

Ordine degli Ingegneri di Lecco

CORSO DI AGGIORNAMENTO PROFESSIONALE

«PROGETTARE EDIFICI IN ZONA SISMICA»

MODULO M4

PROGETTARE LE STRUTTURE IN ZONA SISMICA

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Ipogea Associati – Torino
ipogea.ass@gmail.com

Lecco, 16/3/2017

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL TERREMOTO: EFFETTI E GENESI

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

2/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL RISCHIO

$R = \text{Probabilità} \times \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$

INCIDENTE STRADALE



P = probabilità che avvenga l'incidente
V = struttura dell'auto più/meno resistente
E = numero di persone nell'abitacolo

CROLLO DI UN EDIFICIO



P = probabilità che avvenga un terremoto, un incendio ecc
V = la struttura è più o meno resistente
E = persone, beni ecc coinvolti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

3/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL RISCHIO SISMICO

RISCHIO SISMICO → *Indicatore che permette di valutare l'interazione tra il terremoto, le strutture e i beni/le vite esposte*

$R = P \times V \times E$

P = PERICOLOSITA' SISMICA
probabilità che, in una data area e in un certo intervallo di tempo, si verifichi un terremoto che superi una soglia (di intensità, magnitudo o accelerazione di picco) fissata (sismicità del sito).

V = VULNERABILITA'
predisposizione di una costruzione a subire danneggiamenti e crolli.

E = ESPOSIZIONE
possibilità di danno più o meno elevato in termini economici, di perdita di vite umane e di beni architettonici e culturali.

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

4/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

I TERREMOTI IN ITALIA DAL 1900 A OGGI

ANNO	LUOGO	MAGNITUDO	VITTIME
1908	Messina e Reggio Calabria	7,2	120000
1915	Avezzano (AQ)	7,0	33000
1930	Irpinia	6,5	1404
1976	Friuli	6,5	989
1980	Irpinia	6,5	2914
1990	Carlentini (CT)	5,7	17
1997	Umbria e Marche	6,4	11
2002	Molise	5,9	30
2009	L'Aquila	6,3	308
2012	Emilia	5,9	20
2016	Amatrice	5,3	247

Lecco, 16/3/2017

5/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

EFFETTI DEL TERREMOTO

Avezzano - Angolo di Piazza Castello e Via Roma

Avezzano (AQ) - 1915

30000 vittime

Lecco, 16/3/2017

7/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

EFFETTI DEL TERREMOTO

Friuli - 1976

976 vittime

Lecco, 16/3/2017

8/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

EFFETTI DEL TERREMOTO

San Giuliano di Puglia - 2002

308 vittime

Lecco, 16/3/2017

9/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

EFFETTI DEL TERREMOTO

Palazzo del Governo - L'Aquila *Chiesa di S. Margherita - L'Aquila*

Chiesa di S. Maria del Suffragio a L'Aquila - fasi della messa in sicurezza della cupola

L'Aquila - 2009
308 vittime

10/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

EFFETTI DEL TERREMOTO

Emilia - 2012
20 vittime

11/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

EFFETTI DEL TERREMOTO

Amatrice - 2016
247 vittime

12/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

IL TERREMOTO: COME NASCE E CHE EFFETTI HA

13/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

COME NASCE UN TERREMOTO

The world map shows major seismic zones: Oceano Pacifico, Oceano Indiano, Oceano Atlantico, and Oceano Artico. The cross-section of the Earth shows layers: crosta (cortex), manto (mantle), and nucleo (nucleus). The mantle is divided into rigido (rigid) and plastico (plastic) layers. The nucleus is divided into nucleo esterno (outer) and nucleo interno (inner). The radius of the Earth is 6,378 km (3,963 mi).

14/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

COME NASCE UN TERREMOTO

TERREMOTO = «TERRAE MOTUS»

Scuotimento del suolo più o meno prolungato (da pochi secondi ad alcuni minuti)

LESIONI **RIBALTAMENTI** **CROLLI**

The diagram shows a fault line (FAGLIA) with a scarp (SCARPATA DI FAGLIA) and a projection on the ground surface (Proiezione sulla superficie terrestre). The hypocenter (IPOCENTRO) is the point of origin of the earthquake. The effects are categorized into LESIONI (lesions), RIBALTAMENTI (ground tilting), and CROLLI (collapses).

PLACCHE
Scivolano/spingono le une lungo i fianchi delle altre

FAGLIE
Superfici di frattura

Rottura delle rocce per effetto di eccesso di tensioni

TERREMOTO

Da <http://www.toscanelia.it>

15/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

COME NASCE UN TERREMOTO

The top photograph is labeled "PRIMA" (before) and the bottom "DOPO" (after). The text indicates that the displacement of the rock mass can occur both on the surface and in depth.

Il fenomeno è determinato da una sequenza di rotture e scorrimenti in un tratto di faglia che può essere lungo da decine a centinaia di km.

16/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

LE ONDE SISMICHE

Possono essere classificate come:

ONDE DI VOLUME:
coinvolgono gli strati rocciosi in profondità

ONDE P (primarie, longitudinali, di compressione), viaggiano all'interno della terra con velocità elevatissime (6 km/sec ca.), vengono rilevate per prime

ONDE S (secondarie, trasversali, di taglio), più lente delle onde P, determinano l'innalzamento/abbassamento del terreno

ONDE DI SUPERFICIE:
si propagano sulla superficie della terra

LA VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DIPENDE DAL TIPO DI TERRENO

Terreno rigido: propagazione veloce
Terreno soffice: propagazione lenta

The diagrams show the propagation of different types of seismic waves: Compressional wave (longitudinal), Shear wave (transverse), and Surface waves (Love and Rayleigh waves).

17/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

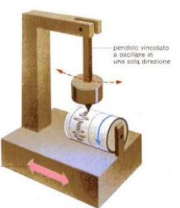
LA REGISTRAZIONE DELLE ONDE SISMICHE

STRUMENTI

SISMOGRAFO

Misura **le traslazioni** del terreno in tre direzioni (N-S, E-O, verticale)

Sensibile anche a terremoti di modesta entità



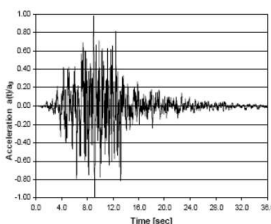
pendolo vincolato a oscillare in una sola direzione

componente del movimento orizzontale del suolo secondo la direzione di registrazione del pendolo

ACCELEROGRAFO

Misura **l'accelerazione** del terreno

Meno sensibile a terremoti di modesta entità



Accelerazione (m/s²)

Time [sec]

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

18/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

QUANTO E' «FORTE» UN TERREMOTO?

