

ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Macerata
Commissione Strutture e Geotecnica

ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI

Progettazione con isolatori a scorrimento a
superficie curva

Macerata, 15 gennaio 2021

Alberto Dusi

Numeria Consulting Engineers S.r.l. – Cremona, Italy

www.numeria-eng.it dusi@numeria-eng.it

1

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

- ❑ Modellazione lineare equivalente
- ❑ Esempio di progettazione
- ❑ Dettagli costruttivi in un edificio isolato e installazione degli isolatori
- ❑ Direzione lavori e collaudo di edifici isolati
- ❑ Costi

2

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

MODELLAZIONE LINEARE EQUIVALENTE

3

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

QUALCHE DOMANDA / ASPETTI DA CONSIDERARE

- ❖ L'edificio può essere efficacemente isolato?
Comportamento dinamico, sismicità, tipo di terreno, edifici limitrofi, ecc
- ❖ Scelta del posizionamento ottimale del sistema d'isolamento
a livello di fondazione o al primo livello. Implicazioni sul progetto architettonico e sui costi
- ❖ Come trattare le scale, gli ascensori, ecc
- ❖ Impianti: connessioni flessibili
- ❖ Protezione al fuoco
- ❖ Ispezionabilità, sostituibilità dei dispositivi
- ❖ Progettazione, produzione e procedure di accettazione e qualifica dei dispositivi

4

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA



Funzionamento riconducibile
a quello del pendolo

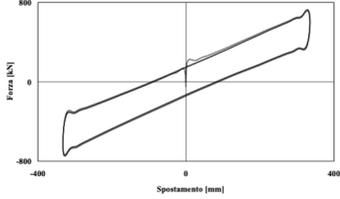
Con riferimento al comportamento nei confronti dei carichi verticali gli isolatori a scorrimento a superficie curva nascono come dispositivi di vincolo monolatero (solo compressione).
Di ciò si deve tener conto in fase di progettazione.

5

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA



I due fattori che caratterizzano la risposta dei singoli dispositivi, e quindi della sovrastruttura, sono il raggio di curvatura (legato alla geometria dell'isolatore) e le caratteristiche dell'attrito (governato dalla scelta del materiale) che si viene a creare tra la superficie di scorrimento e l'articolazione di movimento.

6



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA

Il legame costitutivo di questi dispositivi, con riferimento al comportamento nel piano orizzontale, è solitamente idealizzato come bilineare, in accordo allo schema riportato nella figura che segue, ed è definito dalla relazione:

$$F_{max} = F_0 + K_r \cdot d = \mu \cdot N_{sd} + \frac{N_{sd}}{R} \cdot d$$

- $F_0 = \mu N_{sd}$ = forza di attrito sviluppata dal dispositivo
- $K_e = N_{sd} / R$ = rigidità del dispositivo
- N_{sd} = carico verticale semi-permanente (eq. 3.2.17 NTC 2008)
- R = raggio di curvatura
- μ = coeff. di attrito dinamico
- d = spostamento

MEMO
NTC eq. 3.2.17:
 $G_1 + G_2 + \sum \psi_{5i} Q_{5i}$

7

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA

PERIODO

- se si considera la pendenza del ramo plastico di risposta, corrispondente allo stato di moto oscillatorio lungo la superficie sferica, il periodo vale:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{N_{sd}/R}} = 2\pi \sqrt{\frac{K}{g}}$$

Periodo equivalente a quello di un pendolo

- se si considera invece come riferimento il valore di rigidità secante allo spostamento di progetto, il periodo vale:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right)}}$$

Periodo effettivo della struttura isolata
UTILIZZATO PER ANALISI LINEARI
(se ammesse dalle Norme)

Il periodo T non dipende dalla massa

8

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA

CAPACITA' DISSIPATIVE

Qualora le Norme consentano il ricorso ad analisi lineari, cioè sia possibile modellare il comportamento non lineare del dispositivo con un comportamento lineare equivalente: coefficiente di smorzamento viscoso equivalente

$$\xi_{ve} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1}$$

funzione di:

- coeff. di attrito
- raggio
- domanda di spostamento

(⇒ che la dissipazione equivalente da utilizzare in un'analisi elastica è funzione dello stato limite considerato ed assume valori differenti in relazione alla domanda di spostamento del sistema – SLV per verifica delle strutture isolate – SLC per il dimensionamento dei dispositivi)

9

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA

RIGIDITÀ

Qualora le Norme consentano il ricorso ad analisi lineari, cioè sia possibile modellare il comportamento non lineare del dispositivo con un comportamento lineare equivalente:

$$K_e = N_{sd} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right)$$

Anche la rigidità secante è funzione della domanda di spostamento. Il suo valore deve essere pertanto definito in modo congruente con l'obiettivo di calcolo, distinguendo tra analisi atte alla verifica del comportamento strutturale, riferite allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) ed analisi finalizzate alla verifica del dispositivo in condizioni di stato limite di collasso (SLC).

10

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA

Sia la rigidità secante sia il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente dipendono dallo spostamento.

Di conseguenza, una procedura iterativa deve essere impiegata nel calcolo, fino a quando la differenza tra i valori di spostamento assunti e calcolati diventa trascurabile.

Poiché la rigidità secante dipende dal carico verticale, il centri di massa e di rigidità coincidono.

