

**REGIONE EMILIA ROMAGNA**

**FORMAZIONE 2017- 2018**

**Bologna - 29/01/2018**

**Aspetti Progettuali e Controllo  
delle Opere - Casi Studio**

**Ing. Maurizio Lenzi**



# **RUOLO DELLA DIREZIONE TECNICA D'IMPRESA**

**Aspetti progettuali  
Controlli delle opere**

# I PARTE

## MATERIALI

***MIX – DESIGN DEL CALCESTRUZZO***

**CONTROLLI NON DISTRUTTIVI  
*CALIBRAZIONE METODO SONREB***

**CONTROLLI NON DISTRUTTIVI  
SU STRUTTURE MURARIE**

## **II PARTE**

### **RISONANZA STRUTTURALE**

#### **DINAMICA DELLE STRUTTURE** ***ANALISI IN FREQUENZA***

#### **STRUTTURE ISOLATE ALLA BASE** **CASO STUDIO E PROVE N.D.**



**PARTE PRIMA**

# **FORNITURA DEL CALCESTRUZZO**

## **MIX DESIGN**

M. Lenzi, D. Versari – *Mix Design del Calcestruzzo* – R&S, Corso ACMAR

# **FORNITURA DI UN CALCESTRUZZO**

**Esempio di specifica di fornitura**  
*C35 XC4 S4 D16 | CEM II/A-L 42.5 R*

**Specifiche inerenti lo stato indurito**  
**(resistenza, durabilità, ecc.)**

**Specifiche inerenti lo stato fresco**  
**(lavorabilità, diametro max inerti)**



## Il calcestruzzo

- La composizione di un calcestruzzo ordinario viene definito in base a requisiti prestazionali definiti in sede di progetto e in funzione delle caratteristiche delle materie prime disponibili



- Ogni singolo componente deve rispondere a requisiti stabiliti da leggi e normative specifiche, in funzione della resistenza e della durabilità previste per l'opera in c.a. da realizzare



# COMPONENTI DEL CALCESTRUZZO

- ❖ **ACQUA D'IMPASTO** – UNI EN 1008 (reazione idrataz.+ lavorab.)
- ❖ **CEMENTO** - UNI 197/1 (legante idraulico)
- ❖ **AGGREGATI** - UNI EN 206-1 (scheletro solido gran.assort)
- ❖ **ADDITIVI** - UNI EN 934-2 / EN 480-1 (riduttori di acqua, SRA,acc.)
- ❖ **AGGIUNTE** - UNI EN 206-1 (tipo I – filler inerti riduttori dei vuoti)  
(tipo II – filler proprietà leganti latenti)

I componenti utilizzati devono rispondere ai requisiti ed ai controlli previsti dalla **MARCATURA CE** e dalle **NTC 2008**



# Classificazione del Cemento

## Classificazione del cemento in base al contenuto di clinker

**A** = ad alta percentuale di clinker (> 80%)

**B** = a bassa percentuale clinker (65-80%)

## Classificazione in base ai tempi di presa

**N** = cemento con tempi di presa normali

**R** = cemento a presa rapida

CLASSE DI RESISTENZA	RESISTENZA A COMPRESIONE (N/mm <sup>2</sup> )				TEMPO DI INIZIO PRESA min
	Resistenza a breve		Resistenza standardizzata		
	2 giorni	7 giorni	28 giorni		
32.5L*	-	≥ 12			
32.5N	-	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75
32.5R	≥ 10	-			
42.5L*	-	≥ 16			
42.5N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60
42.5R	≥ 20	-			
52.5L*	≥ 10	-			
52.5N	≥ 20	-	≥ 52.5	-	≥ 45
52.5R	≥ 30	-			

## Classificazione del cemento in base alla resistenza a 28 gg

**CEM 32.5** - Resistenza a 28 gg = 32.5 N/mm<sup>2</sup> (basso ritiro e basso calore)

**CEM 42.5** - Resistenza a 28 gg = 42.5 N/mm<sup>2</sup> (strutture in c.a. in opera)

**CEM 52.5** - Resistenza a 28 gg = 52.5 N/mm<sup>2</sup> (strutture prefabbr. e in c.a.p.)

# Tipi di Cemento

Dal clinker Portland, mediante l'aggiunta di componenti diversi, si ottengono

- **Cemento Portland (CEM I)**, è il prodotto ottenuto per macinazione di **clinker** con opportuna aggiunta di gesso o anidride, dosato nella quantità necessaria, per regolarizzare il processo di idratazione iniziale.
- **Cemento Portland di Miscela (CEM II)** è il prodotto ottenuto dal cemento Portland miscelato con **aggiunte** (cenere volante, calcare, ecc.)
- **Cemento d'alto forno (CEM III)**, è una miscela omogenea ottenuta dalla macinazione di clinker, **loppa granulare d'alto forno** e gesso. La loppa esce dall'alto forno allo stato fuso e viene raffreddata con acqua, acquisendo con questo trattamento un ottimo potere idraulico.
- **Cemento Pozzolatico (CEM IV)**, è ottenuto dalla macinazione di clinker, **pozzolana** e gesso; la pozzolana è un materiale naturale siliceo molto reattivo, di origine vulcanica.
- **Cemento Composito (CEM V)**









# Requisiti Prestazionali del Calcestruzzo

Il **Mix-design**, ossia il “progetto della miscela”, individua la composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste in sede di progetto:

## ***Calcestruzzo allo stato fresco***

**Lavorabilità** (Classe di consistenza del calcestruzzo)

## ***Calcestruzzo indurito***

**Resistenza** (Classe di resistenza a compressione)

**Durabilità** (Classe di esposizione ambientale)



# Controllo della lavorabilità

Il controllo della lavorabilità consiste nel misurare l'abbassamento (slump) del calcestruzzo sformato da un tronco di cono metallico (cono di **Abrams**) rispetto all'altezza dello stesso, di 300 mm, secondo la metodologia di prova (slump test) standardizzata dalla norma **UNI EN 12350-2**.

La stessa norma definisce cinque **Classi di Consistenza** (individuate dal prefisso "**S**") e le rispettive denominazioni e tolleranze:



Classe di Consistenza	Slump (mm)	Denominazione Corrente
S1	10-40	Umida
S2	50-90	Plastica
S3	100-150	Semifluida
S4	160-210	Fluida
S5	>210	Superfluida



# Misura della lavorabilità (cono di Abrams)

- si riempie il cono in tre strati successivi; ogni strato deve essere assestato con 25 colpi di barra di costipazione (pestello)
- si solleva il cono
- si misura l'abbassamento del calcestruzzo, rispetto all'altezza del cono, in millimetri (slump)



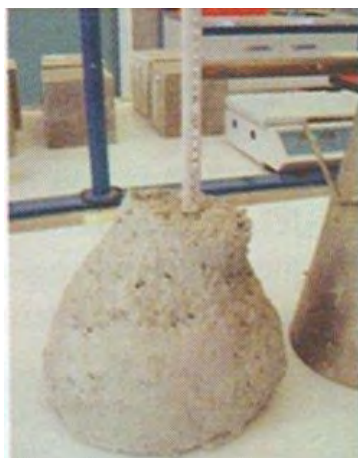
**S1 10 a 40  
mm**

**Umida**



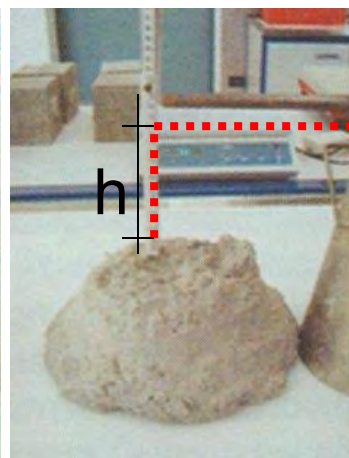
**S2 50 a 90  
mm**

**Plastica**



**S3 100 a 150  
mm**

**Semifluida**



**S4 160 a 200  
mm**

**Fluida**



**S5 > 210  
mm**

**Superfluida**



# Classe di consistenza - Spandimento



Classe di consistenza (F)	Diametro di spandimento (D)
<b>F1</b>	D < 340 mm
<b>F2</b>	340 < D < 410 mm
<b>F3</b>	420 < D < 480 mm
<b>F4</b>	490 < D < 550 mm
<b>F5</b>	560 < D < 620 mm
<b>F6</b>	<b>D &gt; 630 mm</b>





# Calcestruzzo autocompattante SCC



**Classe di consistenza (SF)    Diametro di spandimento (D)**

**SF1**

$560 < D < 650 \text{ mm}$

**SF2**

$660 < D < 750 \text{ mm}$

**SF3**

$D > 750 \text{ mm}$

# Controllo della lavorabilità

## Classe di consistenza e acqua di impasto

### ACQUA DI IMPASTO

D <sub>max</sub> (mm)	Acqua (kg/mc)				
	Classe di consistenza (lavorabilità alla miscelazione)				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	240	250
12	190	205	225	235	245
16	185	200	220	230	240
20	180	190	205	215	225
32	165	180	195	205	215
40	155	170	185	195	205

L'acqua di impasto cresce con la **lavorabilità** richiesta e con il ridursi del **diametro degli aggregati**, ossia all'aumentare della superficie bagnata

## **Controllo della lavorabilità**

**Il controllo che un calcestruzzo sia gettato con la consistenza prevista in progetto contribuisce a garantire le caratteristiche e le prestazioni finali del calcestruzzo. Per ottenere elevate fluidità occorre prevedere sempre l'impiego di **Additivi Superfluidificanti**.**

## **Aggiunte di acqua in cantiere**

- **Aggiungere acqua nel calcestruzzo, consente di avere calcestruzzo più fluido, cioè più facile da lavorare e in cantiere in fase di posa in opera;**
- **L'acqua non "costa" nulla.**



## Decadimento di prestazione conseguente ad aggiunte di acqua in cantiere

Con l'**aggiunta arbitraria** di acqua in cantiere **vengono alterate profondamente le caratteristiche** intrinseche fisico meccaniche **del calcestruzzo** rispetto ai requisiti progettuali, determinando:



- aumento della segregazione;
- calcestruzzo poroso (acqua non legata);
- aumento del rapporto a/c;
- diminuzione di resistenza e di durabilità.





# Controllo della lavorabilità

## Conseguenze delle aggiunte di acqua in cantiere

<b><math>R_{CK} = 40 \text{ MPa}</math> - consistenza S3</b>					
Consistenza	Acqua (lt)	Cemento (kg)	A/C	Resistenza $\text{N/mm}^2$	Rck effettivo
 S3	180	360	0,50	47,0	<b>43,5</b>
 S4	$180 + 20 = 200$	360	0,55	41,2	<b>37,7</b>
 S5	$180 + 35 = 215$	360	0,60	35,3	<b>31,8</b>

(fonte: ATECAP)

# RESISTENZA E DURABILITA' DEL CONGLOMERATO

Le proprietà del calcestruzzo dipendono marcatamente dalla **permeabilità della matrice cementizia**, a sua volta funzione del rapporto in peso tra acqua e cemento (a/c).

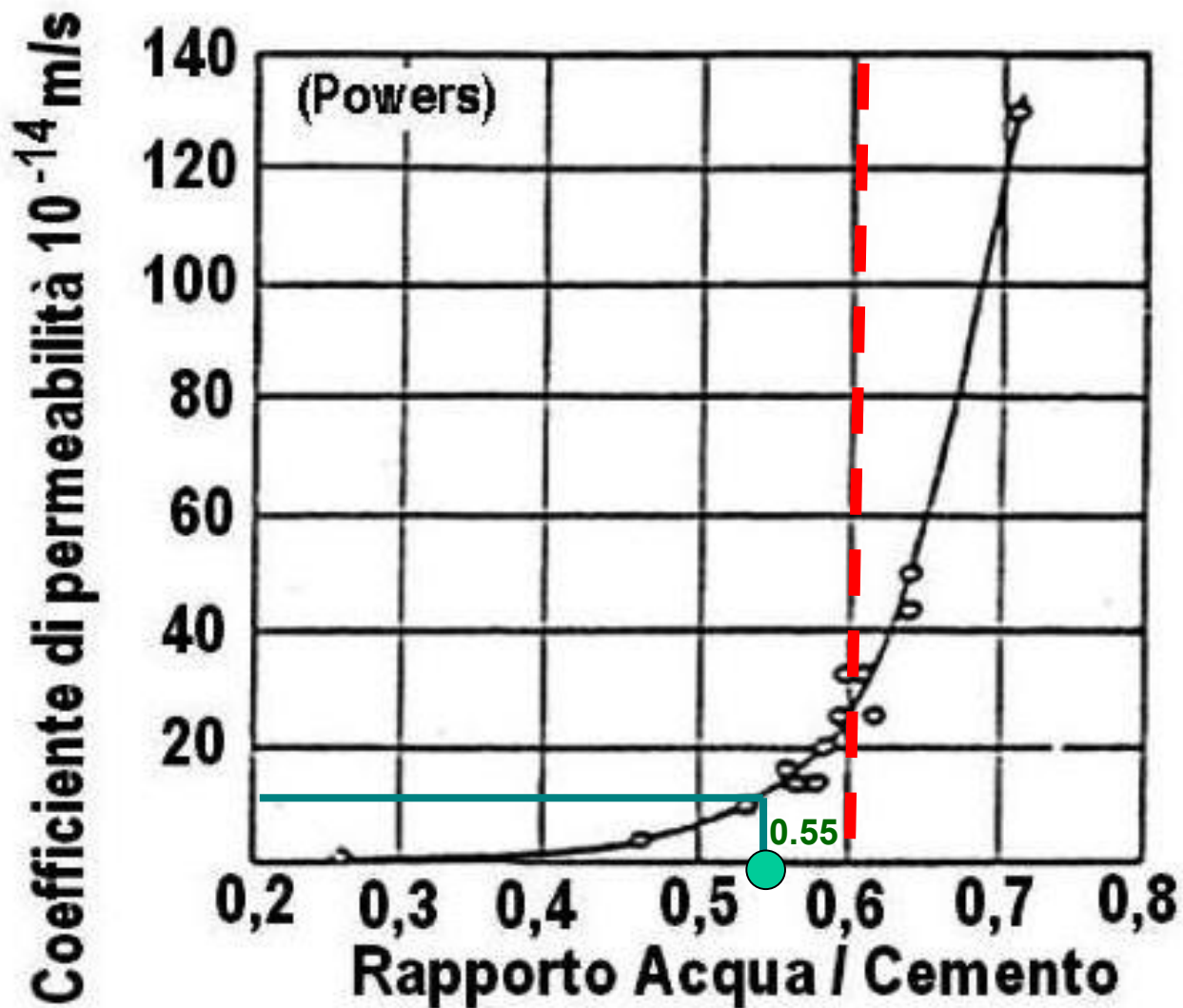
**Calcestruzzi impermeabili** (a 28 gg) presentano un rapporto tra acqua (a) e cemento (c):

$$a/c < 0.55$$

Ne consegue che per ottenere **conglomerati resistenti e durevoli** occorre fissare **rapporti a/c inferiori al limite di impermeabilità**.