MAGNITUDO

RICHTER

Quantità di **energia** emessa durante il terremoto: scala **logaritmica** (fattore di amplificazione 10)

INTENSITA'

MERCALLI

Classificazione degli **effetti** del sisma su ambiente, cose, uomo

↓

SCALA MERCALLI

magnitudo:	intensità:		
2.8-3.1	III-IV	XXXX: LEGGERO	IX: MODERATO
3.2-3.4	IV	XXV: MODERATO	
3.5-3.7	IV-V	XXVI: MODERATO	V: ABBASTANZA FORTE
3.7-3.9	V		VII: ABBASTANZA FORTE
4.0-4.1	V-VI		VIII: FORTE
4.2-4.4	VI		IX: FORTE
4.5-4.6	VI-VII		X: MOLTO FORTE
4.7-4.9	VII		XI: MOLTO FORTE
5.0-5.1	VII-VIII		XXII: MOLTO FORTE
5.2-5.6	VIII		XXIII: ROVINOSO
5.7-6.1	IX		XXIV: ROVINOSO
≥6.2	X, XI		XXV: DISTRUTTIVO
			XXVI: TOTALMENTE DISTRUTTIVO
			XXVII: CATASTROFICO

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

19/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

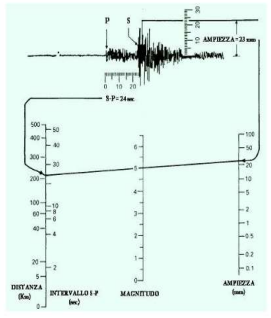
MISURA DELL'INTENSITA' DELL'AZIONE SISMICA

Necessità di una valutazione obiettiva dell'intensità di un terremoto...

Dall'analisi di un elevato numero di sismogrammi si rilevò che la traslazione massima del terreno, registrata a una certa distanza dall'epicentro, cresce proporzionalmente all'energia rilasciata dal terremoto.

Scala Richter (1934) basata sulla quantità di energia rilasciata (magnitudo)

Sostanzialmente si rileva l'ampiezza massima di certe onde sismiche ad una distanza di 100 Km dall'epicentro, per distanze diverse si adotta un apposito diagramma



Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

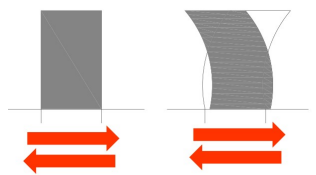
20/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

GLI EFFETTI DEL TERREMOTO

Le traslazioni orizzontali e verticali trasmesse dal terreno attraverso le fondazioni «caricano» l'edificio **di una certa quantità d'energia**, che va **dissipata** con spostamenti e conseguenti deformazioni ma senza che l'edificio crolli.



Il modo con cui si muove un edificio dipende dalle:

- **configurazione in pianta ed elevazione**
- **rigidezza/duttilità degli elementi strutturali (fondazioni, setti, pilastri, travi) - nella prima fase, anche degli elementi non strutturali (muri, tramezzi ecc).**

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

21/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

LA SISMICITA' IN ITALIA

La classificazione del territorio segue, non precede i terremoti!

ZONA	a_g
1	0,35g
2	0,25g
3	0,15g
4	0,05g

a_g = massima accelerazione su suolo rigido (g = «ground»)

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

22/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

AMPLIFICAZIONE DELL'AZIONE SISMICA

*Le onde sismiche, che si propagano nello strato più superficiale della crosta terrestre, subiscono riflessioni e rifrazioni causate dalle eterogeneità di quest'ultima. Ne deriva una modifica della risposta sismica che può portare a una **amplificazione locale dell'accelerazione**.*

Amplificazione sismica locale dell'accelerazione orizzontale del terreno di un terremoto debole nei depositi argillosi superficiali a Città del Messico, misurata strumentalmente da sensori in superficie e in pozzo a diverse profondità.

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

23/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

MAPPA DI PERICOLOSITA' SISMICA - REGIONE LOMBARDIA

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale
(Riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2008 n.3619, All.10)
espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ($V_{s0} > 800$ m/s; cat.A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005)

MACROZONE (2006)

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

24/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

MAPPA DI PERICOLOSITA' SISMICA - REGIONE LOMBARDIA

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Valori di pericolosità sismica del territorio nazionale
(Riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2008 n.3619, All.10)
espressi in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ($V_{s0} > 800$ m/s; cat.A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005)

Fonte: MPS04
Griglia: 0,05"

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

25/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

CLASSIFICAZIONE REGIONE LOMBARDIA

DGR 2129 11/07/2014
in vigore dal 10 aprile 2016

2014

*Per i comuni in zona sismica 2 (alta sismicità):
obbligo dell'autorizzazione preventiva all'avvio dei lavori
(anche per gli edifici strategici)*

*Per i comuni in zona 3 e 4 (sismicità bassa e molto bassa):
obbligo del deposito della documentazione relativa al progetto
prima dell'avvio dei lavori
(tranne che per gli edifici strategici)*

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 26/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

D.G.R. 5001 del 30/03/2016

Regione Lombardia **MODULO 12**

Relazione illustrativa e scheda sintetica dell'intervento
(L.R. 12 ottobre 2015, n. 33)

Valutazione dell'azione sismica

Tipo di opera: 1-opere provvisorie ($V_N \leq 10$) 2-opere ordinarie ($V_N \geq 50$) 3-grandi opere ($V_N \geq 100$)

6.1. Vita nominale:

6.2. Classe d'uso:

6.3. Categoria del sottosuolo e amplificazione stratigrafica adottate:

6.4. Categoria topografica e amplificazione topografica adottate:

6.5. Trascurabilità delle non linearità geometriche: SI NO

(valore fattore teta):

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 27/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

VITE «NOMINALE» E «DI RIFERIMENTO» NTC 2008 cap. II

VITA NOMINALE V_N → durata di vita *convenzionale*, serve per fissare le azioni massime previste e i dettagli costruttivi

VITA DI RIFERIMENTO V_R → Per le sole strutture in zona sismica la vita V_N viene trasformata in «Vita di Riferimento» V_R che individua il periodo di ritorno T_R (= l'intensità) dell'azione sismica

Tabella 2.4.I – Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE	Vita Nominale V_N (in anni)
1 Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2 Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3 Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 28/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

CLASSI D'USO NTC 2008

Classe d'uso	Tipi	C_u
I	Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.	0,7
II	Costruzioni il cui uso prevede normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali e reti viarie non ricadenti nelle Classi III o IV. Reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.	1,0
III	Costruzioni il cui uso prevede affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti nella Classe IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.	1,5
IV	Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla operatività della Protezione Civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, secondo il D.M. 6792 del 5/11/2001 - "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" - e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e di impianti di produzione dell'energia elettrica.	2,0

$V_R = V_N \times C_u \geq 35$ ANNI

VITA NOMINALE V_N	VALORI DI V_R			
	CLASSE D'USO			
	I	II	III	IV
≤ 10	35	35	35	35
≥ 50	≥ 35	≥ 50	≥ 75	≥ 100
≥ 100	≥ 70	≥ 100	≥ 150	≥ 200

