

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

## SCUOLA DI INGEGNERIA (DALMINE)

INSEGNAMENTO: SCIENZA DELLE COSTRUZIONI (9 CFU)

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

DOCENTE: PROF. EGIDIO RIZZI

### INDICE DETTAGLIATO DELLE LEZIONI

LEZ.	N. ORE	ARGOMENTO	N. ORE PROGR.
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).	02
"	1	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).	03
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).	04
"	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.	05
"	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).	06
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.	07
"	1	Quadrilatero articolato riconducibile ad arco a tre cerniere non allineate. Esempio labile: meccanismo di collasso di parete.	08
"	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.	09
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 $q=lin.$	10
"	1	Equazioni cardinali della statica (piana). RV dei vincoli visti.	11
"	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 $q=lin.$	12

		Esempio di asta tre-carrelli con assi non convergenti in un unico punto, mediante scrittura di tre equazioni di equilibrio alla rotazione.	
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.	13
"	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.	14
"	1	Esempio di quadrilatero articolato soggetto a sistema di forze autoequilibrato: calcolo RV.	15
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.	16
"	1	Riscontro dell'andamento funzionale di N,T,M per $q=0$ e $q=\text{cost.}$ Diagrammi di azione interna: rappresentazione grafica delle AI nei diagrammi N,T,M. Convenzioni di tracciamento.	17
"	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.	18
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 $q$ .	19
"	1	Dipendenze funzionali tipiche per i casi di interesse. Prova di flessione su 4 punti (tratto con $T=0$ e $M=\text{cost.}$ ). Determinazione del momento massimo in tratto con carico uniformemente distribuito.	20
"	1	Discontinuità "salto" delle AI. Esempi e commenti sui valori delle AI nei sistemi articolati. Verifica degli equilibri nodali.	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.	22
"	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.	23
"	1	Cenno a materiali con comportamento non simmetrico a trazione/compressione (es. lapidei, calcestruzzo, muratura) e con risposta fragile/duttile.	24
Lez. 09	1	Deformazioni elastiche elementari del concio di trave soggetto alle azioni interne N,T,M. Rigidezza assiale, rigidezza tagliante, rigidezza flessionale.	25
"	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 al 2° ordine. Mensola con carico concentrato ad un estremo. Condizioni al contorno e loro imposizione. Equazione finale della linea elastica. Spostamenti caratteristici (coefficienti di influenza) e	26

		<b>rappresentazione della deformata.</b>	
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>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.</b>	<b>27</b>
<b>Lez. 10</b>	<b>1</b>	<b>Soluzione completa dell'esempio incastro-appoggio tramite metodo della Linea Elastica. Possibilità di scelta dell'incognita iperstatica.</b>	<b>28</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>Procedimento risolutivo completo. Rappresentazione della soluzione finale, per quantità statiche (X; RV; N,T,M) e cinematiche (LE finali, spostamenti e rotazioni, deformata qualitativa).</b>	<b>29</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>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.</b>	<b>30</b>
<b>Lez. 11</b>	<b>1</b>	<b>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.</b>	<b>31</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>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.</b>	<b>32</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>Calcolo successivo di componenti di spostamento tramite nuova applicazione del PLV.</b>	<b>33</b>
<b>Lez. 12</b>	<b>1</b>	<b>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.</b>	<b>34</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>Scrittura esplicita in termini di componenti. Tensore sforzo di Cauchy.</b>	<b>35</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>Significato fisico delle componenti di sforzo. Simmetria del tensore sforzo da equilibrio alla rotazione del tetraedro (tensore del 2° ordine simmetrico).</b>	<b>36</b>
<b>Lez. 13</b>	<b>1</b>	<b>Tensioni principali. Problema agli autovalori per il tensore sforzo di Cauchy. Polinomio caratteristico. Invarianti di sforzo.</b>	<b>37</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>Radici (reali) dell'equazione caratteristica. Ortogonalità mutua di autovettori corrispondenti ad autovalori distinti. Terna principale. Classificazione dello stato di sforzo: triassiale, biassiale, monoassiale.</b>	<b>38</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>Equazioni indefinite di equilibrio dei continui (derivazione tramite scrittura diretta dell'equilibrio alla traslazione del parallelepipedo infinitesimo).</b>	<b>39</b>
<b>Lez. 14</b>	<b>1</b>	<b>"Cerchio di Mohr". Derivazione delle equazioni parametriche della circonferenza di Mohr (da equilibrio diretto in sede indefinita).</b>	<b>40</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>Costruzione grafica della circonferenza nel piano di Mohr (<math>\sigma, \tau</math>). 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 <math>\tau^{\max}</math>, a 45° rispetto alle direzioni principali.</b>	<b>41</b>
<b>"</b>	<b>1</b>	<b>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 arbello di Mohr. Implicazioni del CM nella verifica di resistenza di materiali e strutture. Caso</b>	<b>42</b>