11

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

Qualora le Norme consentano il ricorso ad analisi lineari **PROCEDURA ITERATIVA**

- ipotizzo un periodo (meglio T-TD per entrare nel ramo a spostamento costante dello spettro)
- ipotizzo uno smorzamento del sistema di isolamento
- dallo spettro così smorzato ricavo uno spostamento (all' SLV)
- per scegliere rapidamente i dispositivi, partendo dal carico verticale Nsd in condizioni statiche (combinazione sismica), dallo spostamento sopra ricavato (amplificato di 1,2 per passare all' SLC e maggiorato per l'eccentricità) assumo un raggio di curvatura R dei dispositivi ed un coefficiente di attrito (quello minimo FFM)

Suggerimenti:

zone di bassa sismicità	raggio di curvatura = 2,50 m
zone di alta sismicità	raggio di curvatura = 4,00 m
coefficiente di attrito	2,3+2,5 (max 3,0)

12



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

- calcolo il periodo T del sistema con la formula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right)}}$$

R è quello fissato, d è quello calcolato dallo spettro, μ calcolato come **media** pesata con i carichi verticali agenti su ciascun dispositivo ($\sum \mu \cdot N_{sd} / \sum N_{sd}$).

- Entro nello spettro (al periodo T appena calcolato) e ricavo lo spostamento corrispondente; con quest'ultimo ricalcolo per ogni dispositivo lo smorzamento equivalente ξ_e e la rigidezza equivalente K_e (utilizzando come carico verticale sempre quello calcolato in condizioni statiche nella combinazione di carico pari a quella dell'analisi sismica, Nsd)
- ricalcolo lo smorzamento equivalente dell'intero sistema come **media** pesata degli smorzamenti del sistema di isolamento ($\sum \xi_e \cdot K_e / \sum K_e$)
- rivaluto lo spostamento entrando nello spettro smorzato con nuovo ξ (al periodo T calcolato con lo spostamento del passo precedente)

13

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

- con questo nuovo spostamento ricalcolo smorzamento e rigidezza equivalente di ogni dispositivo
- itero fino a che lo spostamento ricavato dallo spettro non è identico (a meno del 5%) di quello utilizzato il passo precedente per definire lo smorzamento dello spettro stesso.
- a questo punto inserisco i valori delle rigidezza nel modello FEM. Leggo gli spostamenti di ciascun dispositivo (prendo il valore max calcolato dall'analisi a spettro tra la combinazione 100X30Y e 100Y30X) ricalcolo la rigidezza di ciascun dispositivo, la aggiorno nel modello e ricalcolo gli spostamenti fino a che gli spostamenti utilizzati per il calcolo della rigidezza e quelli calcolati nel modello non sono identici (a meno del 5%).
- anche in queste iterazioni con il modello FEM devo ricalcolare ad ogni passaggio lo smorzamento del sistema ed aggiornare lo spettro.

14

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ESEMPIO DI PROGETTAZIONE

15

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

Edificio a telaio in c.a. di 4 piani – IRREGOLARE IN PIANTA

- Gli isolatori sono posti alla base dell'edificio
- L'edificio ha comportamento elastico lineare

PGA = 0.35 g
Suolo tipo A
Periodo «target» di isolamento = 2.5 s

16

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

	A	B	C	D	E	F
1	2011	2015	2018	2013	2017	2014
2	2002	2005	2013	2014	2019	2019
3	2003	2012	2011	2015		
4	2001	2010	2011	2016		

Massa totale = 1364 ton

17

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

T = target isolation period = 2.5 s

- Suolo tipo A – PGA = 0,35 g
- Spettro di risposta elastico (accelerazione) con $\xi = 15\%$

$$S_e(T) = 2.5 a_g S \eta \left(\frac{T_d T_p}{T^2} \right) \quad S_e(T) = 2.5 \times 0.35 g \times 1 \times 0.632 \times \left(\frac{0.4 \times 2}{2.5^2} \right) = 0.694 \frac{m}{s^2}$$

- Spettro di risposta elastico (spostamento) SLV

$S_{De}(T) = 0,12 m$
Spostamento (SLC) = 200mm

18



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

Nod	FFM	R	μ	Node	μ	Kc	fv
kN	mm	mm		kN		kN/mm	
482	L	3100	110	1500	0.063	0.442	0.408
667	L	3100	110	1500	0.049	0.513	0.370
520	L	3100	110	1500	0.061	0.454	0.401
352	L	3100	110	1500	0.084	0.381	0.447
651	L	3100	110	1500	0.048	0.523	0.365
901	L	3100	110	1500	0.038	0.604	0.330
708	L	3100	110	1500	0.047	0.630	0.362
518	L	3100	110	1500	0.061	0.450	0.404
695	L	3100	110	1500	0.047	0.524	0.364
904	L	3100	110	1500	0.038	0.605	0.330
708	L	3100	110	1500	0.047	0.630	0.362
512	L	3100	110	1500	0.061	0.450	0.404
897	L	3100	110	1500	0.043	0.568	0.345
978	L	3100	110	1500	0.036	0.634	0.319
520	L	3100	110	1500	0.060	0.454	0.401
352	L	3100	110	1500	0.084	0.381	0.447
918	L	3100	110	1500	0.038	0.611	0.328
928	L	3100	110	1500	0.051	0.612	0.327
604	L	3100	110	1500	0.053	0.489	0.382
608	L	3100	110	1500	0.053	0.490	0.382

ε_{sm} = 0.399

Sistema troppo smorzato

Inserisco degli isolatori a scorrimento lubrificati (XL)