La ragione risiede nel fatto per per valori  $a/c > 0.55$  la porosità della matrice cementizia aumenta in modo esponenziale, **agevolando il trasporto degli agenti aggressivi all'interno, evaporando negli strati superficiali e riducendo la resistenza meccanica (matrice porosa)**.

## PERMEABILITA' DEL CALCESTRUZZO





# Resistenza del calcestruzzo

La resistenza del calcestruzzo dipende dai seguenti parametri

Rapporto acqua – cemento

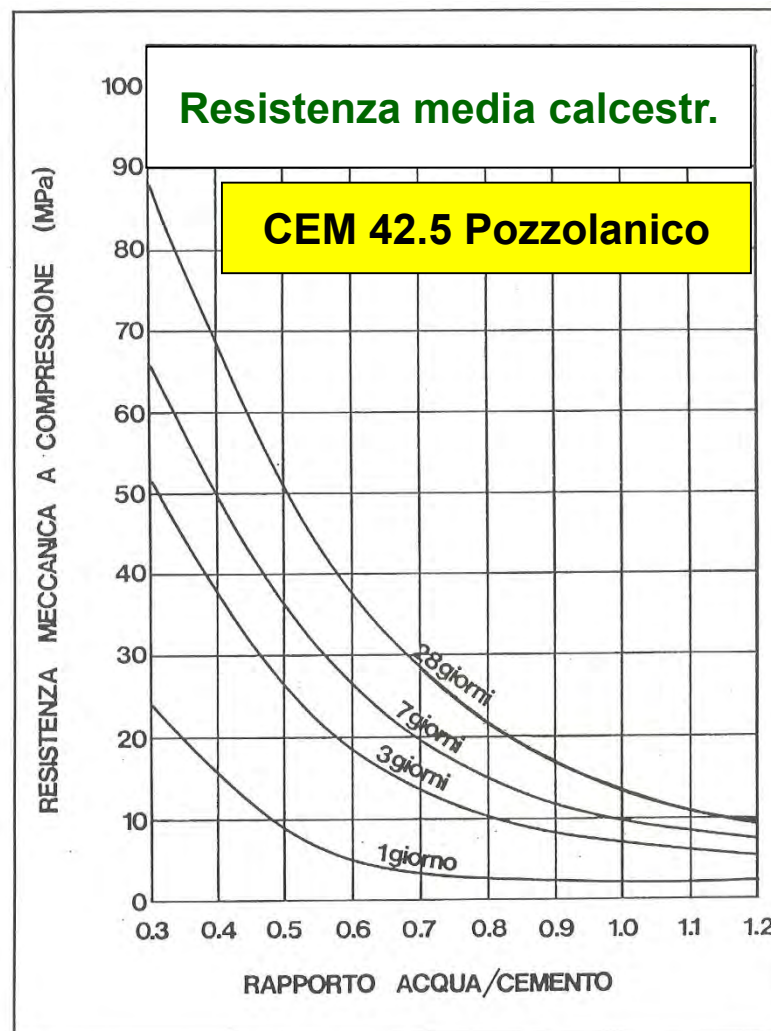
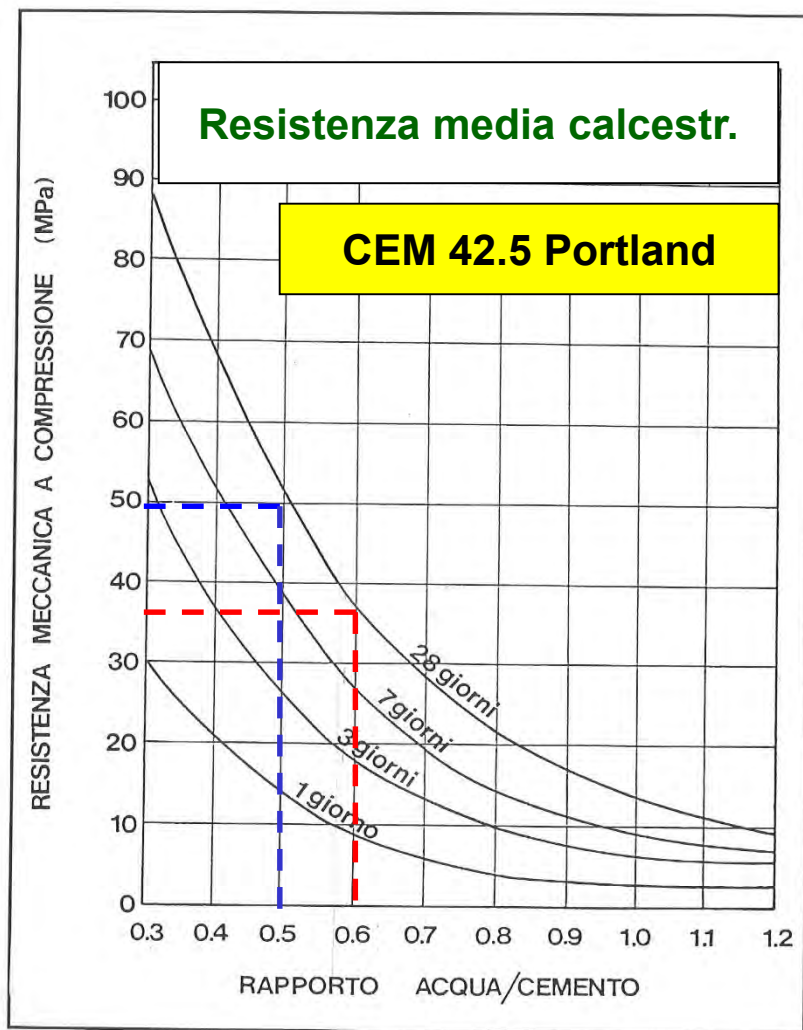
Tipo di cemento (CEM 32.5 – CEM 42.5 – CEM 52.5 )

Il rapporto acqua/cemento è il parametro fondamentale che determina le caratteristiche di resistenza e di durabilità del calcestruzzo

Rappresenta il rapporto tra il quantitativo dell'acqua d'impasto e la quantità di cemento utilizzati per un metro cubo di calcestruzzo.

La legge fondamentale nella tecnologia del calcestruzzo (legge di **Abrams**) stabilisce la seguente regola fondamentale:

*La resistenza meccanica del calcestruzzo aumenta  
al diminuire del rapporto acqua/cemento*

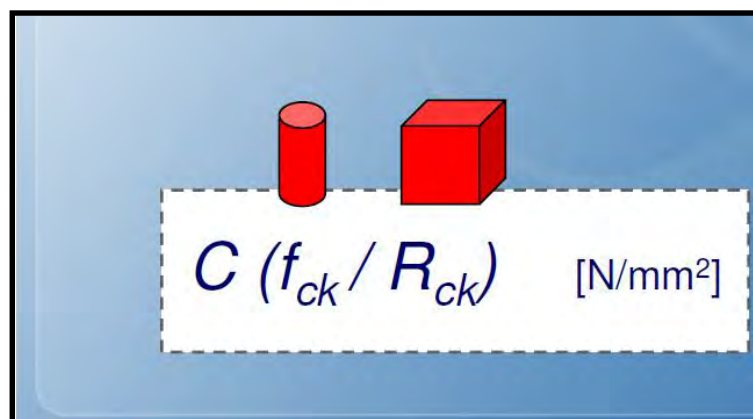


**Resistenze meccaniche medie vs rapporto acqua/cemento (ENCO)**



# Classi di resistenza del Calcestruzzo

STRUTTURE DI DESTINAZIONE	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA
Per strutture non armate o a bassa percentuale di armatura	C8/10
Per strutture semplicemente armate	C16/20
Per strutture precomprese	C28/35



## Prove a rottura su provini

Cilindrici  $[f_{ck}]$

Cubici  $[R_{ck}]$

fonte: ATECAP

CLASSE DI RESISTENZA			
C8/10			
C12/15			
C16/20			
C20/25			
C25/30	XC1	XC2	XF2 XF3
C28/35	XC3	XD1	XF4 XA1
C32/40	XC4	XS1	XD2 XF1 XA2
C35/45	XS2	XS3	XD3 XA3
C40/50			
C45/55			
C50/60			Prequalifica + FPC
C55/67			
C60/75			
C70/85			
C80/95			Autorizzazione STC su parere del Cons. Sup. LL.PP.
C90/105			



# DURABILITA' del CALCESTRUZZO

Per **Durabilità** si intende la capacità di un materiale di conservare nel tempo le prestazioni iniziali in relazione all'ambiente in cui si trova.

- La **Durabilità** di un calcestruzzo va assicurare alla struttura per la sua una **vita nominale** (fissata convenzionalmente in **50 anni**), in funzione delle condizioni ambientali ed agli interventi di **manutenzione** a cui sarà sottoposta.
- La **Durabilità'** di una struttura in calcestruzzo va **progettata** come avviene per il dimensionamento statico dell'opera.

In tema di durabilità le NTC 2008 ne prescrivono il rispetto in termini di requisiti prestazionali, rimandando per gli aspetti applicativi a specifiche normative di riferimento.

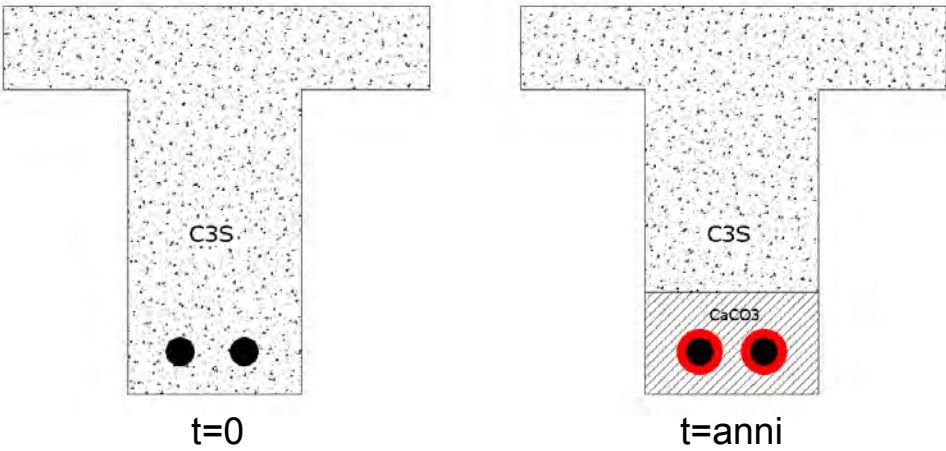


# DURABILITA' del CALCESTRUZZO

- **Cause di degrado**
- **Carbonatazione (anidride carbonica)**
- il silicato tricalcico (C3S), che è uno dei componenti del cemento idratato, avvolge le armature mantenendo un ambiente basico ( $\text{PH} > 12$ ) che inibisce l'ossidazione delle armature. Reagendo con l'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e con l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) il C3S si trasforma in idrossido di calcio e poi in carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) con un sostanziale abbassamento del PH attorno alle armature ( $\text{PH} < 9$ ). Queste nuove condizioni non sono più in grado di inibire la reazione del ferro con l'acqua e l'ossigeno, che dà luogo alla formazione di ruggine che avviene con aumento di volume. La pressione così esercitata dall'aumento di volume può fessurare il calcestruzzo dal lato del copriferro, con aggravio del degrado sino al distacco delle parti carbonatate. Il grado di carbonatazione si misura con il viraggio della fenoftaleina che vira al rosso per  $\text{PH} < 9$  e vira al bianco nelle zone carbonatate.
- **Attacco da cloruri (di origine marina e di origine non marina)**
- **Cicli di gelo e disgelo ed utilizzo di sali disgelanti**
- **Attacchi chimici**



**Carbonatazione  
del calcestruzzo**



**Prova di viraggio  
alla fenolftaleina**

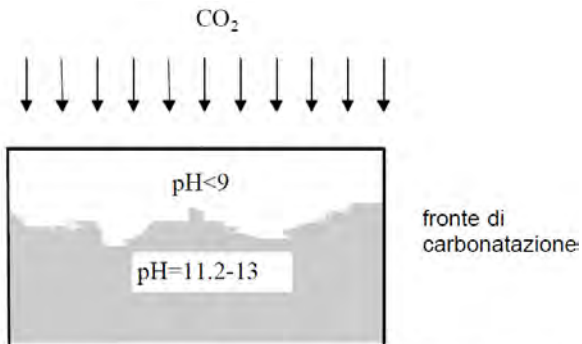
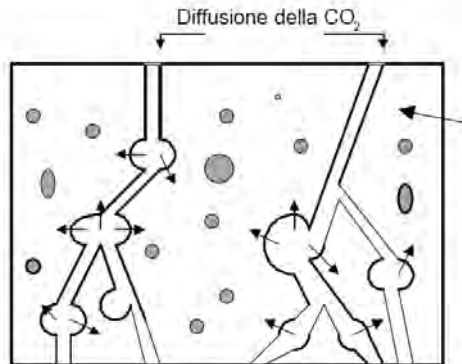


Fig. 1. Rappresentazione schematica del processo di carbonatazione.



viraggio al rosso = silicato tricalcico  
viraggio al bianco = carbonato di calcio



# Classi di Esposizione

Classe di Esposizione	Tipo di Ambiente	Tipo di Struttura	Numero di sottoclassi
X0	Nessun rischio di corrosione (interni di edifici con UR molto bassa)	Non armata e armata	1
XC	Corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione	Armata	4
XS	Corrosione delle armature promossa dai cloruri delle acqua di mare	Armata	3
XD	Corrosione delle armature promossa dai cloruri di origine non marina	Armata	3
XF	Degrado del calcestruzzo per cicli di gelo-disgelo	Non armata e armata	4
XA	Attacco chimico del calcestruzzo (incluso quello promosso dall'acqua di mare)	Non armata e armata	3



