in tratto con carico uniformemente distribuito. | 19 |
| " | 1 | Discontinuità "salto" delle AI. Esempi e commenti sui valori delle AI nei sistemi articolati. Verifica degli equilibri nodali. | 20 |
| 25/10/21 Ese. 03 | 2 | Esercitazione sull'Analisi Cinematica e sul calcolo delle Reazioni Vincolari dei sistemi articolati di corpi rigidi. | E.06 |
| 27/10/21 Lez. 08 | 1 | Introduzione alla meccanica dei solidi continui: concetto di sforzo, di deformazione, di legame costitutivo (comportamento meccanico del materiale). Prova di trazione. Sforzo normale e sforzo di taglio. Deformazione longitudinale. Deformazione trasversale e coefficiente di contrazione trasversale o di Poisson. Classi di comportamento del materiale. Legge di Hooke generalizzata. Modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young. | 21 |

| | | | |
|---------------------|---|---|------|
| " | 1 | Effetto di contrazione trasversale e variazione/range del coefficiente di contrazione trasversale di Poisson (con caso limite per risposta con deformazione volumetrica nulla). Risposta a taglio. Prova di torsione. Sforzo di taglio e scorrimento angolare. Modulo di elasticità tangenziale. | 22 |
| " | 1 | Cenno a materiali con comportamento non simmetrico a trazione/compressione (es. lapidei, calcestruzzo, muratura) e con risposta fragile/duttile. | 23 |
| 29/10/21 Lez. 09 | 1 | Deformazioni elastiche elementari del concio di trave soggetto alle azioni interne N,T,M. Rigidezza assiale, rigidezza tagliante, rigidezza flessionale. | 24 |
| " | 1 | Curvatura della linea d'asse inflessa. Legge di Eulero-Bernoulli-Navier. Metodo della Linea Elastica. Riferimenti locale e assoluto; convenzioni di segno. Equazione differenziale della linea elastica. Mensola con carico concentrato ad un estremo. Condizioni al contorno e loro imposizione. Equazione finale della linea elastica. Spostamenti caratteristici (coefficienti di influenza) e rappresentazione della deformata. | 25 |
| " | 1 | Mensola con carico uniformemente ripartito. Risoluzione di strutture iperstatiche col metodo delle forze. Esempio incastro-appoggio. Condizione di congruenza. Soluzione con i coefficienti di influenza precedentemente calcolati. | 26 |
| 03/11/21 Lez. 10 | 1 | Soluzione completa dell'esempio incastro-appoggio tramite metodo della Linea Elastica. Possibilità di scelta dell'incognita iperstatica. | 27 |
| " | 1 | Procedimento risolutivo completo. Rappresentazione della soluzione finale, per quantità statiche (X; RV; N,T,M) e cinematiche (LE finali, spostamenti e rotazioni, deformata qualitativa). | 28 |
| " | 1 | Quadro generale del metodo della Linea Elastica. Campi di integrazione e sistemi di riferimento. Scelta dell'eventuale incognita iperstatica. Scrittura e imposizione delle condizioni al contorno. Illustrazione con esempio. | 29 |
| 05/11/21 Lez. 11 | 1 | Principio dei Lavori Virtuali (PLV). Sistemi staticamente e cinematicamente ammissibili. Enunciato del PLV quale CN di equilibrio e congruenza. Calcolo di componenti di spostamento tramite il PLV (esempio di trave a mensola con q uniforme). Struttura fittizia. Scrittura del PLV. | 30 |
| " | 1 | Soluzione di strutture iperstatiche tramite il PLV. Esempio incastro-appoggio con q uniforme. Struttura fittizia e struttura principale isostatica. Sovrapposizione degli effetti. Soluzione dell'incognita iperstatica tramite scrittura del PLV. | 31 |