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 29/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

L'INTERAZIONE TERREMOTO - EDIFICIO



<<PERIODO T IN SECONDI >>

30/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

L'INTERAZIONE TERREMOTO - EDIFICIO



DIPENDE DAL <<PERIODO PROPRIO>> T DELLA COSTRUZIONE (SEC)

31/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

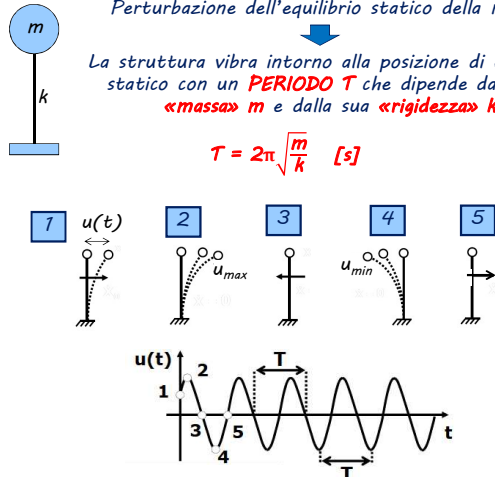
Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

IL PERIODO DELL'OSCILLATORE SEMPLICE

Perturbazione dell'equilibrio statico della massa

La struttura vibra intorno alla posizione di equilibrio statico con un **PERIODO T** che dipende dalla sua «massa» m e dalla sua «rigidezza» k

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ [s]}$$


32/104

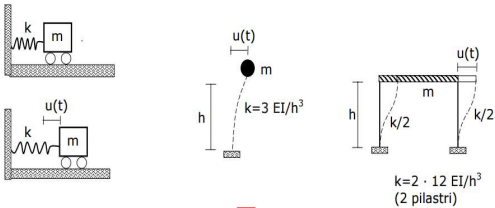
LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

OSCILLATORE SEMPLICE: LA RIGIDEZZA



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ [s]}$$

Struttura molto rigida,
 $k \rightarrow$ alto, $T \rightarrow$ basso (pochi decimi di secondo)

Struttura poco rigida,
 $k \rightarrow$ basso, $T \rightarrow$ alto (nell'ordine del secondo)

Nelle strutture civili il periodo proprio T è dell'ordine di $0.5 \div 2$ secondi

33/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL PERIODO PROPRIO DI UN EDIFICIO



$T_1 = C_1 H^{0,75}$

0,075 telai
0,050 pareti

H (m) altezza della parte d'edificio libera di oscillare

Edificio in ca a telai H = 10 m $T_1 = 0,075 \times 10^{0,75} = 0,42$ s
H = 30 m $T_1 = 0,075 \times 30^{0,75} = 0,96$ s

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

34/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

STIMA DEL PERIODO

$T_1 = C_1 H^{0,75}$

= 0,075 telai
= 0,050 pareti

H in metri, altezza della parte di edificio libera di oscillare

Edificio a telai H = 10 m $T_1 = 0,075 \times 10^{0,75} = 0,42$ s
Edificio a telai H = 30 m $T_1 = 0,075 \times 30^{0,75} = 0,96$ s

Rapporto di Rayleigh

$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_i m_i \delta_i^2}{\sum_i F_i \delta_i}}$

Distribuzione delle forze proporzionale al P modo di vibrare

$F_i = F_b \frac{z_i m_i}{\sum_i z_i m_i}$ **FORZA SISMICA all'i-esimo piano applicata nel B/M**

$F_b = S_d(T_1) \lambda \frac{\sum_i m_i}{g}$

$S_d(T_1) \leq 0,07g$

$\lambda = 1$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

35/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

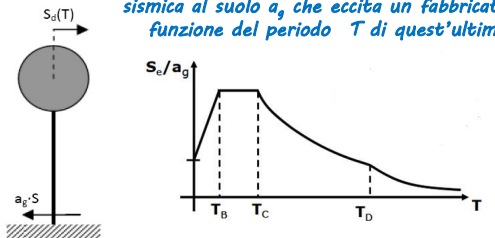
LO SPETTRO $S_e(T)$ DELL'OSCILLATORE SEMPLICE

Conoscere le **massime sollecitazioni**, dunque le **massime deformazioni**

Spostamento massimo u_{max}

Accelerazione massima $S_e(T)$

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO in accelerazione: identifica la frazione di accelerazione sismica al suolo a_g che eccita un fabbricato in funzione del periodo T di quest'ultimo



Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

36/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

STIMA DELL'AZIONE SISMICA

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

37/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

L'AZIONE SISMICA - NTC 2008

3.2 AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

$a_g, F_0, T_c^* = f(P_{VR})$

a_g = accelerazione massima al suolo
 F_0 = fattore di amplificazione dello spettro
 T_c^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro
 P_{VR} = probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 38/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

GLI SPETTRI DI RISPOSTA

INTRO

D.M. 14 gennaio 2008 - Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

Spettri di risposta ver. 1.0.3

Il documento Excel SPETTRI-NTC fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale. La definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in 3 fasi, ciascuna delle quali prevede la scelta dei valori di alcuni parametri da parte dell'utente:

FASE 1. Individuazione della pericolosità del sito (sulla base dei risultati del progetto S1 - INGV);
 FASE 2. Scelta della strategia di progettazione;
 FASE 3. Determinazione dell'azione di progetto.

La schermata relativa a ciascuna fase è suddivisa in sotto-schermate: l'utente può intervenire nelle sotto-schermate con sfondo grigio scuro mentre quelle con sfondo grigio chiaro consentono un immediato controllo grafico delle scelte effettuate. In ogni singola fase l'utente può visualizzare e stampare i risultati delle elaborazioni -in forma sia grafica che numerica- nonché i relativi riferimenti alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008 pubblicate nella G.U. n.29 del 04.02.2008 Suppl. Ord. n.30 e scaricabili dal sito www.cslp.it

Programma ottimizzato per una visualizzazione schermo 1024 x 768

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

INTRO FASE 1 FASE 2 FASE 3

SITO DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI:
http://cslp.mit.gov.it/index.php?option=com_content&task=view&id=75&Itemid=20

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 39/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

GLI SPETTRI DI RISPOSTA

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

LONGITUDINE: 8.82638 LATITUDINE: 45.81760

REGIONE: Lombardia PROVINCIA: Varese COMUNE: Varese

Elaborazioni grafiche: Grafici spettri di risposta, Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche: Tabella parametri

Modi del reticolo intorno al sito: km7.5, -7.5, 7.5 km

Controllo sul reticolo: sito esterno al reticolo, interpolazione su 3 nodi, interpolazione corretta

Interpolazione: superficie rigata

La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO FASE 1 FASE 2 FASE 3

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 40/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