# Classi di Esposizione XC: Carbonatazione

Classe di Esposizione	Ambiente	Esempi si strutture che si trovano nella classe di esposizione	Rapp. a/c max	Rck minima (MPa)	Dosaggio minimo di cemento (kg/mc)	Spessore minimo del copriferro (c.a.)
XC1	Asciutto	- interni di edifici con bassa U.R.	0,65	25	280	15
XC2	Bagnato raramente asciutto	-strutture idrauliche - fondazioni e strutture interrato	0,60	30	280	25
XC3	Moderatamente umido	-Interni di edifici con umidità relativa moderata/alta - strutture esterne protette dal contatto diretto con la pioggia	0,55	37	280	25
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	- strutture esterne esposte all'acqua piovana	0,50	37	300	30



# Classi di Esposizione XS

## Cloruri di origine marina

Classe di Esposizione	Ambiente	Esempi si strutture che si trovano nella classe di esposizione	Rapp. a/c max	Rck minima (MPa)	Dosaggio minimo di cemento (kg/mc)	Spessore minimo del copriferro (c.a.)
XS1	Umidità moderata	Strutture in prossimità delle coste esposte al trascinamento eolico dell'acqua (aerosol)	0,50	37	300	45
XS2	Bagnato	Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare	0,45	45	320	45
XS3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea)	0,45	45	340	45



# Classi di Esposizione XD

## Cloruri di origine non marina

Classe di Esposizione	Ambiente	Esempi si strutture che si trovano nella classe di esposizione	Rapp. a/c max	Rck minima (MPa)	Dosaggio minimo di cemento (kg/mc)	Spessore minimo del copriferro (c.a.)
XD1	Umidità moderata	Strutture raramente a diretto contatto superficiale di spruzzi d'acqua.	0,55	37	300	45
XD2	Bagnato raramente asciutto	- piscine natatorie - Vasche trattamento acque industriali contenenti cloro -Parti di ponte	0,55	37	300	45
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	- pavimenti esterni esposti occasionalmente ad acque salate - pavimenti e solai di parcheggi coperti	0,45	37	320	45



# Classi di Esposizione XF

## Gelo-disgelo e Sali disgelanti

Classe di Esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe di esposizione	Minimo volume di aria (%)	Rapp. a/c max	Rck minima (MPa)	Dosaggio minimo di cemento (kg/mc)	Spessore minimo del copriferro (c.a.)
XF1	Moderata saturazione con acqua in assenza di Sali disgelanti	Superfici verticali esposte alla pioggia ed al gelo	- (4)	0,55	37	300	30
XF2	Moderata saturazione con acqua in presenza di Sali disgelanti	Superfici verticali di strutture stradali esposte a gelo e spruzzi contenenti sali disgelanti	4	0,55 (0,50)	30 (40)	300 (320)	45
XF3	Elevata saturazione con acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali esposte alla pioggia ed al gelo	4	0,50	37 (40)	320	30
XF4	Elevata saturazione con acqua in presenza di Sali disgelanti	Superfici orizzontali e strutture verticali stradali esposte direttamente ai sali disgelanti	4	0,45	37 (45)	340 (350)	45



# Classi di Esposizione XA

## Ambienti chimicamente aggressivi

Classe di Esposizione	Ambiente	Rapp. a/c max	Rck minima (MPa)	Dosaggio minimo di cemento (kg/mc)	Spessore minimo del copriferro (c.a.)
XA1	Debolmente aggressivo	0,55	37	300	25
XA2	Moderatamente aggressivo	0,50	37 (40)	320	25
XA3	Fortemente aggressivo	0,45	45	360 (350)	25



# Durabilità del calcestruzzo

## Riepilogo delle classi di esposizione e dei requisiti per la durabilità

	NESSUN RISCHIO	CORROSIONE DELLE ARMATURE INDOTTA DALLA CARBONATAZIONE				CORROSIONE DELLE ARMATURE INDOTTA DAI CLORURI						ATTACCO DAI CICLI DI GELO/ DISGELO				AMBIENTE AGGRESSIVO PER ATTACCO CHIMICO		
						ACQUA DI MARE			CLORURI PROVENIENTI DA ALTRE FONTI									
						XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3							
MASSIMO RAPPORTO a/c	-	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45			
MINIMA CLASSE DI RESISTENZA	C12/15	C25/30	C28/35	C32/40	C32/40	C35/45	C28/35	C32/40	C35/45	C32/40	C25/30	C28/35	C28/35	C32/40	C35/45			
MINIMO CONTENUTO IN CEMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )		300	320	340	340	360	320	340	360	320	340	360	320	340	360			
CONTENUTO MINIMO IN ARIA (%)											3,0 (a)							
ALTRI REQUISITI											AGGREGATI CONFORMI ALLA UNI EN 12620 DI ADEGUATA RESISTENZA AL GELO/DISGELO				È RICHIESTO L'IMPIEGO DI CEMENTI RESISTENTI AI SOLFATI (b)			

(a) QUANDO IL CALCESTRUZZO NON CONTIENE ARIA AGGIUNTA, LE SUE PRESTAZIONI DEVONO ESSERE VERIFICATE RISPETTO AD UN CALCESTRUZZO AERATO PER IL QUALE È PROVATA LA RESISTENZA AL GELO/DISGELO, DA DETERMINARSI SECONDO UNI 7087, PER LA RELATIVA CLASSE DI ESPOSIZIONE.

(b) QUALORA LA PRESENZA DI SOLFATI COMPORTI LE CLASSI DI ESPOSIZIONE XA2 E XA3 È ESSENZIALE UTILIZZARE UN CEMENTO RESISTENTE AI SOLFATI SECONDO LA UNI 9156.

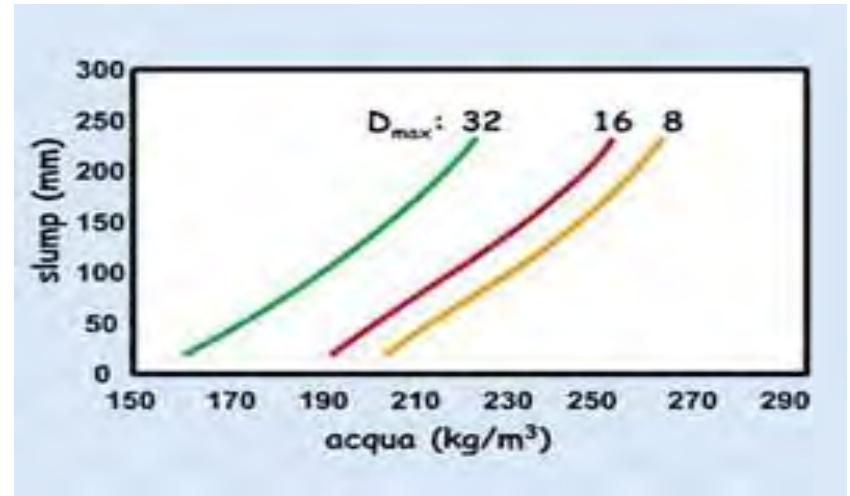




# MIX DESIGN - Correlazioni fondamentali

## 1. Valutazione del quantitativo dell'acqua d'impasto

(slump,  $d_{max}$  inerte)  $\rightarrow$  **a** (acqua)  
additivi superfluidificanti (rid%)

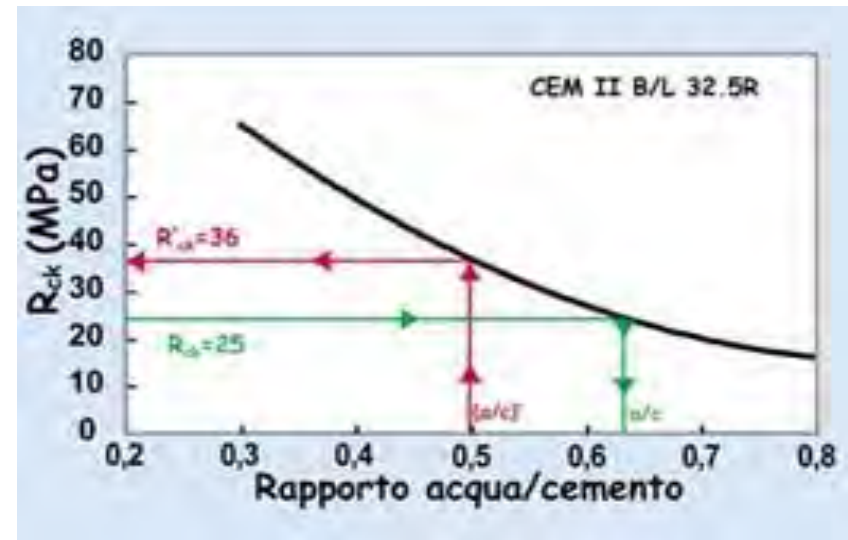


## 2. Valutazione del rapporto acqua/cemento

(resistenza meccanica, durabilità, impermeabilità, ritiro, ecc)



$$r = (a/c)_{\min} \rightarrow c = a/r \text{ (cemento)}$$





## Correlazioni fondamentali:

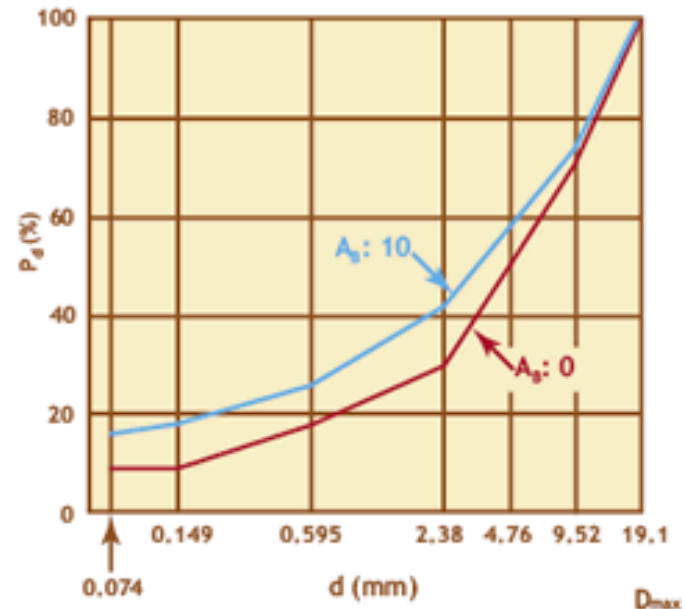
### 3. Valutazione del peso degli inerti

$$V_i = 1000 - a - a' - c/3.1$$

$$P_i = \gamma_i V_i \quad (\text{peso totale inerti})$$



### 4. Individuazione dell'assortimento granulometrico degli inerti (metodo di Fuller, ecc.)



# Esempio di Mix – Design

## Requisiti allo stato fresco

- Classe di consistenza al getto = S4
- Diametro max inerti = 16 mm a spigoli vivi (frantumato)
- Impiego di superfluidificanti all'1% (rid. H<sub>2</sub>O del 20%)

acqua richiesta per la classe S4 = 230 l/mc (s.s.a.)

riduzione  $\cong$  20% per uso superfl. = 45 l/mc

acqua di impasto = 185 l/mc

**a = 185 l/mc**

# Esempio di Mix – Design

## Requisiti allo stato indurito

1) Calcestruzzo classe C35 realizzato con Cemento Portland 42.5 R CEM II-A/L 42.5 R

$$R_{ck} = 35.0 \text{ MPa}$$

$$R_{cm} = 38.5 \text{ Mpa} \quad (\text{controllo tipo A}) \quad > \quad a/c = 0.58$$

2) Calcestruzzo impermeabile  $> a/c = 0.55$

3) Classe di esposizione XC4  $> a/c = 0.50$

$$\mathbf{a/c \text{ min} = 0.50}$$

# Esempio di Mix - Design

- Classe di consistenza al getto = S4
- Diametro max inerti = 16 mm a spigoli vivi (frantumato)
- Impiego di superfluidificanti all'1% (rid. H<sub>2</sub>O del 20%)

acqua richiesta per la classe S4 = 230 l/mc (s.s.a.)