| " | 1 | Calcolo successivo di componenti di spostamento tramite nuova applicazione del PLV. | 32 |
| 08/11/21 Ese. 04 | 2 | Esercitazione sul calcolo delle Reazioni Vincolari e delle Azioni Interne nei sistemi articolati di corpi rigidi. | E.08 |
| 10/11/21 Lez. 12 | 1 | Meccanica dei Solidi. Statica dei continui. Continuo (non polare) di Cauchy. Forze di superficie e forze di volume. Definizioni ed ipotesi. Vettore sforzo di Cauchy. Proprietà. Componenti normale e tangenziale. Tetraedro di Cauchy. Equilibrio alla traslazione del tetraedro. Relazione di Cauchy. | 33 |
| " | 1 | Scrittura esplicita in termini di componenti. Tensore sforzo di Cauchy. | 34 |
| " | 1 | Significato fisico delle componenti di sforzo. Simmetria del tensore sforzo da equilibrio alla rotazione del tetraedro (tensore del 2° ordine simmetrico). | 35 |
| 11/11/21 Ese. 05 | 2 | Esercitazione sulla risoluzione di strutture isostatiche. | E.10 |
| 12/11/21 | 1 | Tensioni principali. Problema agli autovalori per il tensore sforzo di Cauchy. Polinomio caratteristico. | 36 |

| | | | |
|---------------------|---|--|------|
| Lez. 13 | | Invarianti di sforzo. | |
| " | 1 | Radici (reali) dell'equazione caratteristica. Ortogonalità mutua di autovettori corrispondenti ad autovalori distinti. Terna principale. Classificazione dello stato di sforzo: triassiale, biassiale, monoassiale. | 37 |
| " | 1 | Equazioni indefinite di equilibrio dei continui (derivazione tramite scrittura diretta dell'equilibrio alla traslazione del parallelepipedo infinitesimo). | 38 |
| 15/11/21 Ese. 06 | 2 | Esercitazione sulla risoluzione di strutture isostatiche. | E.12 |
| 17/11/21 Lez. 14 | 1 | "Cerchio di Mohr". Derivazione delle equazioni parametriche della circonferenza di Mohr (da equilibrio diretto in sede indefinita). | 39 |
| " | 1 | Costruzione grafica della circonferenza nel piano di Mohr (σ, τ). Centro e raggio del CM. Proprietà del Cerchio di Mohr. Polo del CM. Tensioni principali e direzioni principali di sforzo. Sforzo tangenziale massimo e direzioni secondo cui agisce la τ^{\max} , a 45° rispetto alle direzioni principali. | 40 |
| " | 1 | Esempi rilevanti: CM per stato di sforzo monoassiale di trazione/compressione; CM per stato di sforzo di taglio puro (tensioni principali uguali e di segno opposto); CM per stati di sforzo piano alla DSV (aventi una componente di sforzo normale nulla). Cerchi e arbelo di Mohr. Implicazioni del CM nella verifica di resistenza di materiali e strutture. Caso piano: τ^{\max} fuori piano per tensioni principali nel piano aventi lo stesso segno ($\sigma_I \cdot \sigma_{II} > 0$). | 41 |
| 19/11/21 Lez. 15 | 1 | Deformazione. Vettore spostamento e tensore gradiente di spostamento. Decomposizione additiva del gradiente di spostamento: parte simmetrica ε (tensore delle piccole deformazioni) e parte emisimmetrica θ (tensore delle piccole rotazioni). | 42 |
| " | 1 | Significato fisico delle componenti di ε e di θ . | 43 |
| " | 1 | Deformazioni principali e direzioni principali di deformazione. Problema agli autovalori per ε . Equazione caratteristica e invarianti di deformazione. Rappresentazione diagonale di ε nella terna principale. Deformazione volumetrica e significato fisico dell'invariante primo di deformazione. | 44 |
| 22/11/21 Ese. 07 | 2 | Esercitazione sulla risoluzione di strutture iperstatiche tramite LE e PLV. | E.14 |