19

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

Nod	FFM	R	μ	Node	μ	Kc	fv
kN	mm	mm		kN		kN/mm	
892	L	3100	90	1500	0.063	0.505	0.436
667	XL	3100	90	1500	0.010	0.289	0.163
520	L	3100	90	1500	0.061	0.517	0.430
352	L	3100	90	1500	0.084	0.441	0.473
672	L	3100	90	1500	0.048	0.500	0.396
901	XL	3100	90	1500	0.010	0.391	0.163
709	XL	3100	90	1500	0.010	0.307	0.163
510	L	3100	90	1500	0.061	0.513	0.432
695	L	3100	90	1500	0.047	0.591	0.395
904	XL	3100	90	1500	0.010	0.392	0.163
709	XL	3100	90	1500	0.010	0.307	0.163
510	L	3100	90	1500	0.061	0.513	0.432
807	L	3100	90	1500	0.042	0.636	0.376
978	XL	3100	90	1500	0.010	0.425	0.163
520	XL	3100	90	1500	0.010	0.236	0.163
352	L	3100	90	1500	0.084	0.441	0.473
918	L	3100	90	1500	0.038	0.680	0.359
928	XL	3100	90	1500	0.010	0.400	0.163
604	L	3100	90	1500	0.053	0.514	0.412
608	L	3100	90	1500	0.053	0.555	0.411

20

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

Il sistema è già centrato.

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	SumUX	SumUY
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	2.612	0.990	0.001	0.99	0.000929
MODAL	Mode	2	2.605	0.001	0.980	0.99	0.98
MODAL	Mode	3	2.380	0.000	0.011	0.99	0.99
MODAL	Mode	4	0.589	0.000	0.005	0.99	1
MODAL	Mode	5	0.582	0.007	0.000	1	1

21

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

Iter	OutputCase	StepType	UX	UY	Ux	Uy
Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
101	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
102	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
103	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
104	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
105	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
106	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
107	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
108	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
109	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
110	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
111	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
112	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
113	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
114	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
115	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
116	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
117	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
118	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
119	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3
120	EQE_R_SUI-XR4	Max	-0.178	23.8	83.9	0.3

La procedura prosegue iterativamente fino a che lo spostamento previsto e quello calcolato per ciascun dispositivo non coincidono a meno del 5%

Ad ogni iterazione:

- analisi sismica coi dispositivi calcolati e valutazione degli spostamenti
- ricalcolo delle effettive rigidzze e smorzamenti equivalenti che dipendono dallo spostamento di ciascun dispositivo
- nuova analisi con lo spettro smorzato e valutazione spostamenti

22

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

23

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

24

ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

PROGETTO DI RETROFIT INIZIALE

- BLOCCHI B & C: ISOLAMENTO ALLA BASE
- BLOCCHI A & D: RINFORZI CONVENZIONALI



25

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

RETROFIT PROPOSTO DA NUMERIA

- BLOCCHI B & C: ISOLAMENTO ALLA BASE (FIP-D)
- BLOCCHI A & D: DISSIPAZIONE ENERGETICA (BRAD)

↓

Interventi di rinforzo estremamente limitati a pochi elementi strutturali della sovrastruttura

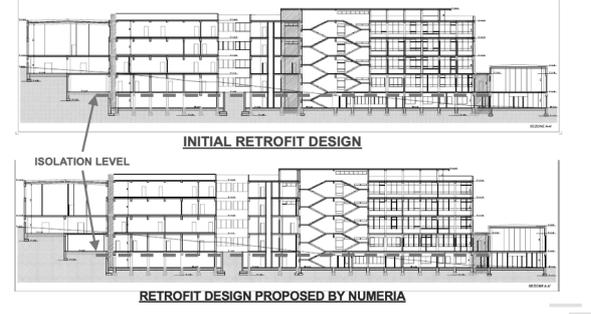
Nessun intervento di rinforzo a livello di fondazioni