riduzione  $\cong$  20% per uso superfl. = 45 l/mc

acqua di impasto = 185 l/mc

rapporto acqua/cemento = 0.50 >(-)

cemento II-A/L = 185/0.5 = 370 kg/mc

**a = 185 l/mc**

**c = 370 kg/mc**

# Esempio di Mix – Design

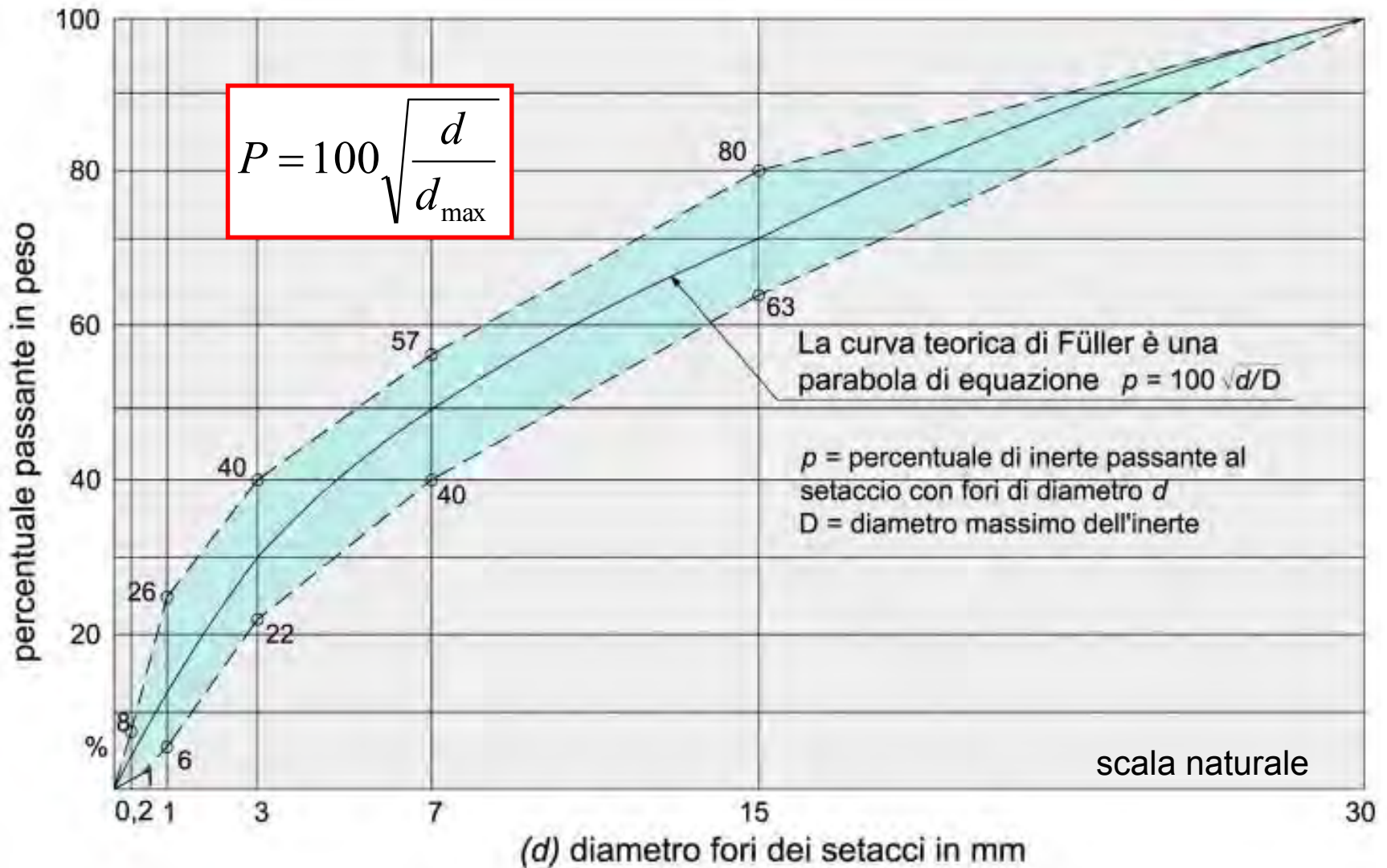
## Requisiti degli Aggregati

- Volume = 1000 litri/mc
- $1000 = V_a + V_c + V_i + V_a'$  (aria intrappolata 2%)
- $1000 = 185/1.0 + 370/3.1 + V_i + 20$
- Volume degli inerti  $V_i = 675$  l/mc
- Peso degli inerti  $P_i = 675 \times 2.65 = 1790$  kg/mc

**Peso specif. del calcestr. =  $185+370+1790 = 2345$  kg/mc**

# Assortimento degli inerti (Max. densità secca)

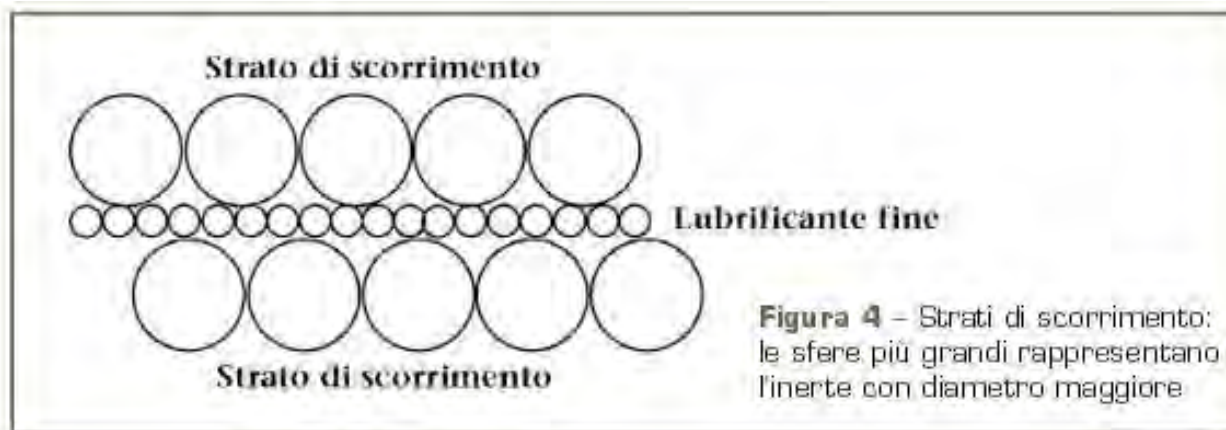
(matrice chiusa – conglomerato compatto)



# Assortimento degli inerti e lavorabilità

*Percentuali di filler (A) in funzione dell'inerte e della classe di consistenza*

<i>Natura dell'inerte</i>	Consistenza		
	Densa (S2)	Plastica (S3)	Fluida (S4)
Alluvionale	8	10	12
Frantumato	10	12	14



***Effetto lubrificante delle particelle fini (filler) sullo scorrimento degli inerti***



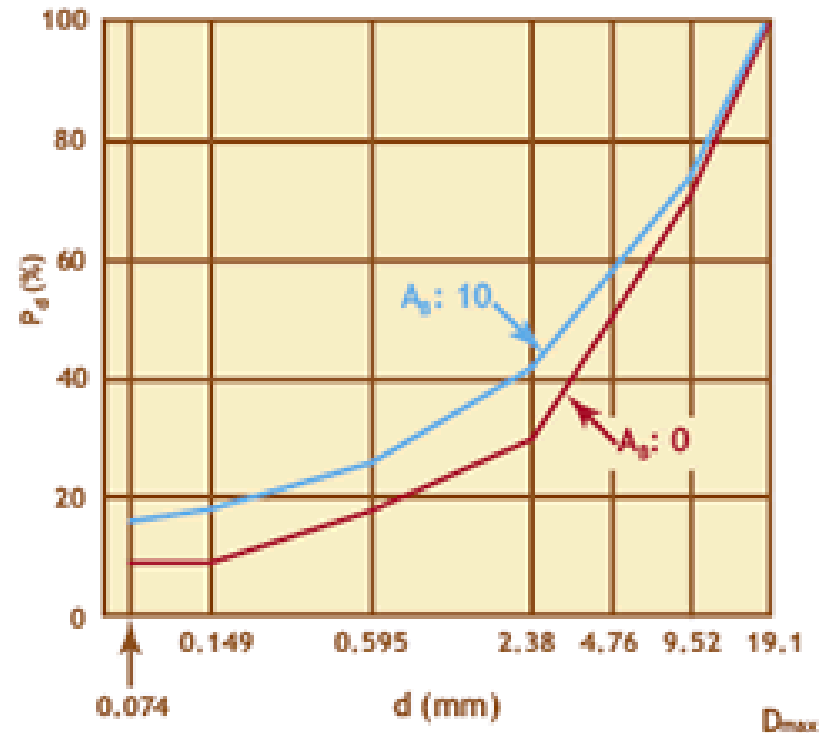
# Assortimento degli inerti

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}$$

**Fuller (A=0)**

$$P = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}$$

**Bolomey**



$$P = 100 \cdot \frac{A - c + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}}{100 - c}$$

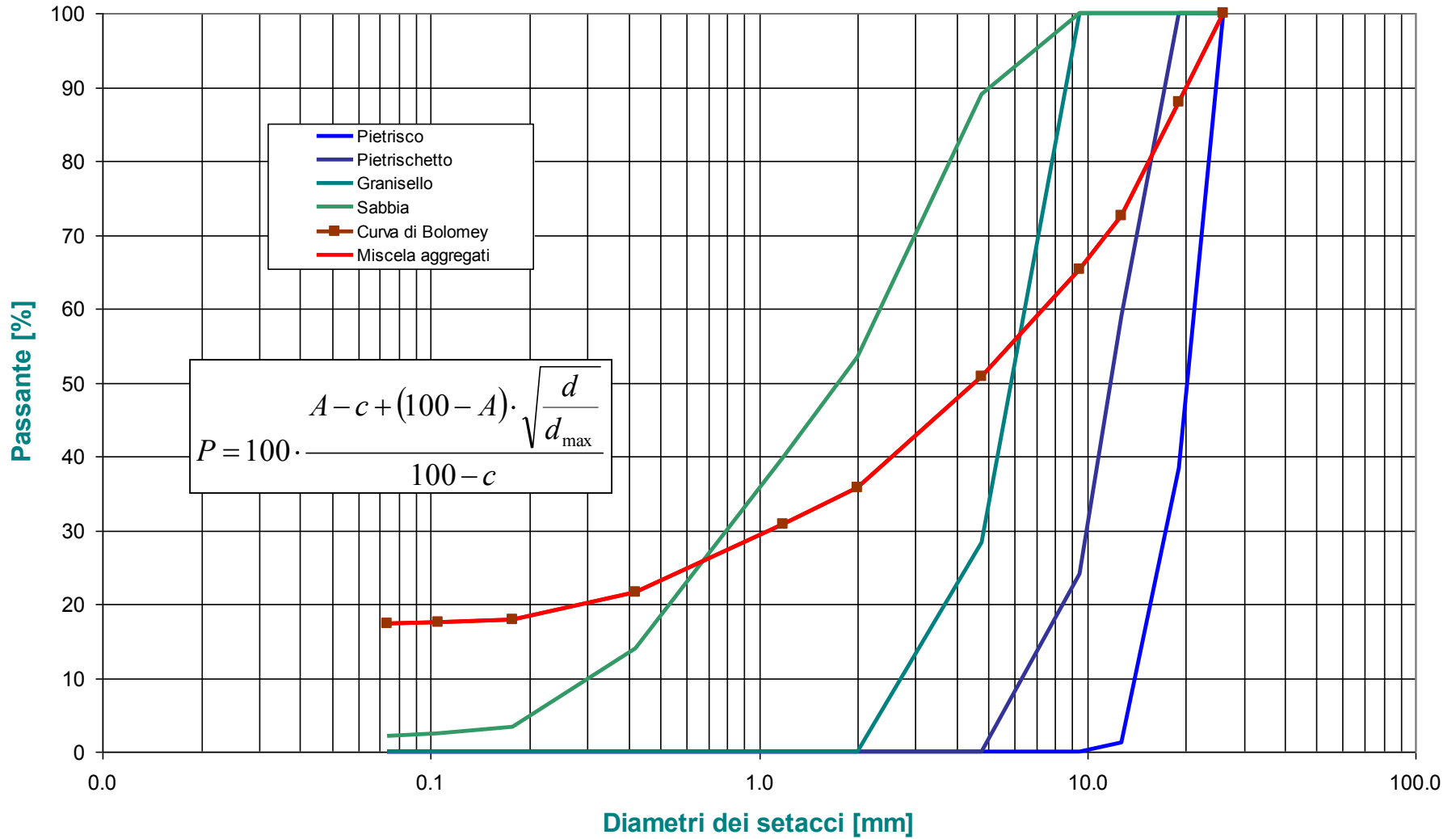
**A = percentuale di filler**

**c = percentuale di cemento**

$$c = 100 \cdot \frac{C}{C + I}$$

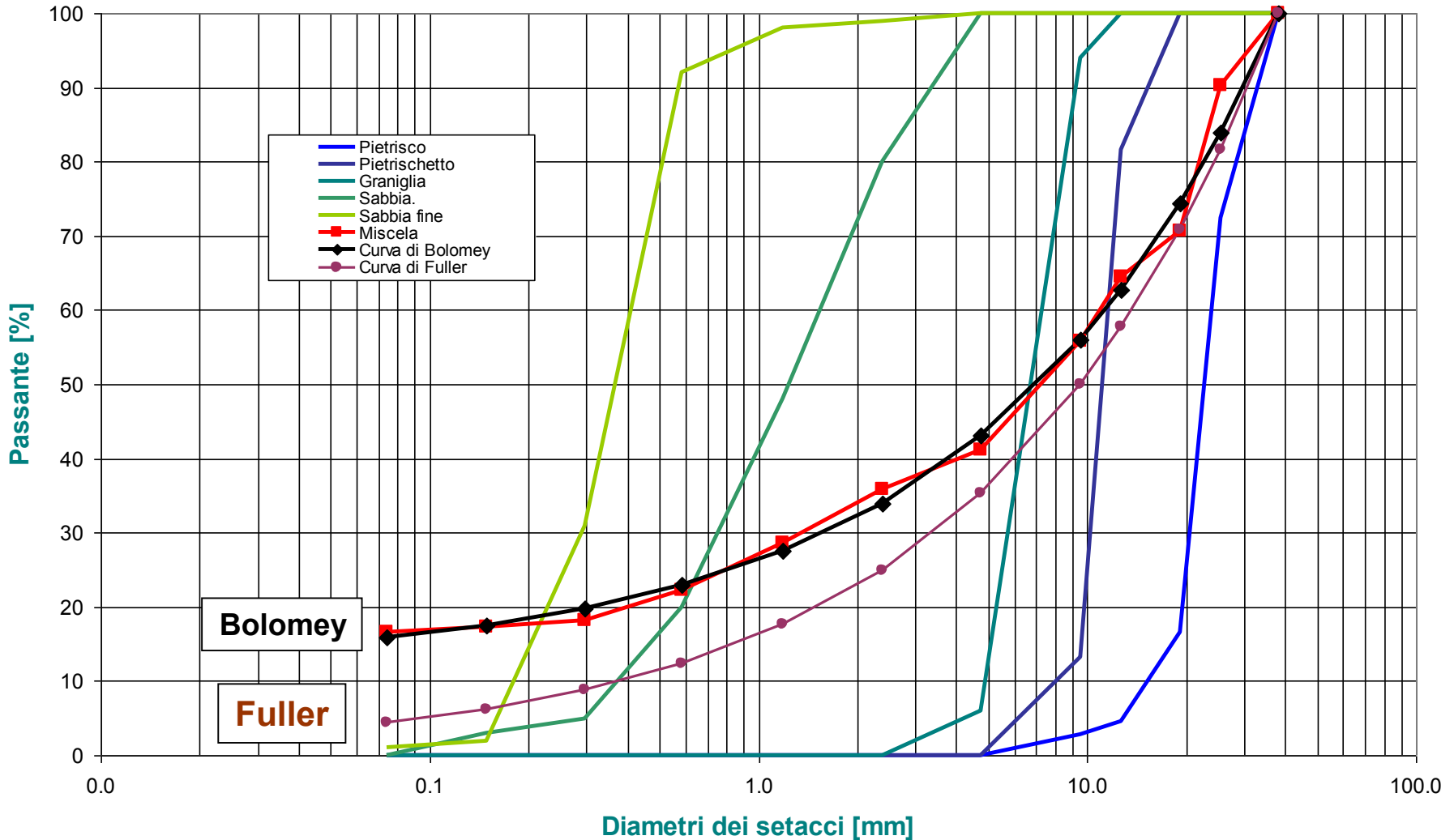
**Bolomey  
modificato**

# Curva di Bolomey e Mix Design degli Aggregati



**Mix design degli inerti con 4 aggregati**

# Curva di Bolomey (A=12) e Mix Design degli Aggregati



Mix design degli inerti con 5 aggregati

M  
I  
X  
  
D  
E  
S  
I  
G  
N

I  
M  
P  
I  
A  
N  
T  
O

<b>DATI MIX DESIGN CALCESTRUZZO</b>		
<b>C35 XC4 S4 D16</b>		
Rapporto acqua/cemento (a/c)	<b>0.50</b>	(-)
<b>Composizione calcestruzzo (in peso)</b>		
Acqua (superfluidificante 1%)	<b>185</b>	kg/m <sup>3</sup>
Cemento	<b>370</b>	kg/m <sup>3</sup>
Aggregati	<b>1790</b>	kg/m <sup>3</sup>
<b>Calcestruzzo</b>	<b>2345</b>	kg/m <sup>3</sup>
Percentuale cemento/frazione secca	<b>17.1</b>	%
<b>Composizione miscela di aggregati</b>		
Pietrisco	<b>417</b>	kg/m <sup>3</sup>
Pietrischetto	<b>433</b>	kg/m <sup>3</sup>
Sabbia grossa	<b>175</b>	kg/m <sup>3</sup>
Sabbia fine	<b>775</b>	kg/m <sup>3</sup>
<b>Aggregati</b>	<b>1.790</b>	kg/m <sup>3</sup>