| 24/11/21 Lez. 16 | 1 | Legame costitutivo (comportamento meccanico del materiale). Problema elastico: bilancio equazioni / incognite. Legame elastico, lineare, isotropo. Legge di Hooke generalizzata (per sovrapposizione degli effetti visti nel caso monoassiale). Legge costitutiva in notazione matriciale. Matrice di cedevolezza. | 45 |
| " | 1 | Energia di deformazione elastica. Definizione positiva dell'energia di deformazione e della matrice di cedevolezza. Delimitazioni sui parametri elastici. Scrittura compatta tensoriale del legame costitutivo. Relazioni tra i parametri elastici E, G, ν . | 46 |
| " | 1 | Risposta elastica volumetrica. Modulo di volume K . <i>Commenti correzione compito a casa struttura isostatica.</i> | 47 |
| 26/11/21 Lez. 17 | 1 | Parti volumetrica e deviatorica di ε e di σ . Significato fisico. Rappresentazione nello spazio delle deformazioni principali e nello spazio degli sforzi principali. Asse idrostatico, piano deviatorico. Ortogonalità mutua delle parti volumetrica e deviatorica. Invarianti dei deviatori. | 48 |

| | | | |
|---------------------|---|--|------|
| " | 1 | Risposte elastiche volumetrica e deviatorica disaccoppiate. Energie di deformazione volumetrica e deviatorica. | 49 |
| " | 1 | Verifica di resistenza (elastica). Grandezza Indice del Pericolo. Verifica nel dominio degli sforzi in termini di tensione equivalente. Criterio di Galileo-Rankine-Navier: concetto base; derivazione analitica; rappresentazione nel caso piano; dominio di resistenza. Ruolo degli stati di sforzo piano con $\sigma_I = \sigma_{II}$ (equitensione biassiale) vs. $\sigma_I = -\sigma_{II}$ (taglio puro). | 50 |
| 29/11/21 Ese. 08 | 2 | Esercitazione sulla risoluzione di strutture iperstatiche tramite LE e PLV. | E.16 |
| 01/12/21 Lez. 18 | 1 | Criterio di de Saint Venant-Grashof. Formulazione concettuale (duale a G-R-N) in termini di deformazione normale. Scrittura analitica nello spazio degli sforzi. Caso piano e sua rappresentazione (intersezione di due triangoli isosceli). Condizioni per forma rombica. Rappresentazione del criterio di DSV-G per materiali a comportamento simmetrico. Validità del criterio per stati di sforzo piano alla DSV con $\sigma_I \cdot \sigma_{II} \leq 0$. | 51 |
| " | 1 | Criterio di Beltrami. Enunciato in termini energetici. Tensione equivalente di Beltrami. Rappresentazione nel caso piano: ellisse di Beltrami e cf. con DSV-G. Criterio di Huber-Hencky-von Mises: significato fisico; derivazione in termini dell'energia deviatorica; tensione equivalente di \sqrt{M} ; caso limite di Beltrami per $\nu \rightarrow 1/2$; rappresentazione nel caso piano; ellisse di von Mises; resistenza a taglio secondo \sqrt{M} , $\tau_0 = \sigma_0 / \sqrt{3}$. | 52 |
| " | 1 | Criterio di Guest-Tresca: significato fisico in termini di τ^{\max} ; resistenza a taglio parametrizzata su prova di trazione, $\tau_0 = \sigma_0 / 2$; rappresentazione nel caso piano, esagono di Tresca. Ordine di conservatività dei diversi criteri. | 53 |
| 03/12/21 Lez. 19 | 1 | Problema di de Saint Venant. Ipotesi e definizioni. Postulato di DSV. Riferimento principale d'inerzia. | 54 |
| " | 1 | Richiami sulla geometria delle aree: area, momenti statici, momenti d'inerzia, baricentro. Teorema di trasposizione. Assi principali ed ellisse principale d'inerzia. | 55 |
| " | 1 | Considerazioni per sezioni simmetriche. Es. della sezione rettangolare. Sezioni composte da aree elementari. | 56 |