26

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE



INITIAL RETROFIT DESIGN

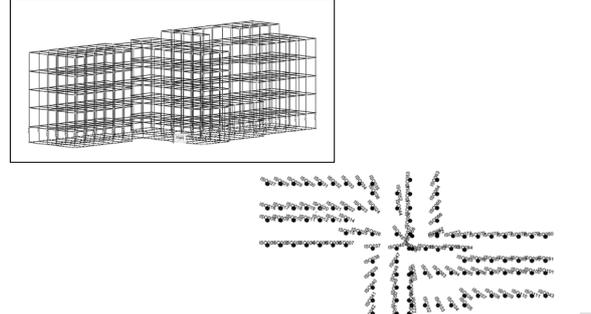
RETROFIT DESIGN PROPOSED BY NUMERIA

27

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE



28

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLATORI A SCORRIMENTO A SUPERFICIE CURVA – ANALISI LINEARE

TABLE: Link Property Definitions 08 - Sliding Isolator

Link	DOF	Fixed	NonLinear	TransKE	TransCE	DJ	TransK	TransC	Slow	Fast	Rate	Radius
Test	Test	Yes/No	Yes/No	kN/m	kN-s/m	m	kN/m	kN ² /m ³ Cap	Unitless	Unitless	sec/m	m
ISO001	U1	No	Yes	1000000	0	0	1000000	729				
ISO001	U2	No	Yes	235	0	0	31463	0,038426	0,060384	7,5	3,7	
ISO001	U3	No	Yes	235	0	0	31463	0,038426	0,060384	7,5	3,7	
ISO002	U1	No	Yes	1000000	0	0	1000000	860				
ISO002	U2	No	Yes	296	0	0	33241	0,029156	0,045816	7,5	3,7	
ISO002	U3	No	Yes	296	0	0	33241	0,029156	0,045816	7,5	3,7	
ISO003	U1	No	Yes	1000000	0	0	1000000	860				
ISO003	U2	No	Yes	296	0	0	33246	0,029133	0,04578	7,5	3,7	
ISO003	U3	No	Yes	296	0	0	33246	0,029133	0,04578	7,5	3,7	
ISO004	U1	No	Yes	1000000	0	0	1000000	857				
ISO004	U2	No	Yes	294	0	0	33201	0,029332	0,046094	7,5	3,7	
ISO004	U3	No	Yes	294	0	0	33201	0,029332	0,046094	7,5	3,7	
ISO005	U1	No	Yes	1000000	0	0	1000000	864				
ISO005	U2	No	Yes	298	0	0	33293	0,028926	0,045454	7,5	3,7	
ISO005	U3	No	Yes	298	0	0	33293	0,028926	0,045454	7,5	3,7	
ISO006	U1	No	Yes	1000000	0	0	1000000	854				
ISO006	U2	No	Yes	293	0	0	33166	0,029488	0,046338	7,5	3,7	
ISO006	U3	No	Yes	293	0	0	33166	0,029488	0,046338	7,5	3,7	
ISO007	U1	No	Yes	1000000	0	0	1000000	627				
ISO007	U2	No	Yes	192	0	0	29844	0,050105	0,078736	7,5	3,7	
ISO007	U3	No	Yes	192	0	0	29844	0,050105	0,078736	7,5	3,7	

29

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

INSTALLAZIONE DEGLI ISOLATORI – EDIFICI ESISTENTI - PENDOLI

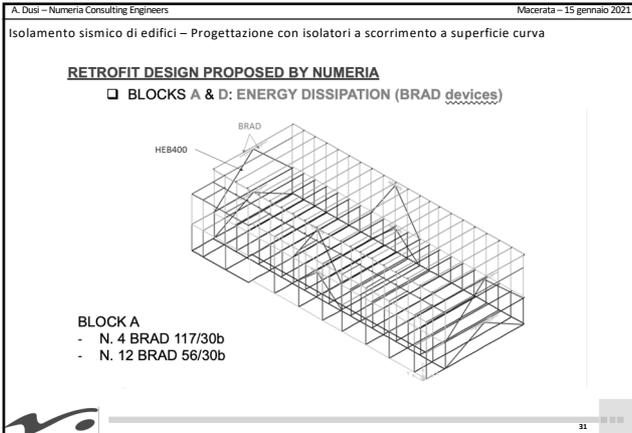


30

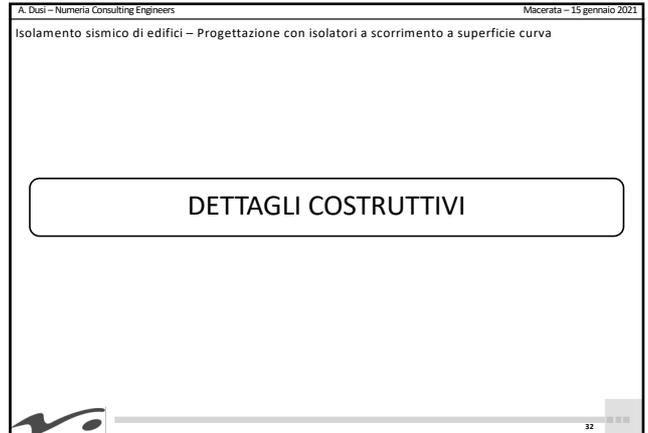


ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

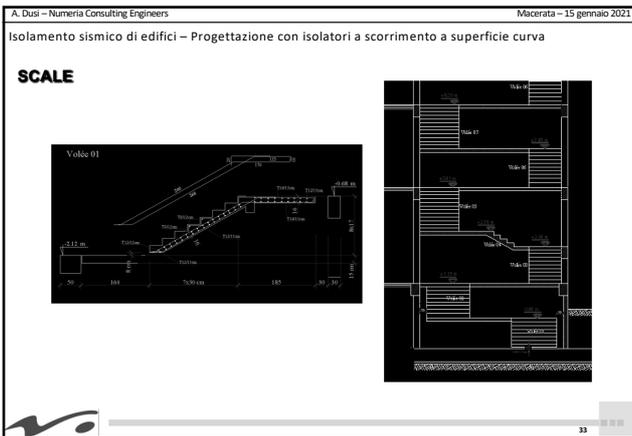
Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva



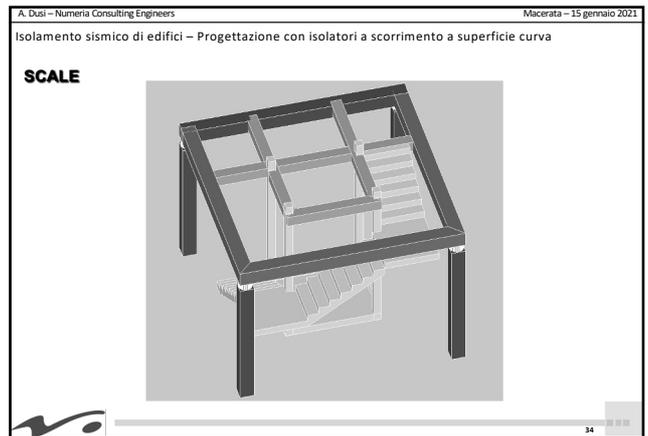
31



32



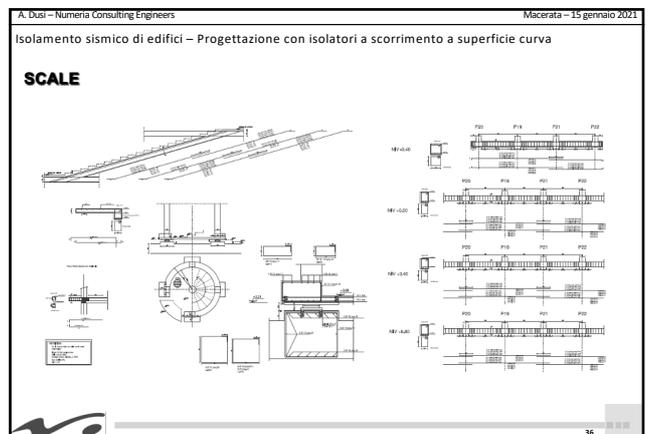
33



34



35

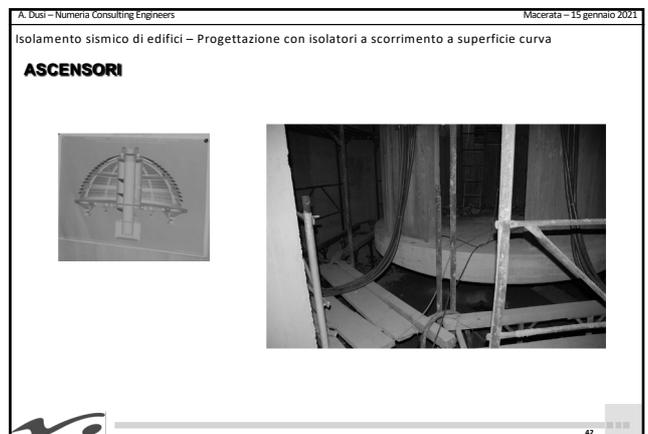
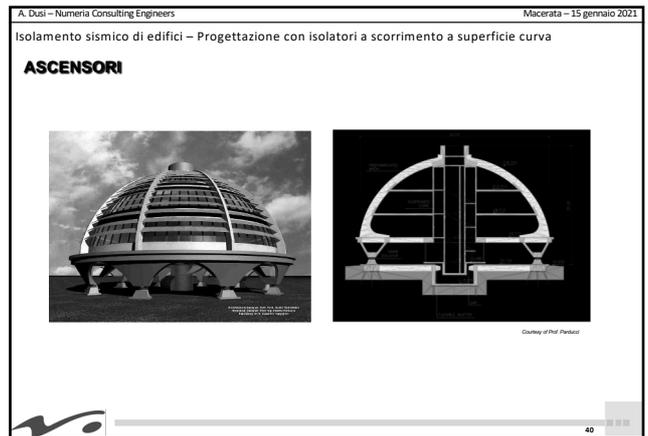
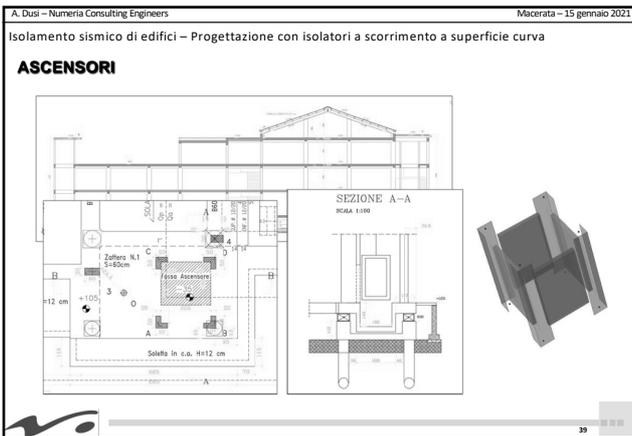
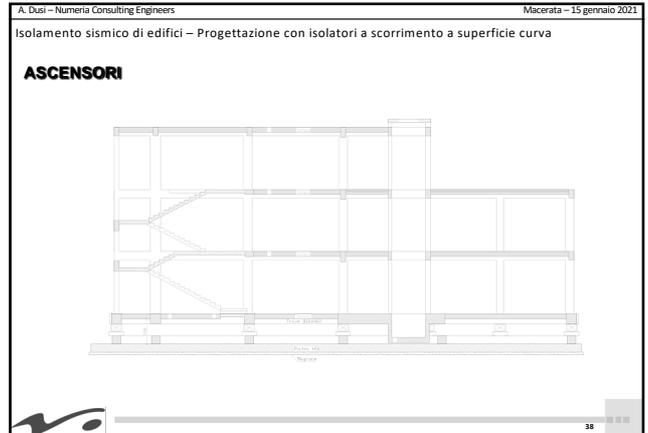
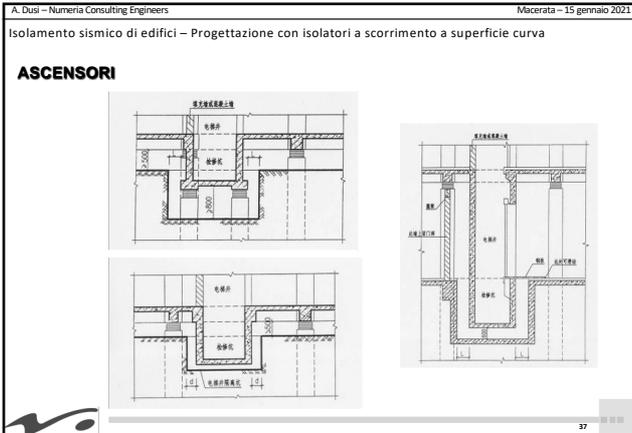