# Calcestruzzo a prestazione garantita (UNI EN 206-1)

## Requisiti di base (obbligatori)

- Classe di resistenza caratteristica ( $R_{ck}$ ); (C30/35)
- Classe di esposizione (XC-XD-XS-XF-XA); (XC4)
- Classe di consistenza (Slump-Test); (S4)
- Diametro massimo nominale dell'aggregato ( $D_{max}$ ). (16 mm)

## Requisiti aggiuntivi

- Classe e tipo di cemento (CEM); CEM II-A
- Tipo di Aggiunte; L / LL
- Impermeabilità;  $a/c < 0.55$
- Classe di contenuto di cloro  $Cl < 0.20$

# Descrizione del calcestruzzo nel

## DOCUMENTO DI CONSEGNA IN CANTIERE (DDT)

- Esempio: *Cls* **C35 XC4 S4 D16 CEM II/A-L 42,5 R**

**C** è il simbolo che indica la “*Classe di Resistenza a Compressione*”

**35** – è il numero che indica la **resistenza meccanica** in N/mm<sup>2</sup>

**XC4** – è la sigla che indica la *Classe di Esposizione Ambientale*

**S4** – è il simbolo che indica la *Classe di consistenza*

**D16** - indica il *Diametro massimo dell'inerte*

**CEM II/A-L** - indica il tipo di cemento

**42.5 R** - indica la *Classe di resistenza del cemento*

## XC - CORROSIONE INDOTTA DA CARBONATAZIONE

CALCESTRUZZI DURABILI A PRESTAZIONE GARANTITA PER IMPIEGHI STRUTTURALI

prezzi per slump S4 e Ø max 31,5 mm

a/c	≤0,45	≤0,50	≤0,50	≤0,55	≤0,60
Classe di esposizione	Rck45	Rck40 <sup>1</sup>	Rck37	Rck35 <sup>1</sup>	Rck30
XC1-XC2				143,00	138,00
XC3	155,50	148,00	145,50		
XC4					

<sup>1</sup> Rck<sub>min</sub> che soddisfano la UNI 11104: **XC3**: Rck 35, **XC4**: Rck 40

## XA - ATTACCO CHIMICO

CALCESTRUZZI DURABILI A PRESTAZIONE GARANTITA PER IMPIEGHI STRUTTURALI

prezzi per slump S4 e Ø max 31,5 mm

a/c	≤0,45	≤0,50	≤0,50	≤0,55	≤0,55
Classe di esposizione	Rck45	Rck40	Rck37	Rck37	Rck35 <sup>1</sup>
XA1	158,50	151,00		148,50	146,00
XA2 *		158,00	155,50		
XA3 *	quotazione su richiesta				

<sup>1</sup> Rck<sub>min</sub> che soddisfano la UNI 11104: **XA1**: Rck 35

\* Quando i solfati nell'ambiente comportano classi di esposizione XA2 e XA3, è essenziale utilizzare cemento resistente ai solfati conforme alla UNI EN 197-1 o alle norme nazionali complementari

## XD - CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI ESCLUSI QUELLI PROVENIENTI DALL'ACQUA DI MARE

CALCESTRUZZI DURABILI A PRESTAZIONE GARANTITA PER IMPIEGHI STRUTTURALI

prezzi per slump S4 e Ø max 31,5 mm

a/c	≤0,45	≤0,50	≤0,55	≤0,55
Classe di esposizione	Rck45	Rck40 <sup>1</sup>	Rck37	Rck35 <sup>1</sup>
XD1				145,00
XD2	157,50	150,00	147,50	
XD3				

<sup>1</sup> Rck<sub>min</sub> che soddisfano la UNI 11104: **XD1**: Rck 35, **XD2**: Rck 40

## XF - ATTACCO DEL GELO/DISGELO CON O SENZA AGENTI ANTIGELO

CALCESTRUZZI DURABILI A PRESTAZIONE GARANTITA PER IMPIEGHI STRUTTURALI

prezzi per slump S4 e Ø max 31,5 mm

a/c	≤0,45	≤0,50	≤0,55		
Classe di esposizione	Rck45	Rck40	Rck37		
XF1	158,50	151,00	148,50		
a/c	≤0,45	≤0,45	≤0,45	≤0,45	≤0,55
Classe di esposizione	Rck45	Rck40	Rck37	Rck35 <sup>1</sup>	Rck30 <sup>1</sup>
XF2 °				153,00	148,00
XF3 °	quotazione su richiesta	158,00	155,50		
XF4 °					

<sup>1</sup> Rck<sub>min</sub> che soddisfano la UNI 11104: **XF3**: Rck 30, **XF4**: Rck 35

\* Impiego di aggregati in conformità alla UNI EN 12620 con sufficiente resistenza al gelo/disgelo

° Prevista l'aggiunta di aria

## XS - CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI PRESENTI NELL'ACQUA DI MARE

CALCESTRUZZI DURABILI A PRESTAZIONE GARANTITA PER IMPIEGHI STRUTTURALI

prezzi per slump S4 e Ø max 31,5 mm

a/c	≤0,45	≤0,50	≤0,50
Classe di esposizione	Rck45	Rck40	Rck37
XS1		150,00	147,50
XS2-XS3	157,50		

## XO - ASSENZA DI RISCHIO DI CORROSIONE O ATTACCO

CALCESTRUZZI DURABILI A PRESTAZIONE GARANTITA PER IMPIEGHI STRUTTURALI

prezzi per slump S4 e Ø max 31,5 mm

a/c	PER IMPIEGHI STRUTTURALI	PER IMPIEGHI NON STRUTTURALI		
	≤0,65	-	-	-
Classe di esposizione	Rck25 <sup>1</sup>	Rck20	Rck15	Rck10
X0	136,00	132,00	129,00	
-				126,00

<sup>1</sup> Rck<sub>min</sub> che soddisfa la UNI EN 206: **XC1**: Rck 25

# RITIRO DEL CALCESTRUZZO

1) **Ritiro autogeno** [da inizio a fine presa]

*Trae origine dalla reazione di idratazione del cemento in quanto il volume occupato dai prodotti è inferiore a quello dei reagenti.*

2) **Ritiro plastico** [da fine presa sino all'indurimento]

*Si manifesta nelle prime ore quando la miscela è ancora allo stato plastico e può dare luogo a fessurazione in presenza di forte evaporazione a causa della modesta resistenza iniziale a trazione del cls. Si contrasta con teli di protezioni, bagnatura della superficie, aggiunta di fibre e con giunti di contrazione*

3) **Ritiro igrometrico** [dopo alcuni mesi dall'indurimento]

*Si manifesta nel tempo a seguito di suzione nell'acqua non legata interstiziale in condizione di parziale saturazione. Si contrasta con bassi rapporti A/C, alti rapporti I/C, aggiunta di fibre all'impasto ed utilizzo di additivi superfluidificanti SRA.*

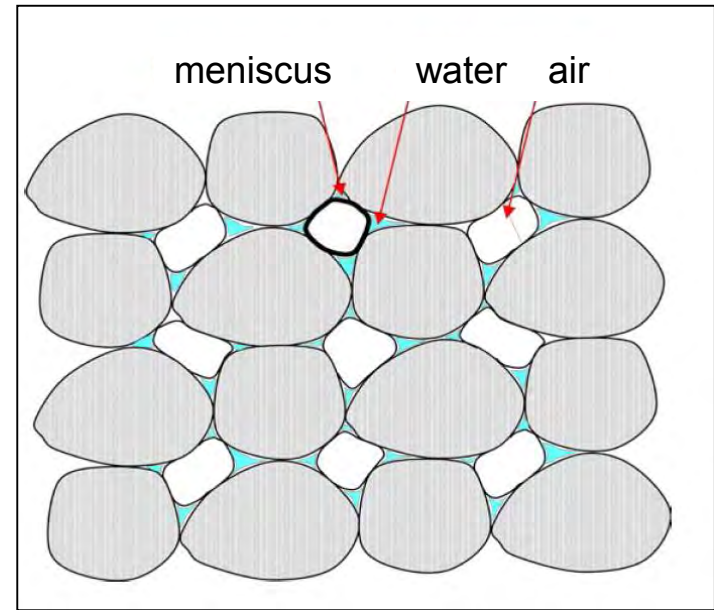
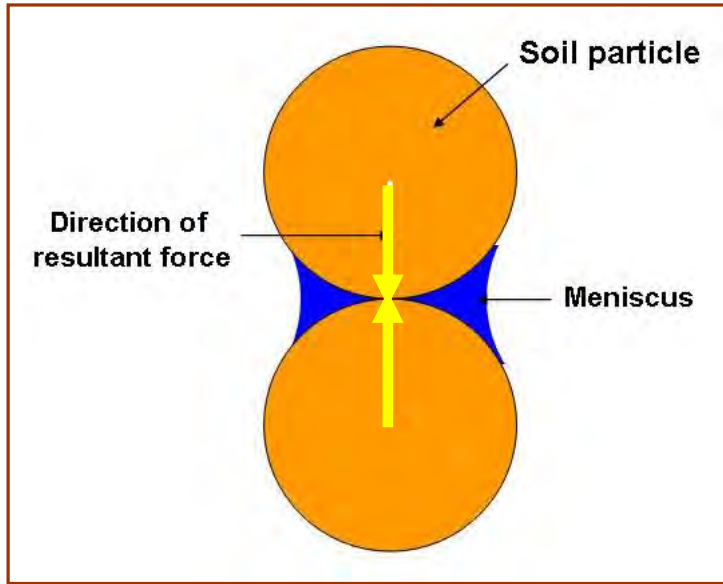


# EFFETTI DEL RITIRO IGROMETRICO NELLE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO



Effetti indotti dalla evaporazione dell'acqua interstiziale in condizioni di parziale saturazione. Il meccanismo che si manifesta nelle pavimentazioni industriali in calcestruzzo è il medesimo che si attiva nei terreni coesivi a grana fine ed è legato alla tensione superficiale nella acqua libera interstiziale che cresce al ridursi del grado di saturazione

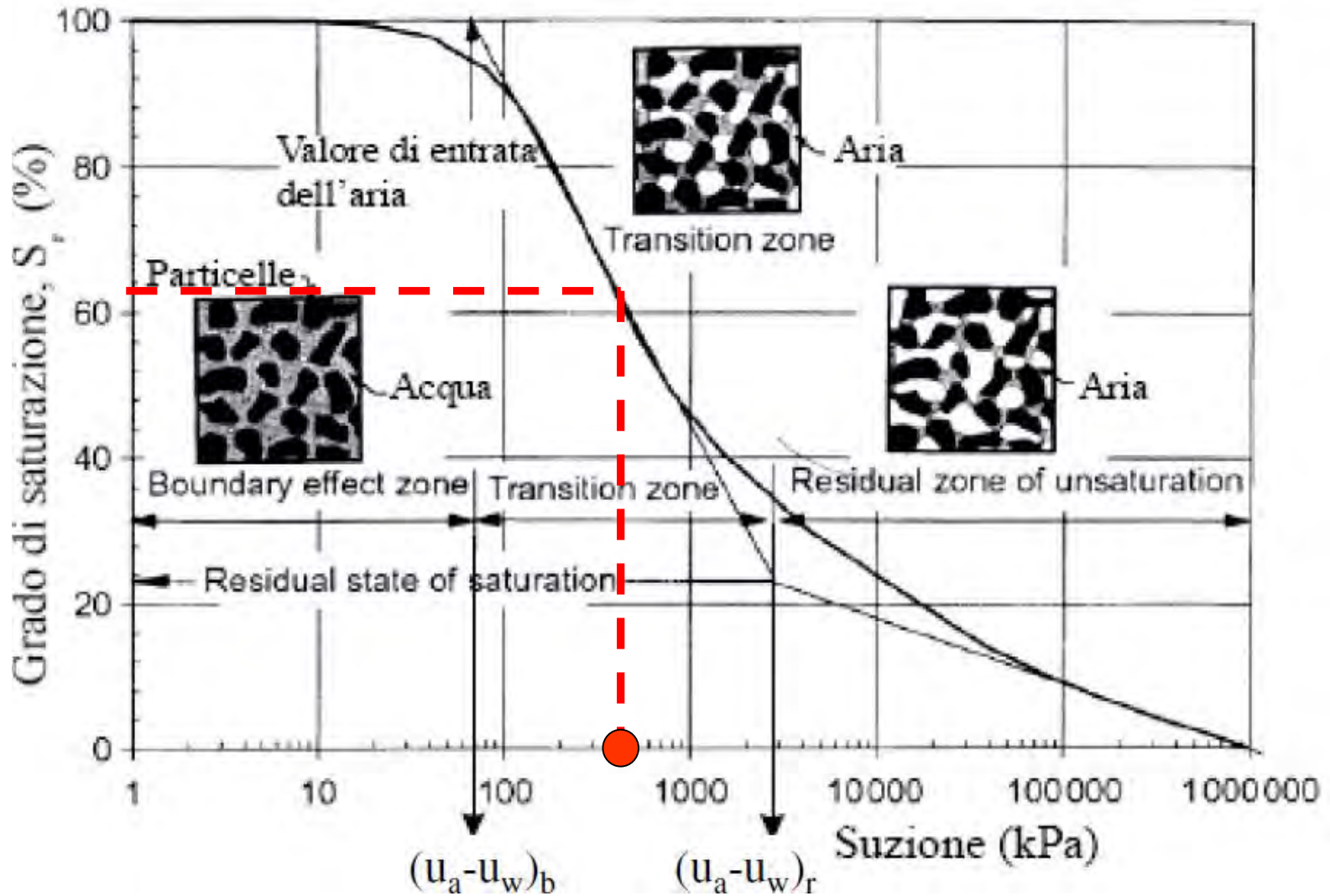
# SUZIONE



La **Suzione** è una pressione negativa che agisce tra l'acqua libera ed i grani solidi. E' indotta per « effetto ventosa» dalla tensione superficiale nell'acqua. Si attiva in condizioni di **parziale saturazione** quando l'acqua libera tende a legarsi allo scheletro solido evitando di essere assorbita dall'aria calda insatura di vapore acqueo che lambisce la superficie. Queste forze producono un forte serraggio ed una riduzione di volume che se impedita provoca fessurazione.