| 06/12/21 Ese. 09 | 2 | Esercitazione sulla risoluzione di strutture iperstatiche tramite LE e PLV. | E.18 |
| 10/12/21 Lez. 20 | 1 | Casi di DSV: 1) Azione assiale. Approccio seminverso agli sforzi. Soluzione completa in termini di sforzo e deformazione. Allungamento e contrazione omotetica. | 57 |
| " | 1 | Casi di DSV: 2) Flessione (retta). Soluzione completa in termini di sforzo e deformazione. Formula di Navier per la flessione. Modulo di resistenza a flessione. Asse neutro. | 58 |
| " | 1 | Rotazione flessionale e legame curvatura-momento. Asse di inflessione. Deformazione nel piano della sezione (curvatura anticlastica). Caso della sezione rettangolare. | 59 |
| 13/12/21 Ese. 10 | 2 | Esercitazione sulla geometria delle aree. | E.20 |
| 15/12/21 Lez. 21 | 1 | Sollecitazioni composte: flessione deviata. Campo di sforzo lineare per sovrapposizione degli effetti di due flessioni rette. Asse neutro, coniugato dell'asse di sollecitazione. Involuzione dei diametri | 60 |

| | | | |
|---------------------|---|--|------|
| | | coniugati (polarità d'inerzia rispetto all'ellisse centrale d'inerzia). Asse di inflessione. | |
| | 1 | Tenso(presso)-flessione (retta). Eccentricità $e=M/N$. Campo di sforzo per sovrapposizione degli effetti. Asse neutro. Antipolarità d'inerzia (relazione tra centro di sollecitazione C ed asse neutro n-n; sistema polo/antipolare). | 61 |
| | 1 | Costruzioni grafiche dell'asse n-n. Nocciolo centrale d'inerzia (con riferimento al caso della sezione rettangolare). | 62 |
| 17/12/21 Lez. 22 | 1 | Casi di DSV: 3) Taglio (o flessione composta). Caso della sezione simmetrica e simmetricamente caricata. Trattazione approssimata alla Jourawsky. Formula di Jourawsky. Derivazione e significato fisico. | 63 |
| " | 1 | Tensioni tangenziali τ_{zx} nel caso di contorno inclinato rispetto all'asse di simmetria (y). Andamento antisimmetrico delle τ_{zx} , lineari lungo la corda (da equazione indefinita di equilibrio). | 64 |
| " | 1 | Espressione analitica delle τ_{zx} . Vettore τ_z risultante. <i>Commenti risoluzione compito struttura.</i> | 65 |
| 20/12/21 Ese. 11 | 2 | Esercitazione sulla verifica di resistenza di sezione. | E.22 |
| 22/12/21 Lez. 23 | 1 | Deformazione a taglio. Scorrimento angolare medio e sua valutazione tramite PLV. Fattore di taglio della sezione trasversale. | 66 |
| " | 1 | Caso della sezione rettangolare: andamento parabolico delle τ_{zy} con valore massimo in corrispondenza del baricentro. | 67 |
| " | 1 | Sezioni composte da rettangoli elementari; discontinuità "salto" delle τ_z in corrispondenza di discontinuità della larghezza della corda. | 68 |
| " | 1 | Formule di verifica di resistenza per stati di sforzo piano alla DSV. | 69 |
| 23/12/21 | 4 | Prova in itinere: risoluzione di struttura. | P1 |
| 10/01/22 Ese. 12 | 2 | Esercitazione sulla verifica di resistenza di sezione. | E.24 |
| 12/01/22 Lez. 24 | 1 | Casi di DSV: 4) Torsione (circolare). Derivazione del campo di sforzo con approccio seminverso agli sforzi. Andamento lineare a farfalla delle τ_{zt} . Formula per la τ^{\max} ; modulo di resistenza a torsione. | 70 |
| " | 1 | Caso della sezione cava (e in parete sottile). Deformazione torsionale del concio. Rigidezza torsionale. Fattore di torsione. Analogie complessive col caso della flessione retta. | 71 |
| " | 1 | Conclusioni sui contenuti del corso. | 72 |
| 17/01/22 | 4 | Prova in itinere: verifica di sezione. | P2 |