36



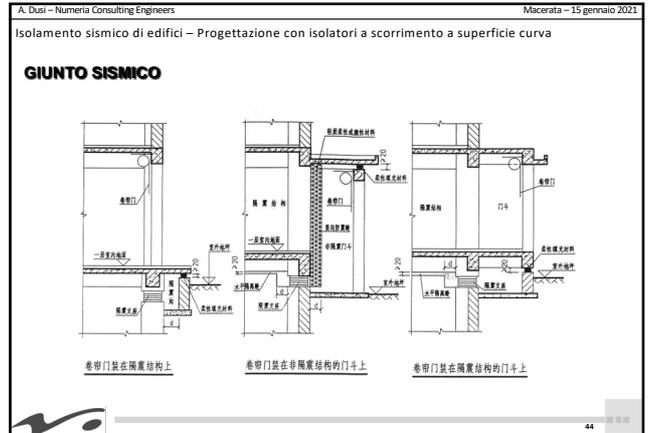
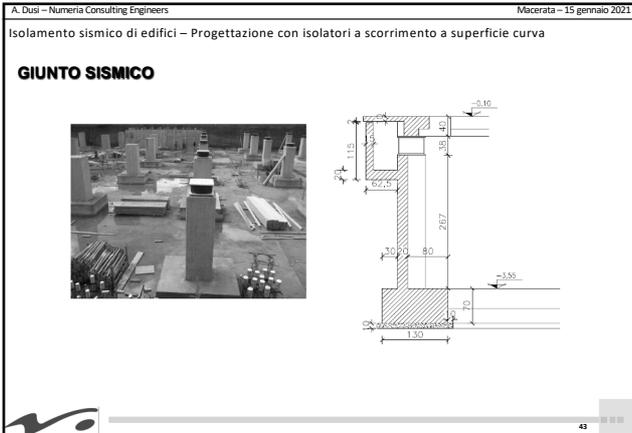
ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva



43

44



45



46



47



48



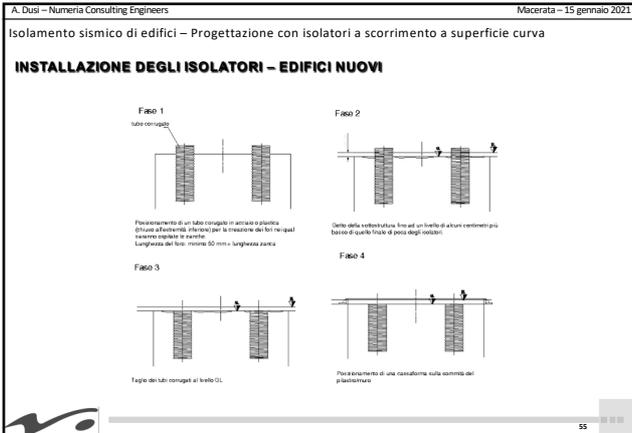
ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