GLI SPETTRI DI RISPOSTA

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) - V_d : 50

Coefficiente d'uso della costruzione - c_u : 1

Valori di progetto: Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) - V_d : 50

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) - T_R : 30

Stati limite di esercizio - SLE: SLO - $P_{VR} = 81\%$, SLD - $P_{VR} = 63\%$, SLV - $P_{VR} = 10\%$

Stati limite ultimi - SLU: SLC - $P_{VR} = 5\%$

Strategia di progettazione: Grafici parametri azione, Grafici spettri di risposta, Tabella parametri azione

LEGENDA GRAFICO: ---□--- Strategia per costruzioni ordinarie, ---■--- Strategia scelta

10000
1000
100
10
T_R [anni]

SLO SLD SLV SLC

INTRO FASE 1 FASE 2 FASE 3

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 41/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

GLI SPETTRI DI RISPOSTA

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite considerato: SLV

Risposta sismica locale:
 Categoria di sottosuolo: C
 Categoria topografica: T1
 $S_a = 1.500$
 $C_c = 1.603$
 $h/H = 0.000$
 $S_r = 1.000$

Compon. orizzontale:
 Spettro di progetto elastico (SLE)
 Smorzamento ξ (%): 5
 $\eta_1 = 1.000$
 Spettro di progetto inelastico (SLU)
 Fattore q_b : 3.9
 Regol. in altezza: si

Compon. verticale:
 Spettro di progetto
 Fattore q : 1.5
 $\eta_1 = 0.667$

Elaborazioni:
 Grafici spettri di risposta
 Parametri e punti spettri di risposta

Spettri di risposta:
 $S_{v,0}$ [g]
 $S_{v,0.05}$ [g]
 S_v [g]
 S_d [g]

INTRO FASE 1 FASE 2 **FASE 3**

Lecco, 16/3/2017 42/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

GLI SPETTRI DI RISPOSTA

Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite SLV

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_g	0.038 g
F_g	2.000
T_C	0.278 s
S_a	1.500
C_c	1.603
S_r	1.000
q	3.900

Parametri dipendenti

S	1.500
η	0.256
T_B	0.148 s
T_C	0.445 s
T_D	1.753 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$S = S_a \cdot S_r$ (NTC-08 Eq. 3.2.5)
 $\eta = \sqrt{10/(3+\xi)} \geq 0.55$, $\eta = 1/q$ (NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5)
 $T_B = T_C/3$ (NTC-07 Eq. 3.2.8)
 $T_C = C_c \cdot T_C^*$ (NTC-07 Eq. 3.2.7)
 $T_D = 4 \cdot 0 \cdot a_g / g + 1.6$ (NTC-07 Eq. 3.2.9)

Punti dello spettro di risposta

T [s]	$a_g S$
0.000	0.057
0.148	0.039
0.278	0.034
0.445	0.030
0.507	0.027
0.570	0.025
0.632	0.023
0.694	0.022
0.756	0.021
0.819	0.020
0.881	0.019
0.943	0.018
1.005	0.017
1.068	0.016
1.130	0.015
1.192	0.014
1.255	0.014
1.317	0.013
1.379	0.012
1.441	0.012
1.504	0.011
1.566	0.011
1.628	0.011
1.691	0.010
1.753	0.010
1.860	0.009

Lecco, 16/3/2017 43/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

STATI LIMITE - NTC 2008

7.1 REQUISITI NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE

Sotto l'effetto delle azioni sismiche definite nel § 3.2, deve essere garantito il rispetto degli stati limite ultimi e di esercizio, quali definiti al § 3.2.1 ed individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo il volume significativo di terreno, le strutture di fondazione, gli elementi strutturali, gli elementi non strutturali, gli impianti.

In mancanza di espresse indicazioni in merito, il rispetto dei vari stati limite si considera conseguito:

- nei confronti di tutti gli stati limite di esercizio, qualora siano rispettate le verifiche relative al solo SLD;
- nei confronti di tutti gli stati limite ultimi, qualora siano rispettate le indicazioni progettuali e costruttive riportate nel seguito e siano soddisfatte le verifiche relative al solo SLV.

Fanno eccezione a quanto detto le costruzioni di classe d'uso III e IV, per gli elementi non strutturali e gli impianti delle quali è richiesto anche il rispetto delle verifiche di sicurezza relative allo SLO, quali precisate nei §§ 7.3.7.2 e 7.3.7.3.

Lecco, 16/3/2017 44/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

D.G.R. 5001 del 30/03/2016

Regione Lombardia **MODULO 12**

Relazione illustrativa e scheda sintetica dell'intervento
 (L.R. 12 ottobre 2015, n. 33)

7. Criteri di modellazione e di calcolo

7.1. Classe di duttilità: A B NESSUNA

7.2. Regolarità in pianta: SI NO

7.3. Regolarità in elevazione: SI NO

7.10. Fattore di struttura adottato:

Riferimento normativo p.to:

7.11. a_U/a_1 :

K_w :

Lecco, 16/3/2017 45/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL FATTORE DI STRUTTURA q

Concetto di equal spostamento

La struttura deve poter raggiungere lo spostamento indotto dal sisma senza collassare.

Allo SLU può «attingere alle sue riserve plastiche»

Si ottiene lo spostamento d_{max} con una forza F_{y*} minore di quella elastica F_e^*

$$\frac{F_{y*}}{F_e^*} = \frac{d_{max*}}{d_{y*}} = q$$

Agli SL gli spettri sono a «duttilità assegnata»

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

46/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

CLASSI DI DUTTILITA' - NTC 2008

Nel caso la struttura abbia comportamento strutturale dissipativo, si distinguono **due livelli di Capacità Dissipativa** o Classi di Duttilità (CD):

- Classe di duttilità **alta** (CD“A”);
- Classe di duttilità **bassa** (CD“B”).

La differenza tra le due classi risiede nella **entità delle plasticizzazioni** cui ci si riconduce in fase di progettazione: **per ambedue le classi**, onde assicurare alla struttura un comportamento dissipativo e duttile evitando rotture fragili e la formazione di meccanismi instabili imprevisi, si fa ricorso ai procedimenti tipici della **gerarchia delle resistenze**.