		piano: $\tau^{\max}$ fuori piano per tensioni principali nel piano aventi lo stesso segno ( $\sigma_I \cdot \sigma_{II} > 0$ ).	
Lez. 15	1	Deformazione. Vettore spostamento e tensore gradiente di spostamento. Decomposizione additiva del gradiente di spostamento: parte simmetrica $\varepsilon$ (tensore delle piccole deformazioni) e parte emisimmetrica $\theta$ (tensore delle piccole rotazioni).	43
"	1	Significato fisico delle componenti di $\varepsilon$ e di $\theta$ .	44
"	1	Deformazioni principali e direzioni principali di deformazione. Problema agli autovalori per $\varepsilon$ . Equazione caratteristica e invarianti di deformazione. Rappresentazione diagonale di $\varepsilon$ nella terna principale. Deformazione volumetrica e significato fisico dell'invariante primo di deformazione.	45
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.	46
"	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, $\nu$ .	47
"	1	Risposta elastica volumetrica. Modulo di volume K.	48
Lez. 17	1	Parti volumetrica e deviatorica di $\varepsilon$ e di $\sigma$ . 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.	49
"	1	Risposte elastiche volumetrica e deviatorica disaccoppiate. Energie di deformazione volumetrica e deviatorica.	50
"	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).	51
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 $\sigma_I \cdot \sigma_{II} \leq 0$ .	52
"	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 $\sqrt{3}M$ ; caso limite di Beltrami per $\nu \rightarrow 1/2$ ; rappresentazione nel caso piano; ellisse di von Mises; resistenza a taglio secondo $\sqrt{3}M$ , $\tau_0 = \sigma_0 / \sqrt{3}$ .	53
"	1	Criterio di Guest-Tresca: significato fisico in termini di $\tau^{\max}$ ; 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.	54
Lez. 19	1	Problema di de Saint Venant. Ipotesi e definizioni. Postulato di DSV. Riferimento principale d'inerzia.	55

"	1	Richiami sulla geometria delle aree: area, momenti statici, momenti d'inerzia, baricentro. Teorema di trasposizione. Assi principali ed ellisse principale d'inerzia.	56
"	1	Considerazioni per sezioni simmetriche. Es. della sezione rettangolare. Sezioni composte da aree elementari. <i>Commenti risoluzione compito struttura isostatica.</i>	57
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.	58
"	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.	59
"	1	Rotazione flessionale e legame curvatura-momento. Asse di inflessione. Deformazione nel piano della sezione (curvatura anticlastica). Caso della sezione rettangolare.	60
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 coniugati (polarità d'inerzia rispetto all'ellisse centrale d'inerzia). Asse di inflessione.	61
	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).	62
	1	Costruzioni grafiche dell'asse n-n. Nocciolo centrale d'inerzia (con riferimento al caso della sezione rettangolare).	63
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.	64
"	1	Tensioni tangenziali $\tau_{zx}$ nel caso di contorno inclinato rispetto all'asse di simmetria (y). Andamento antisimmetrico delle $\tau_{zx}$ , lineari lungo la corda (da equazione indefinita di equilibrio).	65
"	1	Espressione analitica delle $\tau_{zx}$ . Vettore $\tau_z$ risultante. <i>Commenti risoluzione compito struttura iperstatica.</i>	66
Lez. 23	1	Deformazione a taglio. Scorrimento angolare medio e sua valutazione tramite PLV. Fattore di taglio della sezione trasversale.	67
"	1	Caso della sezione rettangolare: andamento parabolico delle $\tau_{zy}$ con valore massimo in corrispondenza del baricentro. Sezioni composte da rettangoli elementari; discontinuità "salto" delle $\tau_z$ in corrispondenza di discontinuità della larghezza della corda.	68
"	1	Formule di verifica di resistenza per stati di sforzo piano alla DSV.	69
Lez. 24	1	Casi di DSV: 4) Torsione (circolare). Derivazione del campo di sforzo con approccio seminverso agli sforzi. Andamento lineare a farfalla delle $\tau_{zt}$ . Formula per la $\tau^{\max}$ ; 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