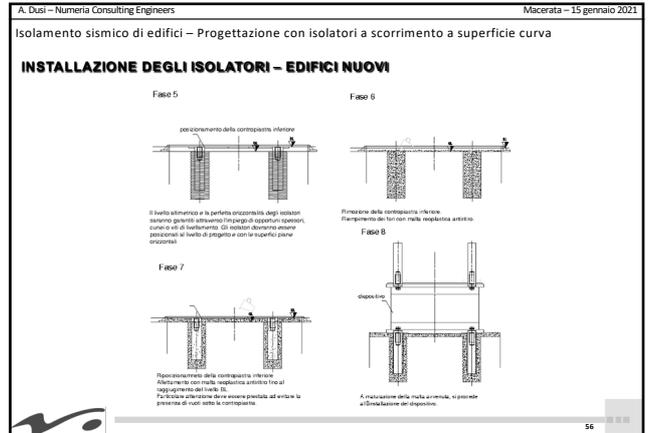


ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva



55



56



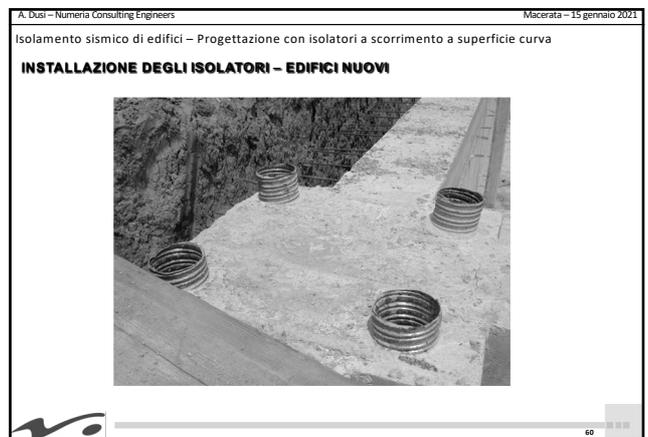
57



58



59

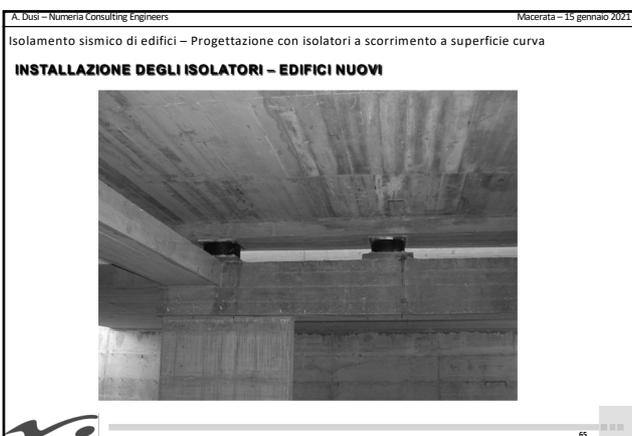


60



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

INSTALLAZIONE DEGLI ISOLATORI – EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

1. Esecuzione di scavi per rendere accessibile il sistema fondale
2. Creazione di alloggiamenti per i dispositivi di isolamento
3. Interventi di rinforzo delle fondazioni (ad es. realizzazione di travi gemellate)

73

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

INSTALLAZIONE DEGLI ISOLATORI – EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

4. Inserimento dei dispositivi
5. Messa in carico dei dispositivi (ad es. tramite martinetti piatti)
6. Realizzazione della separazione tra sovrastuttura e sovrastruttura (taglio delle connessioni rimaste tra gli alloggiamenti dei dispositivi)

74

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

75

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO CON ISOLAMENTO SISMICO

Modello FEM

Modi di vibrare principali: pianta

76

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

77

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

VANTAGGI DELL'ISOLAMENTO CONSEGUITO DELL'ADEGUAMENTO SISMICO

Il sistema di isolamento consente di ottenere:

- > Abbattimento delle sollecitazioni sulla sovrastruttura dovuto ad aumento del periodo fondamentale di vibrazione fino a $T=2,0$ s circa nelle direzioni principali
- > Incremento dello smorzamento strutturale legato alla tecnologia degli isolatori ($\xi=15\%$);
- > Regolarizzazione della risposta sismica della sovrastruttura: il sistema di isolamento viene progettato in modo da ribilanciare le rigidità strutturali eliminando le eccentricità che determinano pericolosi moti torsionali
- > Sostanziale mantenimento in campo elastico della sovrastruttura anche per sismi della massima intensità prevista.
- > Miglioramento della funzionalità: il sistema di isolamento garantisce non solo un maggior livello di sicurezza dell'edificio per eventi estremi (comportamento a collasso), ma anche la piena funzionalità della stessa in fase di esercizio (comportamento allo Stato Limite di Danno - sismi di minore intensità); non si ha danneggiamento alcuno della sovrastruttura, protetta dall'isolamento, e le deformazioni concentrate sui dispositivi vengono interamente recuperate, la struttura risulta del tutto funzionale in fase post-sisma.

78



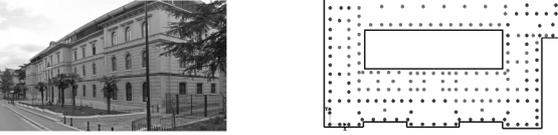
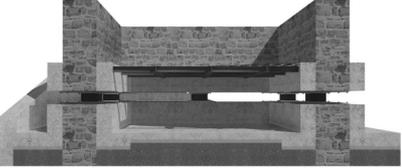
ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

School building – Italy

79

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA



80

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

DIREZIONE LAVORI E COLLAUDO DI STRUTTURE ISOLATE

81

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

COLLAUDO

7.10.8. ACCORGIMENTI SPECIFICI IN FASE DI COLLAUDO **NTC2018 – 7.10.8**

Ai fini del collaudo statico, di fondamentale importanza è il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto, nonché la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti, con il rigoroso rispetto delle distanze di separazione previste in progetto.

Il collaudatore può disporre l'esecuzione di speciali prove per la caratterizzazione dinamica del sistema di isolamento atte a verificare, nei riguardi di azioni di tipo sismico, che le caratteristiche della costruzione corrispondano a quelle attese.

7.10.8. ACCORGIMENTI SPECIFICI IN FASE DI COLLAUDO

È auspicabile che il collaudatore abbia specifiche competenze, acquisite attraverso precedenti esperienze, come progettista, collaudatore o direttore dei lavori di strutture con isolamento sismico, o attraverso corsi universitari o di specializzazione universitaria.

Oltre a quanto indicato nelle norme tecniche emanate ai sensi dell'art.21 della legge 5.11.71 n.1086, per le opere in c.a., in c.a.p. ed a struttura metallica, devono osservarsi le indicazioni di seguito riportate:

- devono essere acquisiti dal collaudatore i documenti di origine, forniti dal produttore dei dispositivi, unitamente ai certificati relativi alle prove sui materiali ed alla qualificazione dei dispositivi, nonché i certificati relativi alle prove di accettazione in cantiere disposte dalla Direzione dei Lavori;
- la documentazione ed i certificati sopraindicati devono essere esposti nella relazione a struttura ultimata del Direttore dei Lavori cui spetta, ai sensi delle vigenti norme, il preminente compito di accertare la qualità dei materiali impiegati nella realizzazione dell'opera.