CD “A” maggior controllo e sensibilità della struttura
oneri di calcolo, dettagli costruttivi

CD “B” minori oneri di calcolo, dettagli costruttivi più semplici
minor controllo della struttura

Gerarchia delle resistenze

protezione dei meccanismi fragili per permettere lo sviluppo dei soli meccanismi di collasso duttili

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

47/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL FATTORE DI STRUTTURA q

Classificazione delle strutture in c.a. sismo-resistenti

A TELAIO → se ai telai è prevalentemente affidata la capacità portante dei carichi verticali e almeno il 65% delle azioni orizzontali

A PARETI → se buona parte delle azioni verticali e almeno il 65% di quelle orizzontali è sopportata da pareti o setti

MISTE TELAIO E PARETI → intermedie tra le prime due, possono essere equivalenti a pareti, se le pareti assorbono più del 50% dell'azione orizzontale, altrimenti sono equivalenti a telai

$q = k_R \cdot k_W \cdot q_0$

= 1 strutture a telaio o equivalenti a telaio

= 0,80 strutture non regolari in altezza
= 1 strutture regolari in altezza

Dipende dal tipo di struttura e dal materiale di costruzione

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

48/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL FATTORE DI STRUTTURA q

$q = k_R \cdot k_W \cdot q_0$

$q = 1 \cdot 1 \cdot (3 \cdot 1,3) = 3,9$ **CD «B»**
Struttura a telaio

$q = 1 \cdot 1 \cdot (3 \cdot 1,2) = 3,6$ **Strutture equivalenti a pareti**

Tipologia	CD“B”	CD“A”
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	$3,0 \alpha_w / \alpha_1$	$4,5 \alpha_w / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	3,0	$4,0 \alpha_w / \alpha_1$
Strutture deformabili torsionalmente	2,0	3,0
Strutture a pendolo inverso	1,5	2,0

a) Strutture a telaio o miste equivalenti a telai

- strutture a telaio di un piano $\alpha_w / \alpha_1 = 1,1$
- strutture a telaio con più piani ed una sola campata $\alpha_w / \alpha_1 = 1,2$
- strutture a telaio con più piani e più campate $\alpha_w / \alpha_1 = 1,3$

b) Strutture a pareti o miste equivalenti a pareti

- strutture con solo due pareti non accoppiate per direzione orizzontale $\alpha_w / \alpha_1 = 1,0$
- altre strutture a pareti non accoppiate $\alpha_w / \alpha_1 = 1,1$
- strutture a pareti accoppiate o miste equivalenti a pareti $\alpha_w / \alpha_1 = 1,2$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

49/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- Regolarità strutturale
- Azione sismica
- Edifici esistenti

DISTRIBUZIONE DELLA FORZA SISMICA

Combinazione quasi permanente

$$G_1 + G_2 + P + \Psi_{21} Q_{k1} + \Psi_{22} Q_{k2} + \Psi_{23} Q_{k3} + \dots$$

Tabella 2.5.1 – Valori dei coefficienti di combinazione

Categoria/Azione variabile	Ψ_{01}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

CALCOLO DEI CARICHI RELATIVI AGLI I-ESIMI PIANI

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

50/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

LA REGOLARITA' STRUTTURALE

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

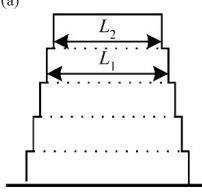
Lecco, 16/3/2017

51/104

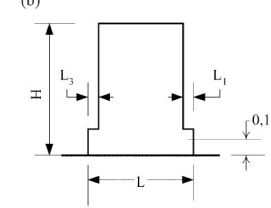
LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

REGOLARITA' IN ALTEZZA

(a) 

criterio per (a): $\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,20$

(b) 

criterio per (b): $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,20$

- *Tutti i sistemi resistenti si devono sviluppare senza interruzioni dalle fondazioni fino alla sommità dell'edificio*
- *Rigidità laterale e massa dei singoli piani costanti o gradualmente ridotte dalla base alla sommità dell'edificio*
- *Evitare qualsiasi iperesistenza = rapporto tra la resistenza effettiva di un piano e quella richiesta dall'analisi $\gg 1$*

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

52/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

REGOLARITA' IN ALTEZZA



Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

53/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

REGOLARITA' IN ALTEZZA: IL «PIANO DEBOLE»




Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

54/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

REGOLARITA' IN ALTEZZA: IL «PIANO DEBOLE»




Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

55/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

REGOLARITA' IN ALTEZZA: IL «PIANO DEBOLE»



A - Single Story Mechanism B - Full Beam Yield Mechanism C - Partial Beam Yield Mechanism



Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

56/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

SEMPLIFICAZIONI (PER GLI INGEGNERI!)

REGOLARITA' GEOMETRICA		SEMPLIFICAZIONI	
PIANTA	ALTEZZA	MODELLO	ANALISI
Si	Si	Bidimensionale	Statica lineare
Si	No	Bidimensionale	Dinamica modale
No	Si	Tridimensionale	Statica lineare
No	No	Tridimensionale	Dinamica modale

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

57/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

LA «GERARCHIA DELLE RESISTENZE»

SI PREFERISCE CHE SI DANNEGGINO LE TRAVI, NON I PILASTRI E I NODI

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

58/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

LA «GERARCHIA DELLE RESISTENZE»

Rottura del nodo esterno
↓
Trave forte e pilastro debole

Kocaeli - Turchia (1999)

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

59/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

ELEMENTI SECONDARI

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

60/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

GLI EFFETTI DEI CEDIMENTI FONDALI

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

61/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL «MARTELLAMENTO»



Kocaeli - Turchia (1999)

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

63/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL FENOMENO DEL MARTELLAMENTO



SISMA → STRUTTURE ADERENTI che oscillano in controfase → **MARTELLAMENTO**

GIUNTO STRUTTURALE NTC 2008

Distanza tra costruzioni contigue

La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare fenomeni di martellamento e comunque non può essere inferiore alla somma degli spostamenti massimi determinati per lo SLI, calcolati per ciascuna costruzione secondo il § 7.3.3 (analisi lineare) o il § 7.3.4 (analisi non lineare); in ogni caso la distanza tra due punti che si fronteggiano non può essere inferiore ad 1/100 della quota dei punti considerati misurata dal piano di fondazione, moltiplicata per $a_g \cdot S \cdot 0,5g \leq 1$. Qualora non si eseguano calcoli specifici, lo spostamento massimo di una costruzione non isolata alla base, può essere stimato in 1/100 dell'altezza della costruzione moltiplicata per $a_g \cdot S \cdot 0,5g$

$a_g \cdot S = 0,37g$ $H=15$ m $\Delta = 2(0,37/0,5) \cdot 15 \times 100/100 = 15$ cm

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

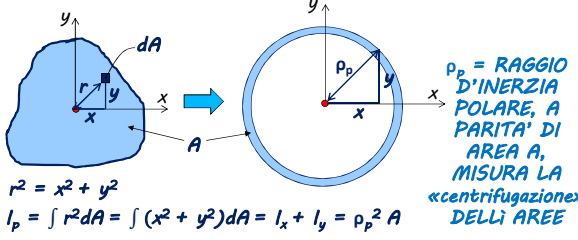
Lecco, 16/3/2017

64/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

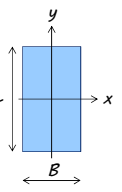
MOMENTO D'INERZIA POLARE I_p



$r^2 = x^2 + y^2$
 $I_p = \int r^2 dA = \int (x^2 + y^2) dA = I_x + I_y = \rho_p^2 A$