# Suzione in condizione di parziale saturazione

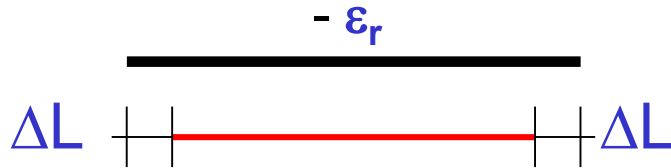


Saturazione

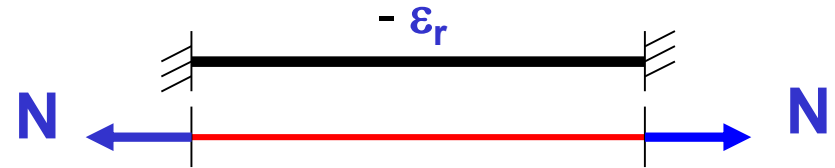
Suzione →

Essiccamento

# Modello Meccanico Equivalente (riduzione di volume)



$$\Delta L = -\varepsilon_r L / 2$$
$$N = 0$$



$$N = EA \varepsilon_r$$
$$\Delta L = 0$$

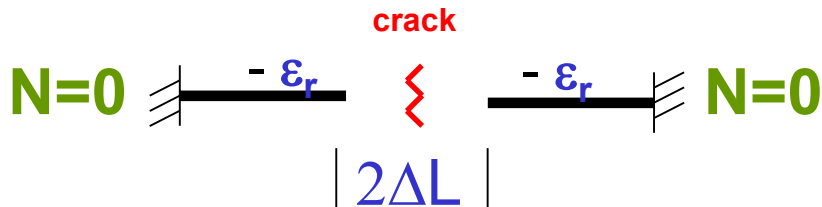
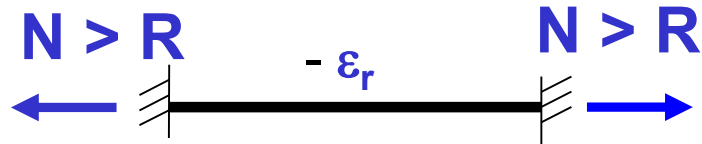
Asta **non vincolata** soggetta  
ad una contrazione **libera**  
(riduzione di lunghezza)

Asta non sollecitata  
Accorciamento max

Asta **vincolata** soggetta  
ad una contrazione  
(riduz. lung. impedita)

Asta in trazione  
Accorciamento nullo

# Modello Meccanico Equivalente (riduzione di volume)

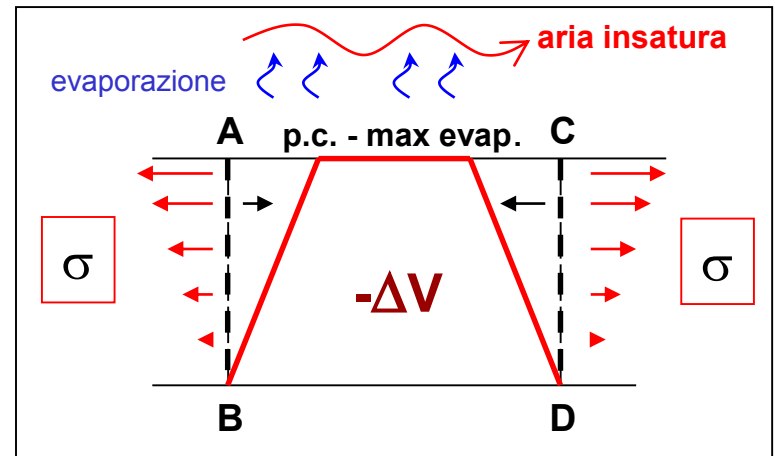


Quando la **contrazione** è **impedita** insorge uno sforzo di **trazione (N)**.

Se esso supera la **resistenza (R)** del materiale si produce la **fessurazione**

Si verifica poi lo **scarico tensionale** ed il **libero accorciamento** dell'asta

Pavimentazione  
Superficie estesa



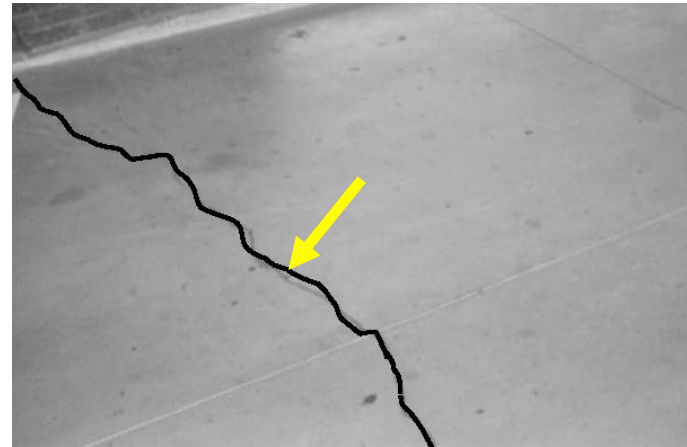
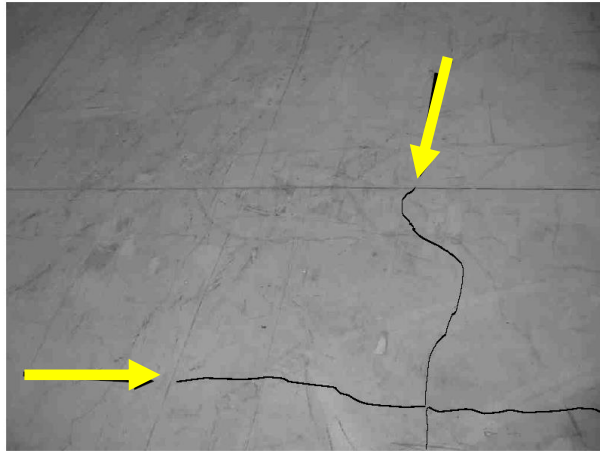
Elemento di volume  
soggetto a trazione  
indotta da suzione  
(A-B ; C-D piani di simmetria  
e di fessurazione)





Effetti della riduzione  
di volume per suzione

Se la **variazione volumetrica è impedita** insorgono tensioni normali di **trazione** che quando superano la **resistenza a trazione** producono **fessurazione** (tension cracks).



## **Misure contro il ritiro – Requisiti del cls**

**Adottare un basso rapporto acqua/cemento (A/C)**

**Adottare un elevato rapporto inerti/cemento (I/C)**

**Impiegare fibre in materiale sintetico od in acciaio per aumentare la resistenza a trazione del calcestruzzo**

**Impiegare additivi SRA (Shrinkage Reducing Admixtures) riduttori della tensione superficiale nell'acqua interstiziale.**

## **Controlli Non Distruttivi nel Calcestruzzo**

**Prove Sclerometriche  
Prove Ultrasoniche**

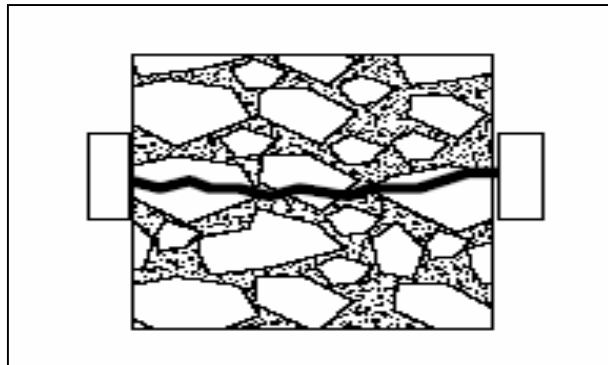
**Prove combinate  
( Metodo Sonreb )**



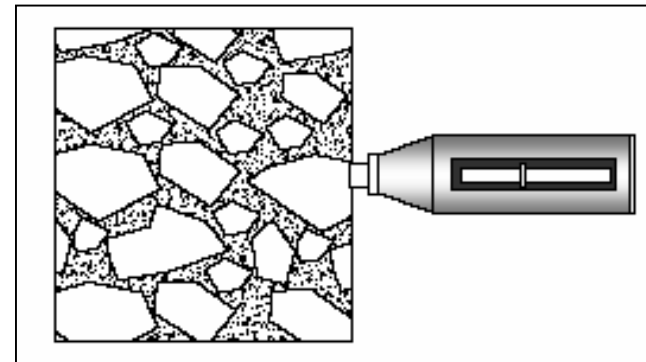
# STRUTTURE IN C.A. - METODO SONREB

Valori medi utilizzati per esprimere un giudizio sulla qualità del calcestruzzo in opera

<i>Qualità del calcestruzzo</i>	<i>Velocità (m/sec)</i>	<i>Indice di Rimbalzo</i>
Scadente	$3000 < V < 3400$	$20 < I < 25$
Discreta	$3400 < V < 3900$	$25 < I < 35$
Buona	$3900 < V < 4500$	$35 < I < 50$
Ottima	$V > 4500$	$I > 50$



Velocità di propagazione degli ultrasuoni



Misura dell'indice di rimbalzo sclerometrico

**SonReb = Sonic and Rebound**

# STRUTTURE IN C.A. - METODO SONREB



*Fig. 1 - Sclerometro e strumentazione di misura delle velocità ultrasoniche*



*Fig. 2. a) Pressa per prove di schiacciamento e prova sclerometrica; b) prova ultrasonica*

# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

## Validazione - Sperimentazione

Tab. I – Composizione delle miscele utilizzate nella sperimentazione

Composizione per m <sup>3</sup> di cls	Miscela Cementizia			
	1	2	3	4
	Parametri di Progetto			
Cemento	CEM II-A/L 42.5 R	CEM II-A/L 42.5 R	CEM II-A/L 42.5 R	CEM II-A/L 42.5 R
Rapporto A/C	0.7	0.6	0.5	0.4
Consistenza	S4	S4	S4	S4
Diametro max	15	15	15	15
	Dosaggio [kg/m <sup>3</sup> ]			
Acqua	190	190	190	190
Cemento	270	315	380	475
Inerti	1855	1815	1760	1675
	Peso Miscela [kg/m <sup>3</sup> ]			
Peso specifico	2315	2320	2330	2340

Composizione delle miscele di calcestruzzo

# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

## CAMPIONAMENTO

### Campionamento A

Sigla Provino	Rapporto A/C	V (m/sec)	I (-)	R (MPa)
A1	0.7	<b>4138</b>	<b>39.8</b>	<b>26.6</b>
A2	0.7	<b>4322</b>	<b>39.4</b>	<b>28.7</b>
A3	0.7	<b>3983</b>	<b>40.2</b>	<b>27.8</b>
A4	0.7	<b>4117</b>	<b>39.9</b>	<b>29.3</b>
A5	0.7	<b>4214</b>	<b>40.0</b>	<b>27.7</b>
A6	0.7	<b>4055</b>	<b>40.8</b>	<b>28.8</b>
Valori medi		<b>4138</b>	<b>40.0</b>	<b>28.2</b>

### Campionamento C

Sigla Provino	Rapporto A/C	V (m/sec)	I (-)	R (MPa)
C1	0.5	<b>4487</b>	<b>42.3</b>	<b>49.5</b>
C2	0.5	<b>4484</b>	<b>46.9</b>	<b>48.3</b>
C3	0.5	<b>4377</b>	<b>46.7</b>	<b>47.5</b>
C4	0.5	<b>4343</b>	<b>44.1</b>	<b>47</b>
C5	0.5	<b>4297</b>	<b>46.3</b>	<b>49.5</b>
C6	0.5	<b>4314</b>	<b>47.2</b>	<b>48.8</b>
Valori medi		<b>4384</b>	<b>45.6</b>	<b>48.4</b>

### Campionamento B

Sigla Provino	Rapporto A/C	V (m/sec)	I (-)	R (MPa)
B1	0.6	<b>4314</b>	<b>41.7</b>	<b>39.3</b>
B2	0.6	<b>4314</b>	<b>40.9</b>	<b>39.1</b>
B3	0.6	<b>4308</b>	<b>40.8</b>	<b>39.5</b>
B4	0.6	<b>4343</b>	<b>41.6</b>	<b>37.8</b>
B5	0.6	<b>4361</b>	<b>41.7</b>	<b>36.5</b>
B6	0.6	<b>4306</b>	<b>42.2</b>	<b>39.3</b>
Valori medi		<b>4324</b>	<b>41.5</b>	<b>38.4</b>