In relazione all'importanza di assicurare la totale libertà di spostamento orizzontale della sovrastruttura (ossia della parte isolata), ai fini del corretto funzionamento dell'isolamento sismico, particolare attenzione andrà posta nel verificare tale condizione nelle ispezioni di collaudo. Oltre all'assenza di connessioni strutturali, è importante verificare che non ci siano elementi non strutturali, impianti o contatto con il terreno circostante che possano creare impedimento al movimento della sovrastruttura.

82

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

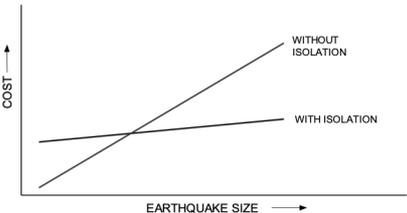
COSTI

83

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLAMENTO SISMICO: COSTI



L'isolamento sismico può consentire di conseguire un prefissato livello di sicurezza a costi inferiori rispetto ai costi di un edificio progettato con l'approccio convenzionale. Infatti mentre nella progettazione convenzionale i costi aumentano all'aumentare del livello di sismicità, il costo degli isolatori aumenta in misura molto minore.

84



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLAMENTO SISMICO: COSTI

85

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

ISOLAMENTO SISMICO: COSTI

86

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

COST COMPARISON - 1

CONVENTIONAL RETROFIT	BASE ISOLATION RETROFIT
Extensive interventions	Limited interventions
Building service disruption	Building remain operational
Performance level lower than the current codes demands (60%)	Performance level equal to the one required by the code (100%)
Damage expected for future earthquake	No damage for future earthquake
4.916.678,00 € total cost	3.029.118,00 € total cost
23 months working time	9 months working time

87

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

COST COMPARISON - 1

- ❑ dal confronto dei costi emerge chiaramente l'immediato vantaggio economico della soluzione con isolamento;
- ❑ tuttavia, dal momento che la capacità dell'edificio rinforzato convenzionalmente e quella dell'edificio isolato sono significativamente diverse, il confronto dei costi dovrebbe essere esteso all'intera vita utile della struttura considerando le prestazioni attese a fronte degli eventi sismici attesi. L'edificio isolato alla base non soffrirà nessun danneggiamento anche sotto l'azione del terremoto di progetto. Al contrario, l'edificio rinforzato convenzionalmente sarà soggetto a danni già per eventi sismici aventi intensità pari al 70% del terremoto di progetto, cioè per un evento che ha circa il 25% di probabilità di essere superato nella vita residua dell'edificio.

88

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

COST COMPARISON - 1

- ❑ gli elementi non strutturali dell'edificio retrofittato convenzionalmente potrebbero essere danneggiati anche per eventi sismici più frequenti e di minore intensità;
- ❑ infine, per il massimo terremoto atteso, cioè per l'evento che ha il 10% di probabilità nella vita della struttura, l'edificio convenzionale subirà danni generalizzati il cui costo di riparazione sarà paragonabile (se non superiore) ai costi sostenuti per il retrofit.

89

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

COST COMPARISON - 2

Figure 2 - Building B: (a) plan of a typical elevation floor; (b) longitudinal section

average cubic strength of concrete $R_{cm} = 12.5$ MPa
yield strength f_{yk} of steel = 380 MPa

Vulnerability index* of the construction = 0,37
* Capacity/Demand (C/D) ratio between the capacity and demand accelerations

90



ISOLAMENTO SISMICO DI EDIFICI Parte 1

Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

IMPIANTI INDUSTRIALI ESISTENTI

Diagram illustrating the seismic isolation of existing industrial plants. It shows a 3D view of a structure with curved sliding surfaces and a detailed cross-section of the isolation system. Labels include: "Piastra di collegamento", "Piastra di scorrimento", "EM-34/360/90", and "S-5120x120/105".

97

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

IMPIANTI INDUSTRIALI

EUROPEAN COMMISSION 7th EU-RATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2007-2013
THEME (Priority 2014-2-3-3)
IR42 activities in support of the implementation of the Strategic Research Agenda of SNE-175

MYRRHA NUCLEAR POWER PLANT

M = 230167 t

Longitudinal section diagram of the Myrrha Nuclear Power Plant. It shows a multi-level structure with curved sliding surfaces. Labels include: "level 06", "level 05", "level 04", "level 03", "level 02", "level 01", "level 00", "level 01", "level 02", "level 03".

Progetto isolamento: Numeria

- 339 HDRB ($\xi = 10\%$)
- 80 HDRB type A ("external ones")
- 259 HDRB type B ("internal ones")

NUMERIA

98

97

98

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

IMPIANTI INDUSTRIALI

EUROPEAN COMMISSION 7th EU-RATOM FRAMEWORK PROGRAMME 2007-2013
THEME (Priority 2014-2-3-3)
IR42 activities in support of the implementation of the Strategic Research Agenda of SNE-175

Progetto isolamento: Numeria

3D rendering of the Myrrha Nuclear Power Plant showing the isolation system. Labels include: "NUMERIA" and "MYRRHA NUCLEAR POWER PLANT".

99

99

A. Dusi – Numeria Consulting Engineers Macerata – 15 gennaio 2021

Isolamento sismico di edifici – Progettazione con isolatori a scorrimento a superficie curva

GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE

100

100