$\rho_p =$ RAGGIO D'INERZIA POLARE, A PARITA' DI AREA A, MISURA LA «centrifugazione» DELL'AREE

ESEMPIO



$I_x = \frac{BL^3}{12}$ $I_y = \frac{LB^3}{12}$ $A = L \times B$

$I_p = I_x + I_y = \frac{BL^3}{12} + \frac{LB^3}{12} = \frac{1}{12} A (L^2 + B^2)$

$\rho_p^2 = \frac{I_p}{A} = \frac{L^2 + B^2}{12}$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

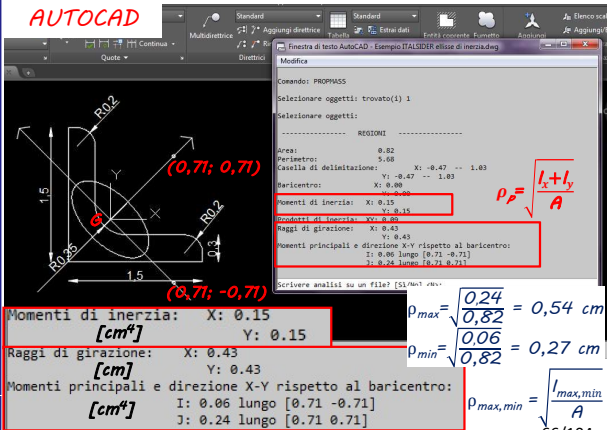
65/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

LE PROPRIETA' GEOMETRICHE IN AUTOCAD

Polilinea → comando: REGIONE → comando: PROPMASS



Momenti di inerzia: X: 0.15 [cm⁴] Y: 0.15

Raggi di girazione: X: 0.43 [cm] Y: 0.43

Momenti principali e direzione X-Y rispetto al baricentro: I: 0.06 lungo [0.71 -0.71] J: 0.24 lungo [0.71 0.71]

$\rho_{max} = \sqrt{\frac{0.24}{0.82}} = 0,54$ cm

$\rho_{min} = \sqrt{\frac{0.06}{0,82}} = 0,27$ cm

$\rho_{max, min} = \sqrt{\frac{I_{max, min}}{A}}$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

66/104

LEZIONE 4

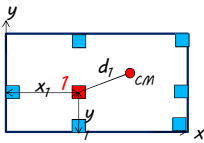
- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL BARICENTRO DELLE MASSE CM

PIANO TERRENO DI UN EDIFICIO CON «i» PILASTRI DI COORDINATE (x_i, y_i) CARICATI DA FORZE ASSIALI N_i

RISULTANTE DELLE FORZE SUI PILASTRI: $N = \sum N_i$

COORDINATE DEL BARICENTRO DELLE MASSE «CM» RISPETTO ALL'ORIGINE:

$$x_{cm} = \frac{\sum N_i x_i}{N} \quad y_{cm} = \frac{\sum N_i y_i}{N}$$


RAGGIO POLARE DELLE MASSE I_s

$$I_s = \sqrt{\frac{\sum N_i d_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum N_i [(x_i - x_{cm})^2 + (y_i - y_{cm})^2]}{N}}$$

PER UN IMPALCATO RETTANGOLARE (LxB) CARICATO UNIFORMEMENTE

$$I_s = \sqrt{\frac{L^2 + B^2}{12}} = \sqrt{\rho_p^2} = \rho_p$$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

67/104

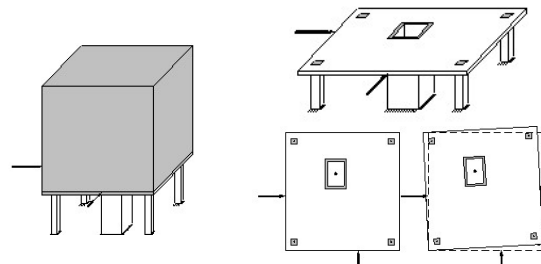
LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Piano infinitamente rigido

Collega le estremità superiori degli elementi verticali

TUTTI gli elementi verticali si spostano insieme al solaio con un moto rigido



Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

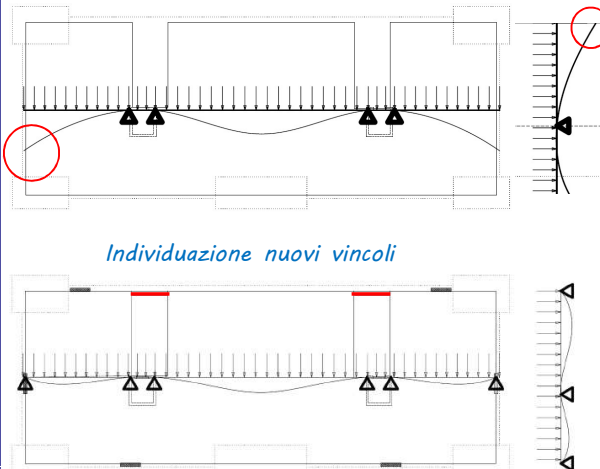
Lecco, 16/3/2017

68/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL MODELLO DI PIANO RIGIDO



Individuazione nuovi vincoli

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

69/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

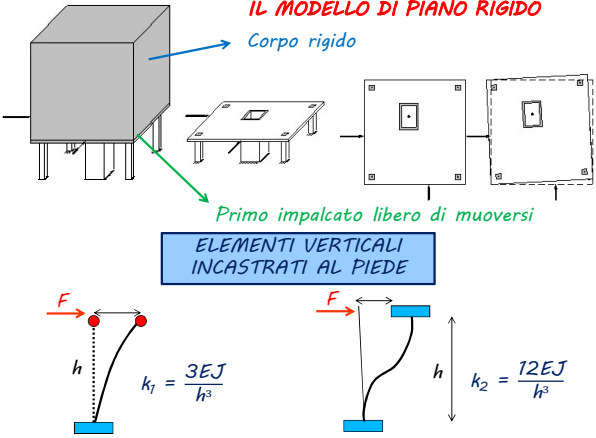
BARICENTRO DELLE RIGIDENZE CR

IL MODELLO DI PIANO RIGIDO

Corpo rigido

Primo impalcato libero di muoversi

ELEMENTI VERTICALI INCASTRATI AL PIEDE



$k_1 = \frac{3EJ}{h^3}$

$k_2 = \frac{12EJ}{h^3}$

Rigidità $K =$ forza F per ottenere uno spostamento $\delta = 1$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

70/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

II BARICENTRO DELLE RIGIDENZE CR

Rigidezza $K =$ forza F per ottenere uno spostamento δ

Piano rigido

Spostamento δ_y in y :
 $R_1 = k_1 \delta_y$ $R_2 = k_2 \delta_y$

Spostamento δ_x in x :
 $R_3 = k_3 \delta_x$ $R_4 = k_4 \delta_x$

Applicando il teorema di Varignon

\downarrow $R_{12} = R_1 + R_2 \Rightarrow R_{12} = k_1 \delta_y + k_2 \delta_y = (k_1 + k_2) \delta_y = K_y \delta_y$