### Campionamento D

Sigla Provino	Rapporto A/C	V (m/sec)	I (-)	R (MPa)
D1	0.4	<b>4527</b>	<b>46.7</b>	<b>59.9</b>
D2	0.4	<b>4452</b>	<b>47.4</b>	<b>59.7</b>
D3	0.4	<b>4486</b>	<b>47.7</b>	<b>61.3</b>
D4	0.4	<b>4588</b>	<b>49.0</b>	<b>56.4</b>
D5	0.4	<b>4559</b>	<b>45.7</b>	<b>58.5</b>
D6	0.4	<b>4559</b>	<b>48.0</b>	<b>56.3</b>
Valori medi		<b>4529</b>	<b>47.4</b>	<b>58.7</b>



# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

## *Correlazione e Regressione*

Con il metodo *SonReb* si determina la resistenza del calcestruzzo combinando i dati sperimentali, riportati per il caso di studio nell'Appendice A, mediante correlazioni del tipo:

$$R = R_o \cdot e^a V^b I^c$$

in cui:

- R = resistenza attuale a compressione del calcestruzzo (MPa)
- R<sub>o</sub> = fattore di conversione delle unità di misura (R<sub>o</sub>= 1 MPa·sec/m)
- V = velocità di propagazione degli ultrasuoni (m/sec)
- I = indice di rimbalzo misurato dallo sclerometro (-)
- a, b, c = parametri di correlazione adimensionali da determinare con le misure sperimentali

**M. Lenzi – D. Versari – R. Zambrini**  
**"Indagine Sperimentale di Calibrazione  
del Metodo Combinato Sonreb"**

# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

La curva di correlazione *SonReb* assume pertanto per il campione di dati esaminati l'espressione:

$$R = 7.876 \cdot 10^{-19} V^{4.636} I^{1.747} \quad (MPa)$$

Riguardo il significato dei parametri di regressione si può dimostrare che  $a$  rappresenta un fattore di scala mentre i parametri  $b$  e  $c$  coincidono con le variazioni percentuali di resistenza indotte da una variazione percentuale unitaria delle grandezze oggetto di misura ad essi associate, risultando:

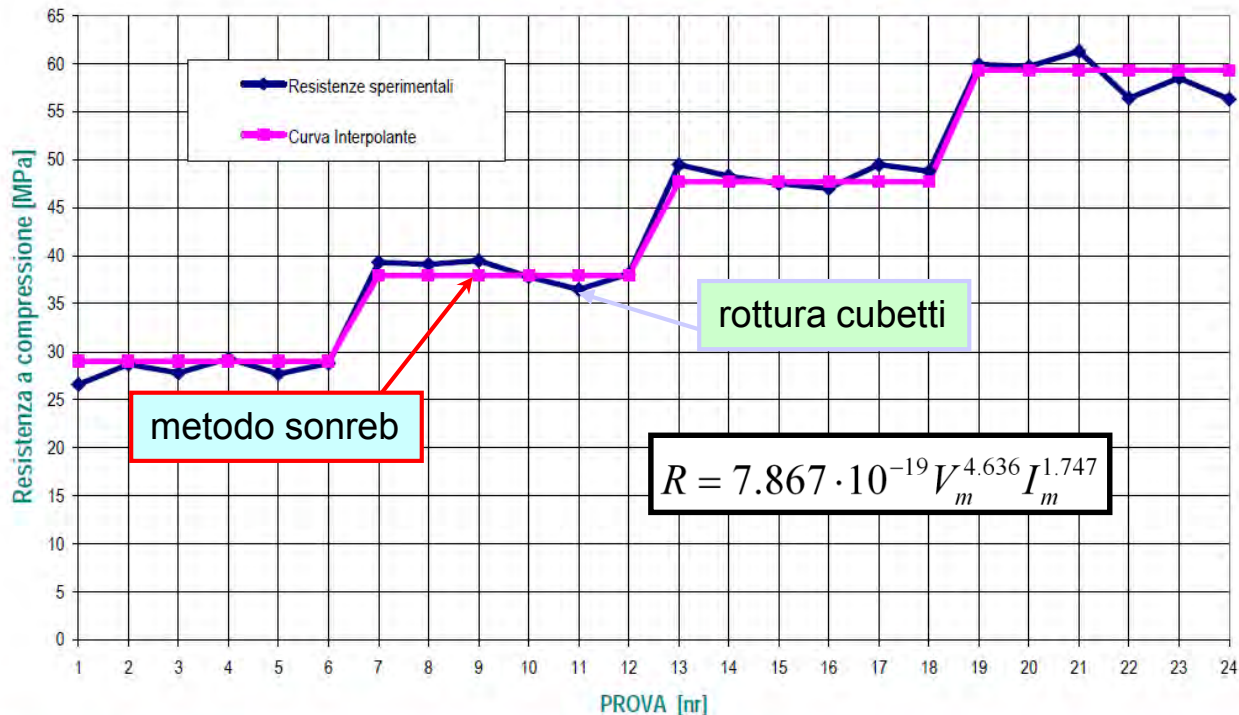
$$\Delta R / R |_V = b \cdot \Delta V / V \qquad \Delta R / R |_I = c \cdot \Delta I / I$$

Così una variazione  $\Delta V/V$  dell'1% nella misura della velocità si riflette in una variazione del 4.6% della resistenza mentre una variazione  $\Delta I/I$  dell'1% dell'indice di rimbalzo si traduce in una variazione di resistenza dell'1.75%, indicando con ciò una maggiore sensibilità del risultato alla precisione della misura della velocità che richiede pertanto più accuratezza. Per una variazione congiunta di entrambe le misure si ricava, applicando la propagazione quadratica degli errori, una variazione di resistenza:

$$\Delta R = R \cdot \sqrt{(b \cdot \Delta V / V)^2 + (c \cdot \Delta I / I)^2}$$

# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

CALIBRAZIONE PARAMETRI - METODO SONREB  
DIAGRAMMA DELLE RESISTENZE A COMPRESIONE

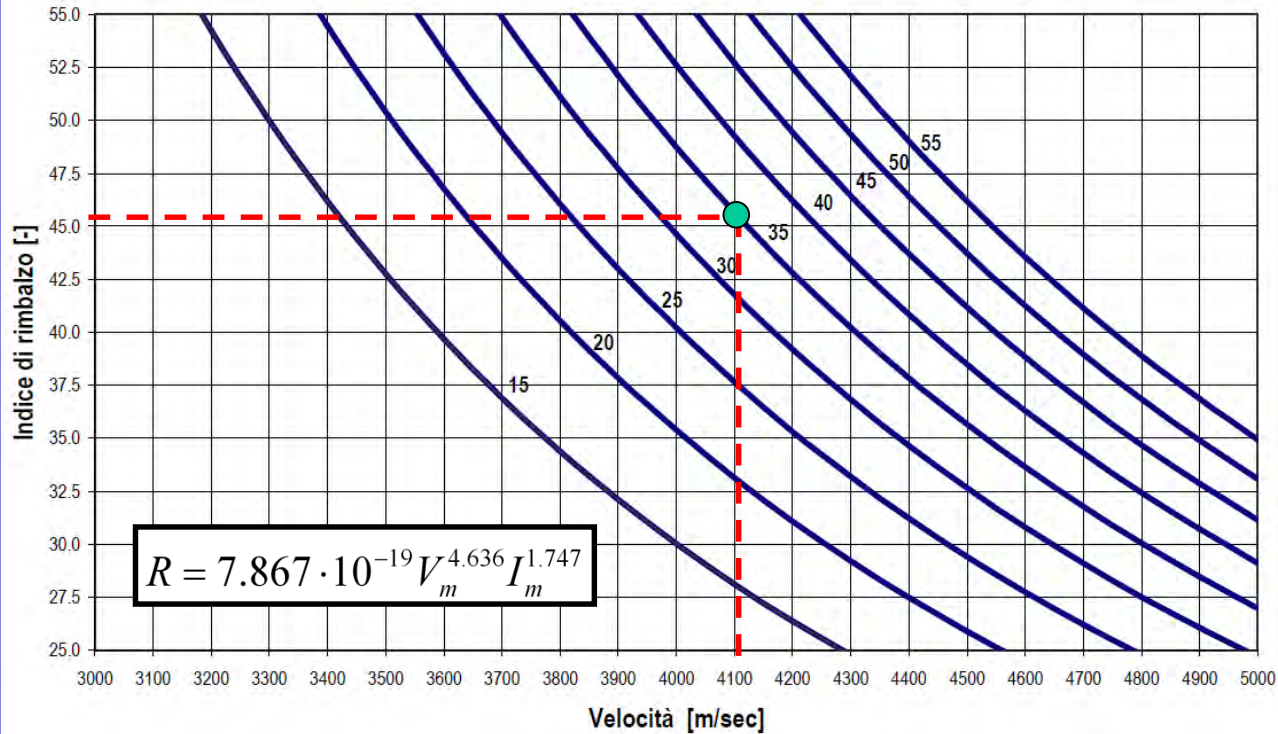


Regressione con **valori medi** di velocità e indice scler. di lotti con  $A/C = \text{cost}$



# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

METODO SONREB - CURVE DI ISORESISTENZA



Abaco delle curve di isoresistenza dedotte con la correlazione sperimentale, che fornisce indicazioni dirette sulla resistenza attuale del calcestruzzo in funzione delle variabili indipendenti oggetto di misura (velocità e indice di rimbalzo)

# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB



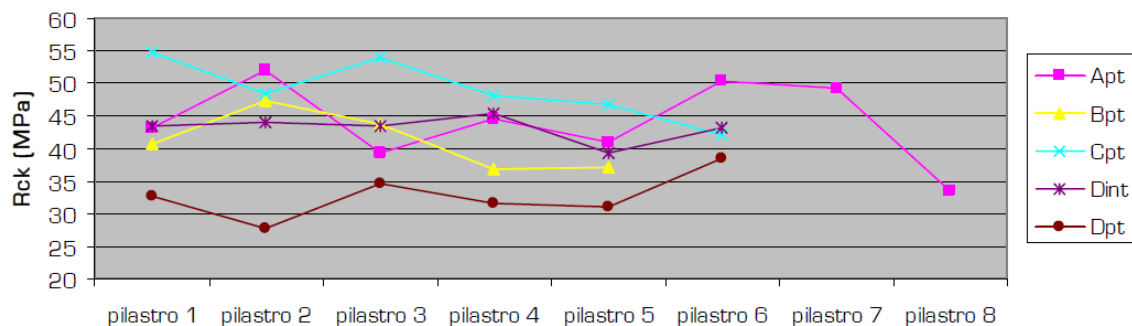


# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

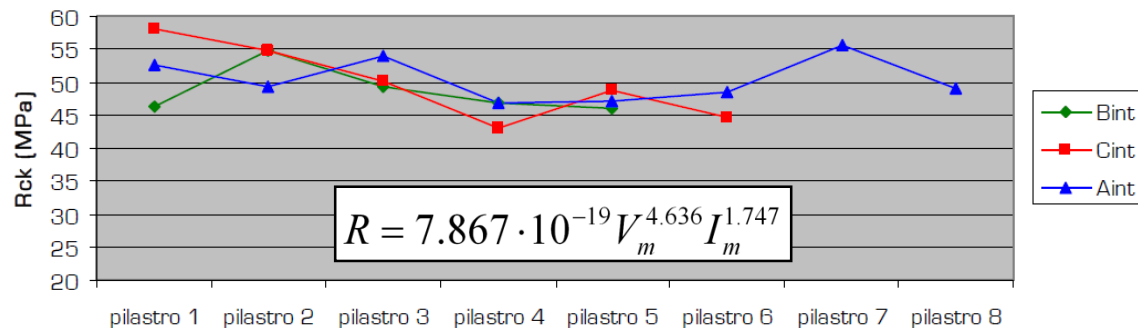


# STRUTTURE IN C.A. – METODO SONREB

Stima Resistenze per 28 gg < t < 45 gg

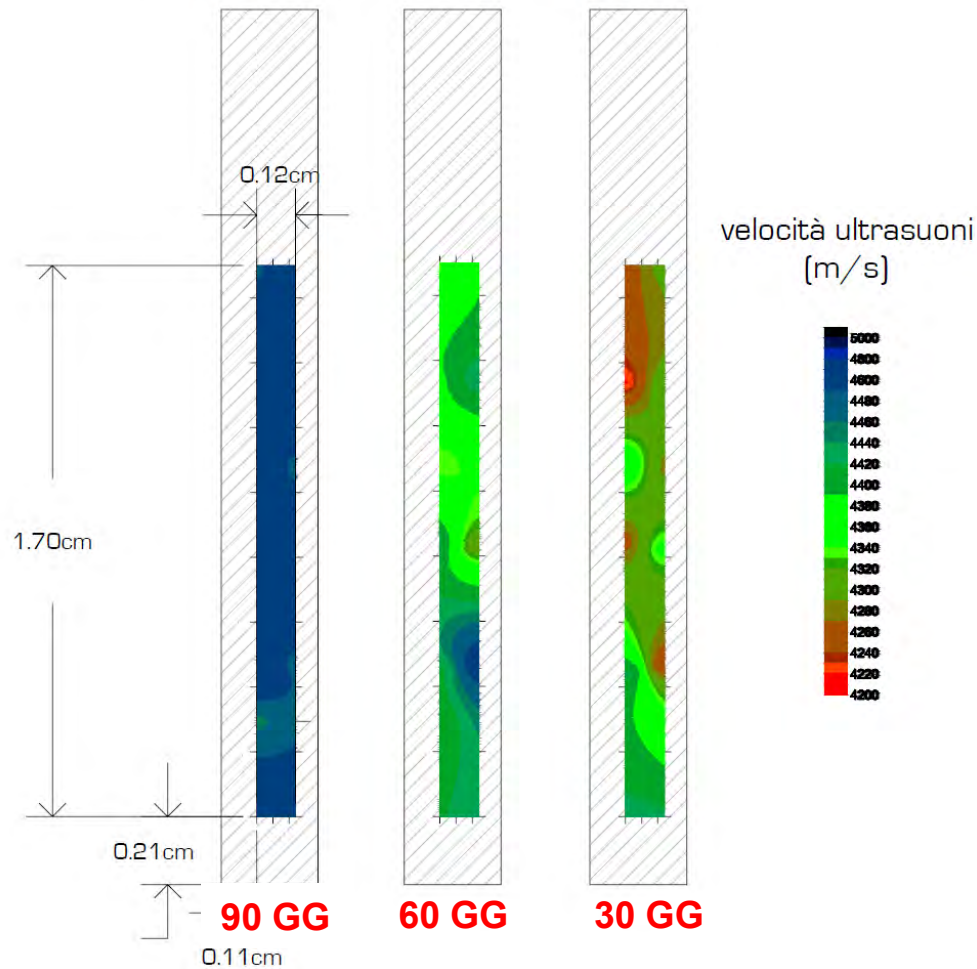


Stima Resistenza 60 gg < t < 90 gg



**Evoluzione nel tempo della resistenza vs grado di maturazione**

# STRUTTURE IN C.A. – ULTRASUONI



**Sviluppo della  
resistenza  
nel tempo di un  
Calcestruzzo SCC  
Autocompattante**

Ripetendo le misure a ultrasuoni in uno specifico pilastro a 30, 60 e 90 giorni, le tre mappature della velocità mostrano il sostanziale cambiamento nella proprietà elastico meccaniche del cls SCC nel tempo.