○) $R_1 x_1 + R_2 x_2 = R_{12} x_{CR}$
 $x_{CR} = \frac{R_1 x_1 + R_2 x_2}{R_{12}} = \frac{(k_1 x_1 + k_2 x_2) \delta_y}{(k_1 + k_2) \delta_y} = \frac{\sum k_{yi} x_i}{\sum k_{yi}} = \frac{\sum k_{yi} x_i}{K_y}$

\leftarrow $R_{34} = R_3 + R_4 \Rightarrow R_{34} = k_3 \delta_x + k_4 \delta_x = (k_3 + k_4) \delta_x = K_x \delta_x$

○) $R_3 y_3 + R_4 y_4 = R_{34} y_{CR}$
 $y_{CR} = \frac{R_3 y_3 + R_4 y_4}{R_{34}} = \frac{(k_3 y_3 + k_4 y_4) \delta_x}{(k_3 + k_4) \delta_x} = \frac{\sum k_{xi} y_i}{\sum k_{xi}} = \frac{\sum k_{xi} y_i}{K_x}$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

72/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

BARICENTRO DELLE RIGIDENZE CR

E' IL BARICENTRO DELLE «FORZE REATTIVE», COSI' COME IL BARICENTRO DELLE MASSE CM E' IL BARICENTRO DELLE «FORZE ATTIVE»

baricentro delle masse e delle rigidzze
 baricentro delle rigidzze
 baricentro delle masse
 torsione
 SOLO TRASLAZIONE
 muro di taglio asimmetrico
 TRASLAZIONE E ROTAZIONE

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

73/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

D.G.R. 5001 del 30/03/2016

Regione Lombardia **MODULO 12**

Relazione illustrativa e scheda sintetica dell'intervento
 (L.R. 12 ottobre 2015, n. 33)

7.8. Rigidezza impalcati di piano: infinitamente rigidi SI NO

7.9. Rigidezza impalcati di copertura: infinitamente rigidi SI NO

Piano infinitamente rigido

Collega le estremità superiori degli elementi verticali

Gli elementi verticali si spostano TUTTI insieme al solaio

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

74/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

IL MODELLO DI PIANO RIGIDO

$u_0 =$ spostamento lungo x
 $v_0 =$ spostamento lungo y
 $\theta =$ rotazione molto piccola $\Rightarrow \cos \theta = 1$ $\text{tg } \theta = \text{sen } \theta = \theta$

$u_i = u_0 + \Delta x_i = u_0 - \theta y_i$ $\Rightarrow F_{xi} = k_{xi} u_i = k_{xi} (u_0 - \theta y_i)$
 $v_i = v_0 + \Delta y_i = v_0 + \theta x_i$ $\Rightarrow F_{yi} = k_{yi} v_i = k_{yi} (v_0 + \theta x_i)$
 $\theta =$ rotazione $\Rightarrow M_{Ti} = k_{T,i} \theta$

Rigidezza torsionale propria

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

75/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

LE RISULTANTI DELLE FORZE «REATTIVE»

Risultanti a traslazione nelle direzioni x,y

1) $\sum F_{xi} = \sum k_{xi} u_i$
 2) $\sum F_{yi} = \sum k_{yi} v_i$

$u_i = u_0 - \theta y_i$
 $v_i = v_0 + \theta x_i$

Come si calcolano u_0 v_0 e θ ?

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 76/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

I PARAMETRI DELLO SPOSTAMENTO DI PIANO

Imponendo l'equilibrio tra le forze reattive e una forza di componenti X e Y agente nel baricentro delle masse CM dopo aver trasportato tutte le forze nel baricentro delle rigidzze CR, si ottiene un sistema di 3 equazioni nelle 3 incognite u_0, v_0, θ la cui soluzione fornisce

$\sum F_{xi} = \sum k_{xi} u_i = X$ $u_i = u_0 - \theta y_i$
 $\sum F_{yi} = \sum k_{yi} v_i = Y$ $v_i = v_0 + \theta x_i$

$\sum F_{xi} y_i + \sum F_{yi} x_i + \sum M_{Ti} = \sum k_{xi} u_i y_i + \sum k_{yi} v_i x_i + \sum k_{\theta,i} \theta = M$

↓

$X = (\sum k_{xi}) u_0 - (\sum k_{xi} y_i) \theta$
 $Y = (\sum k_{yi}) v_0 + (\sum k_{yi} x_i) \theta$
 $M = (\sum k_{yi} y_i) u_0 + (\sum k_{xi} x_i) v_0 + (\sum k_{xi} x_i^2 + \sum k_{yi} y_i^2 + \sum k_{\theta,i}) \theta$

$K_x = \sum k_{xi}$ $K_y = \sum k_{yi}$ $K_T = \sum k_{yi} x_i^2 + \sum k_{xi} y_i^2 + \sum k_{\theta,i}$

Rigidzza torsionale

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 77/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

I PARAMETRI DELLO SPOSTAMENTO DI PIANO

Imponendo l'equilibrio tra la risultante delle «forze reattive» e quella delle forze attive (= le masse) di componenti X e Y trasportata dal baricentro CM nel baricentro delle rigidzze CR con un momento di trasporto M, si ottengono tre relazioni che forniscono gli spostamenti di piano

$u_0 = \frac{X}{K_x}$ $K_x = \sum k_{xi}$
 $v_0 = \frac{Y}{K_y}$ $K_y = \sum k_{yi}$
 $\theta = \frac{M}{K_T}$ $K_T = \sum k_{yi} (x_i - x_{CR})^2 + \sum k_{xi} (y_i - y_{CR})^2 + \sum k_{\theta,i}$

K_T è la «rigidzza torsionale» totale

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 78/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

ORIGINE NEL BARICENTRO DELLE RIGIDZZE CR

Note le componenti u_0, v_0 e θ dello spostamento rigido di piano, ricordando che gli spostamenti nelle direzioni x e y dei singoli elementi valgono nel nuovo sistema di riferimento in CR

$u_i = u_0 - \theta y_i$ $v_i = v_0 + \theta x_i$

le forze che agiscono sui singoli elementi sono

$F_{xi} = k_{xi} u_i = k_{xi} (u_0 - \theta y_i) = X \frac{k_{xi}}{K_x} - \frac{M}{K_T} \frac{k_{xi} y_i}{K_T}$
 $F_{yi} = k_{yi} v_i = k_{yi} (v_0 + \theta x_i) = Y \frac{k_{yi}}{K_y} + \frac{M}{K_T} \frac{k_{yi} x_i}{K_T}$
 $M_{Ti} = \frac{k_{\theta,i}}{K_T} \theta$

$\frac{k_{xi}}{K_T} y_i = \frac{k_{xi}}{K_T} y_i \frac{K_x}{K_x} = \frac{k_{xi}}{K_x} y_i \frac{K_x}{K_T} = \frac{k_{xi}}{K_x} y_i \frac{1}{r_x^2}$ $r_x^2 = \frac{K_T}{K_x}$
 $\frac{k_{yi}}{K_T} x_i = \frac{k_{yi}}{K_T} x_i \frac{K_y}{K_y} = \frac{k_{yi}}{K_y} x_i \frac{K_y}{K_T} = \frac{k_{yi}}{K_y} x_i \frac{1}{r_y^2}$ $r_y^2 = \frac{K_T}{K_y}$

RAGGI «TORSIONALI» $r_x = \sqrt{\frac{K_T}{K_x}}$ $r_y = \sqrt{\frac{K_T}{K_y}}$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017 79/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

«CENTRIFUGARE LE RIGIDEZZE»

$$F_{xi} = X \frac{k_{xi}}{K_x} - \frac{M k_{xi} y_i}{r_x^2 K_x} \rightarrow r_x = \sqrt{\frac{K_T}{K_x}}$$

$$F_{yi} = Y \frac{k_{yi}}{K_y} + \frac{M k_{yi} x_i}{r_y^2 K_y} \rightarrow r_y = \sqrt{\frac{K_T}{K_y}}$$

$$M_{Ti} = \frac{k_{xi} x_i}{K_T} \theta$$

$$K_T = \sum k_{yi} (x_i - x_{CR})^2 + \sum k_{xi} (y_i - y_{CR})^2 + \sum k_{b,i}$$

Per minimizzare gli spostamenti dovuti alla rotazione del piano occorre:

Ridurre l'eccentricità tra CM e CR = ridurre M

A parità di K_x, K_y aumentare $r_{x,y}$ (aumentare la rigidità torsionale K_T) posizionando gli elementi resistenti il più distante possibile da CR

Schema riassuntivo

↓ M

↑ K_T → ↑ $r_{x,y}$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

80/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

LE STRATEGIE IMPOSTE DA EC8 E NTC 2008

$$e_{0x} = |x_{CR} - x_{CM}|$$

$$e_{0y} = |y_{CR} - y_{CM}|$$

$$r_x = \sqrt{\frac{K_T}{K_x}}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{K_T}{K_y}}$$

STRUTTURA REGOLARE IN PIANTA:

$e_{0x} \leq 0,30 r_x$
 $e_{0y} \leq 0,30 r_y$ → • Avvicinare CR e CM
• K_x e K_y simili

STRUTTURA TORISIONALMENTE RIGIDA:

$r_x, r_y > 0,80 l_s$ → • K_T il più grande possibile

l_s è IL **RAGGIO POLARE DELLE MASSE**

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

81/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

L'«ELLISSE DELLE RIGIDEZZE» (Biasioli, 2008)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{x^2}{r_x^2} + \frac{y^2}{r_y^2} = 1$$

$$\frac{x^2}{K_T/K_y} + \frac{y^2}{K_T/K_x} = 1$$

$$\frac{a}{b} = \frac{r_x}{r_y} = \sqrt{\frac{K_x}{K_y}}$$

VISUALIZZA LA DISTRIBUZIONE DELLE RIGIDEZZE INTORNO A CR E' «ALLUNGATA» NELLA DIREZIONE DI MAGGIORE RIGIDEZZA A PARITÀ DI K_x, K_y «AUMENTA» SE AUMENTA K_T

Se $K_x = K_y$ → $r_x = r_y$ → l'ellisse è un cerchio

Struttura «insensibile» alla direzione del sisma

Regolarità in pianta

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

82/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

L'«ELLISSE DELLE RIGIDEZZE» (Biasioli, 2008)

TRACCIAMENTO DELL'ELLISSE

Geometria elementi

Posizione elementi

$\frac{e_{0x}}{r_x} \leq 0,30$
 $\frac{e_{0y}}{r_y} \leq 0,30$ → Ellisse entro la quale devono trovarsi BM e CR

$r_x, r_y > 0,80 l_s$ → $0,80 l_s$ = raggio del cerchio che individua la dimensione «minima» di ciascun semiasse (a,b) dell'ellisse

$$r_x = \sqrt{\frac{K_T}{K_x}} \quad r_y = \sqrt{\frac{K_T}{K_y}}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{r_x}{r_y} = \sqrt{\frac{K_x}{K_y}}$$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

83/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

L'«ELLISSE DELLE RIGIDEZZE» (Biasioli, 2008)

$r_x, r_y > 0,80L_s$ → quantità sufficiente di elementi
 $r_x > r_y$ → $K_y > K_x$
 Eccesso di rigidità nella direzione y
 $\frac{e_{0x}}{r_x} \geq 0,30$
 $\frac{e_{0y}}{r_y} \geq 0,30$ → BM e CM troppo lontani

ASSE ALLUNGATO = PREVALENZA DI RIGIDEZZA NELLA DIREZIONE DELL'ASSE

Diminuire la rigidità nella stessa direzione
 Aumentare la rigidità secondo la direzione ortogonale
 → **CERCHIO ($K_x = K_y$)**

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

84/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

L'«ELLISSE DELLE RIGIDEZZE» (Biasioli, 2008)

$$\frac{x^2}{r_x^2} + \frac{y^2}{r_y^2} = 1$$

$$\frac{x^2}{K_r/K_y} + \frac{y^2}{K_r/K_x} = 1$$

$$\frac{a}{b} = \frac{r_x}{r_y} = \sqrt{\frac{K_x}{K_y}}$$

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

85/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

L'ELLISSE DELLE RIGIDEZZE

Aule
 Scuola secondaria di primo grado
 Liscate (MI)
 3 piani fuori terra
 Struttura mista c.a. e legno
 Corpo polifunzionale

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

86/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

L'ELLISSE DELLE RIGIDEZZE

L'ellisse non tende a un cerchio
 «Eccesso» di rigidità in direzione x

L'ellisse tende a un cerchio
 Rotazione di 90° di due setti
 Aumento di K_y , riduzione di K_x

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

87/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

LA REGOLARITA' IN PIANTA

Effetti torsionali e concentrazione di sforzi

88/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

ANALISI CRITICA DELLA GEOMETRIA

REGOLARITA' IN PIANTA

89/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

ANALISI CRITICA DELLA GEOMETRIA

REGOLARITA' IN PIANTA

90/104

LEZIONE 4

- Terremoto
- **Regolarità strutturale**
- Azione sismica
- Edifici esistenti

Francesco BIASIOLI
Stefano ROSTAGNO

Lecco, 16/3/2017

CORSO DI AGGIORNAMENTO PROFESSIONALE

«PROGETTARE EDIFICI IN ZONA SISMICA»

PROGETTARE LE STRUTTURE IN ZONA SISMICA