Al progredire del grado di maturazione si evidenzia una maggiore omogeneità delle velocità nella fascia indagata.

**PROVE NON DISTRUTTIVE  
SU STRUTTURE VOLTATE**

**PALAZZO SPRETI - RAVENNA**



**PALAZZO SPRETI  
RAVENNA**

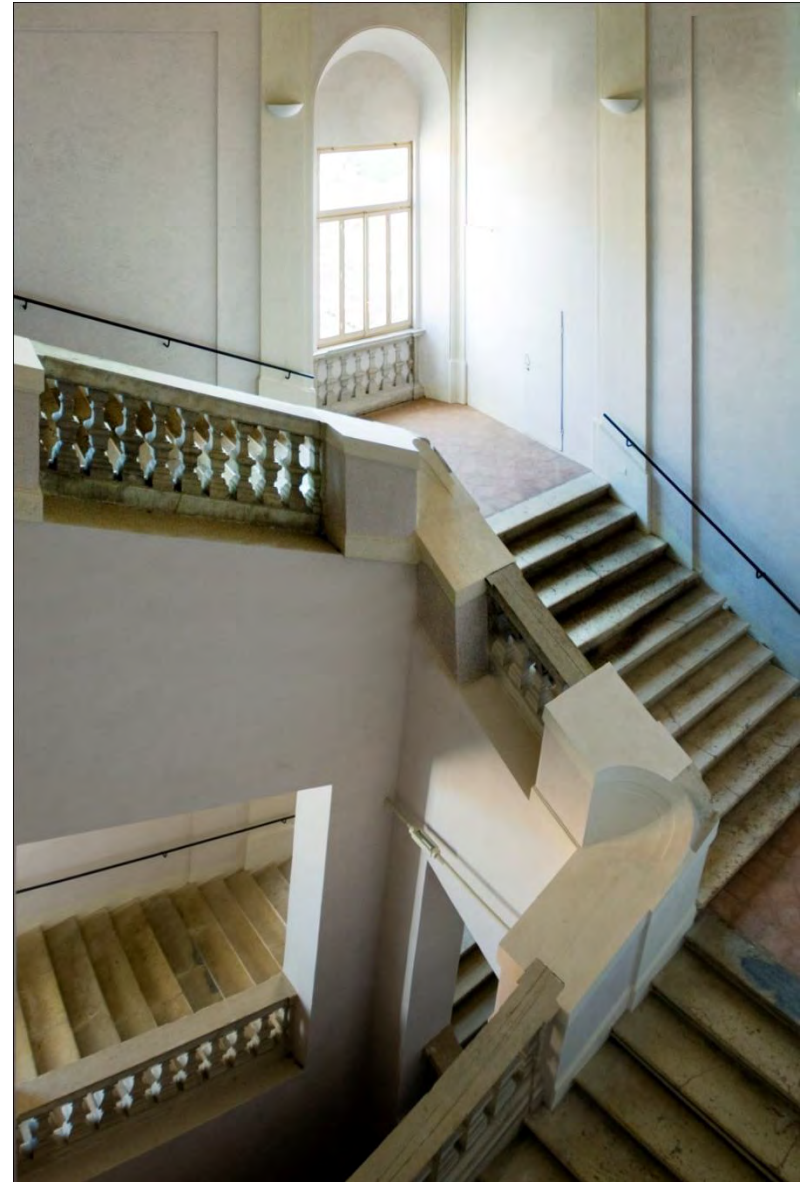




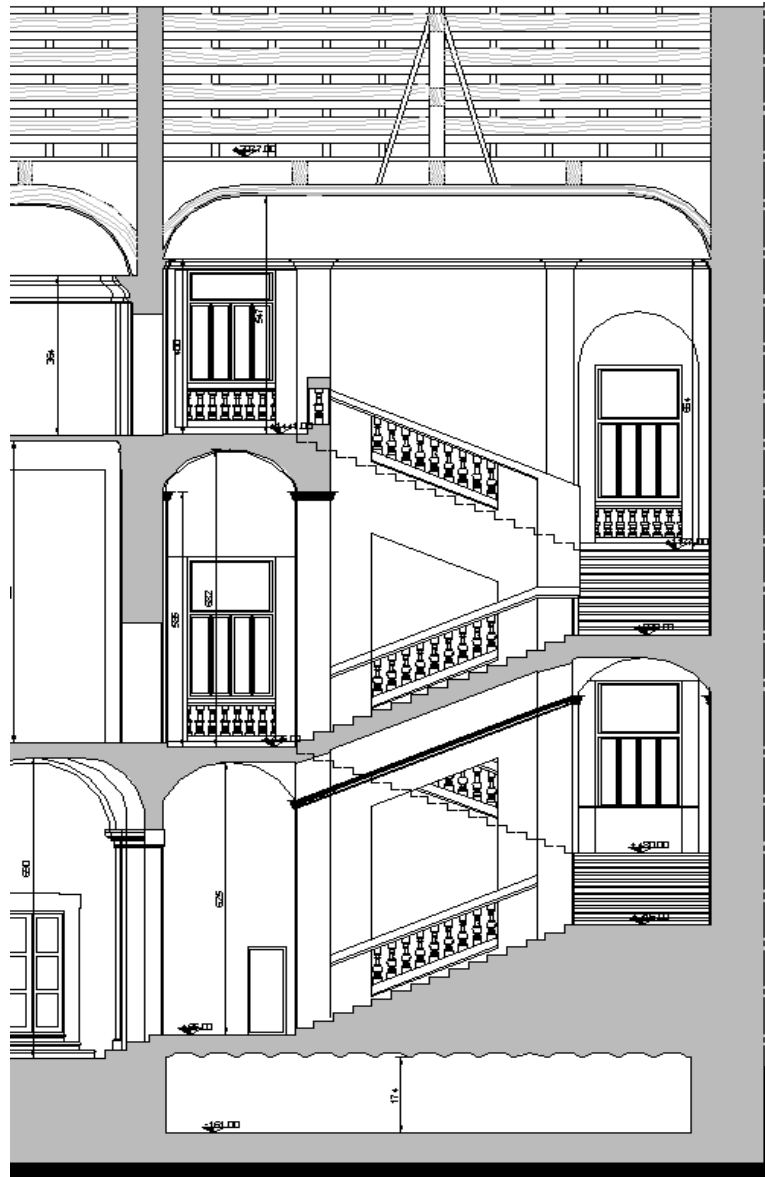
## Scala Principale di Palazzo Spreti



Ingresso e vista della scala



# Prospetto e sezione scala principale



QUOTA MEDIA  
VIA P. COSTA



QUOTA MEDIA  
VIA P. COSTA

## Finalità dell'intervento di restauro conservativo

Edificio vincolato dalla Soprintendenza ai Beni Ambientali e Architettonici

Intervento autorizzato sulle parti comuni: facciate e scala monumentale

Quadro fessurativo ampio e diffuso conseguente a cedimenti differenziali

## Intervento di consolidamento e miglioramento sismico







**Particolare del quadro fessurativo intradosso delle rampe**



**Particolare quadro fessurativo tra volta a crociera e a botte**



**Particolare “cerniera”  
intradosso rampa**



**Particolare del quadro fessurativo  
estradosso delle rampe**



**S  
T  
A  
T  
O  
  
A  
N  
T  
E  
  
O  
P  
E  
R  
A  
  
2<sup>a</sup>  
  
R  
A  
M  
P  
A**

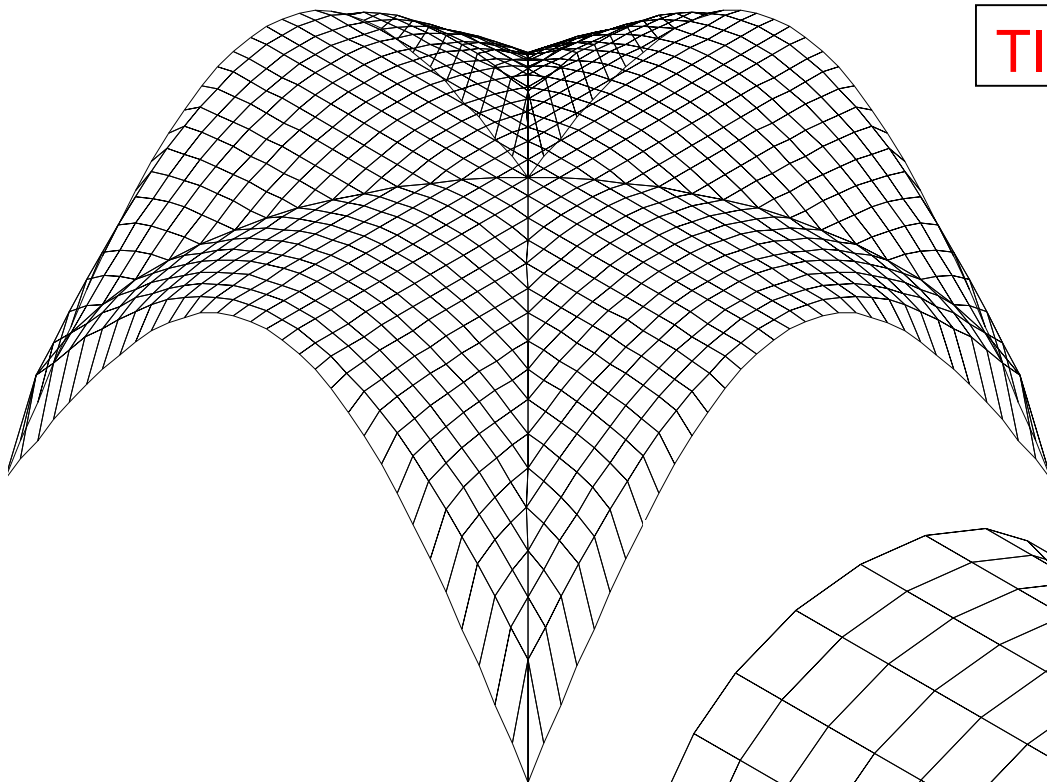


**D  
I  
S  
L  
O  
C  
A  
Z  
I  
O  
N  
I  
  
D  
E  
I  
  
G  
R  
A  
D  
I  
N  
I**

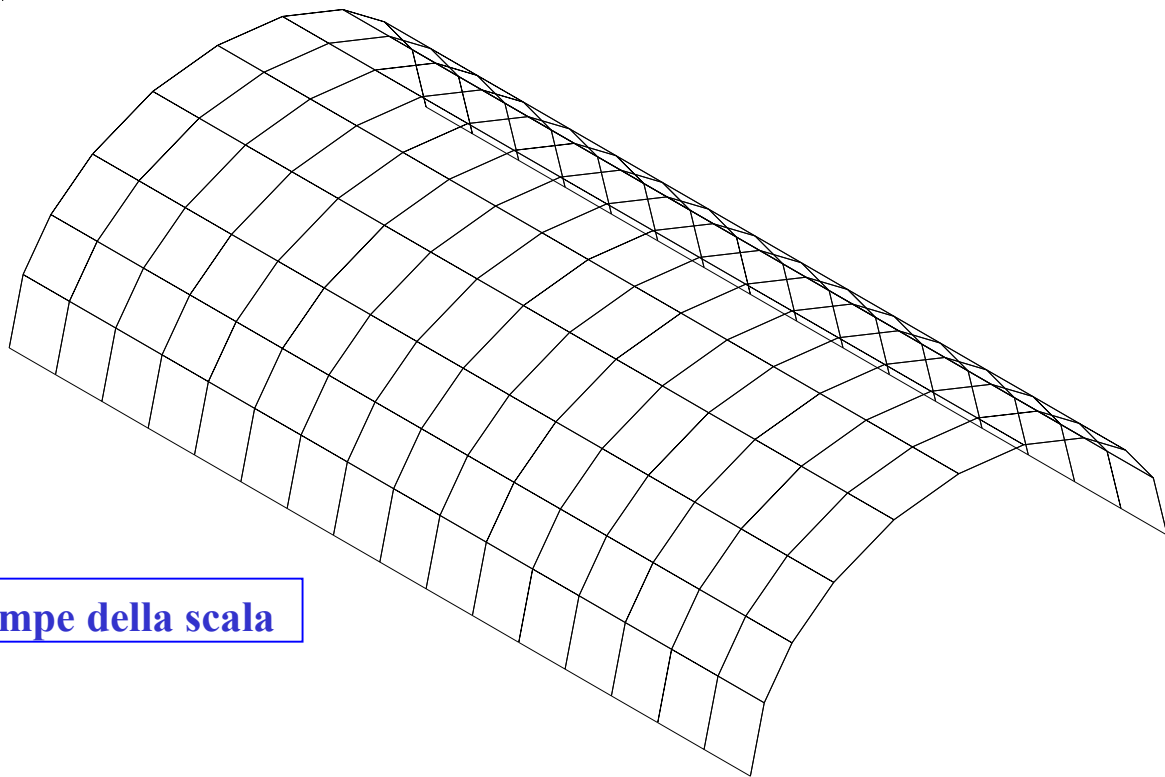


## TIPOLOGIE STRUTTURALI

**Volte a crociera costituenti i piani intermedi di raccordo tra le rampe**



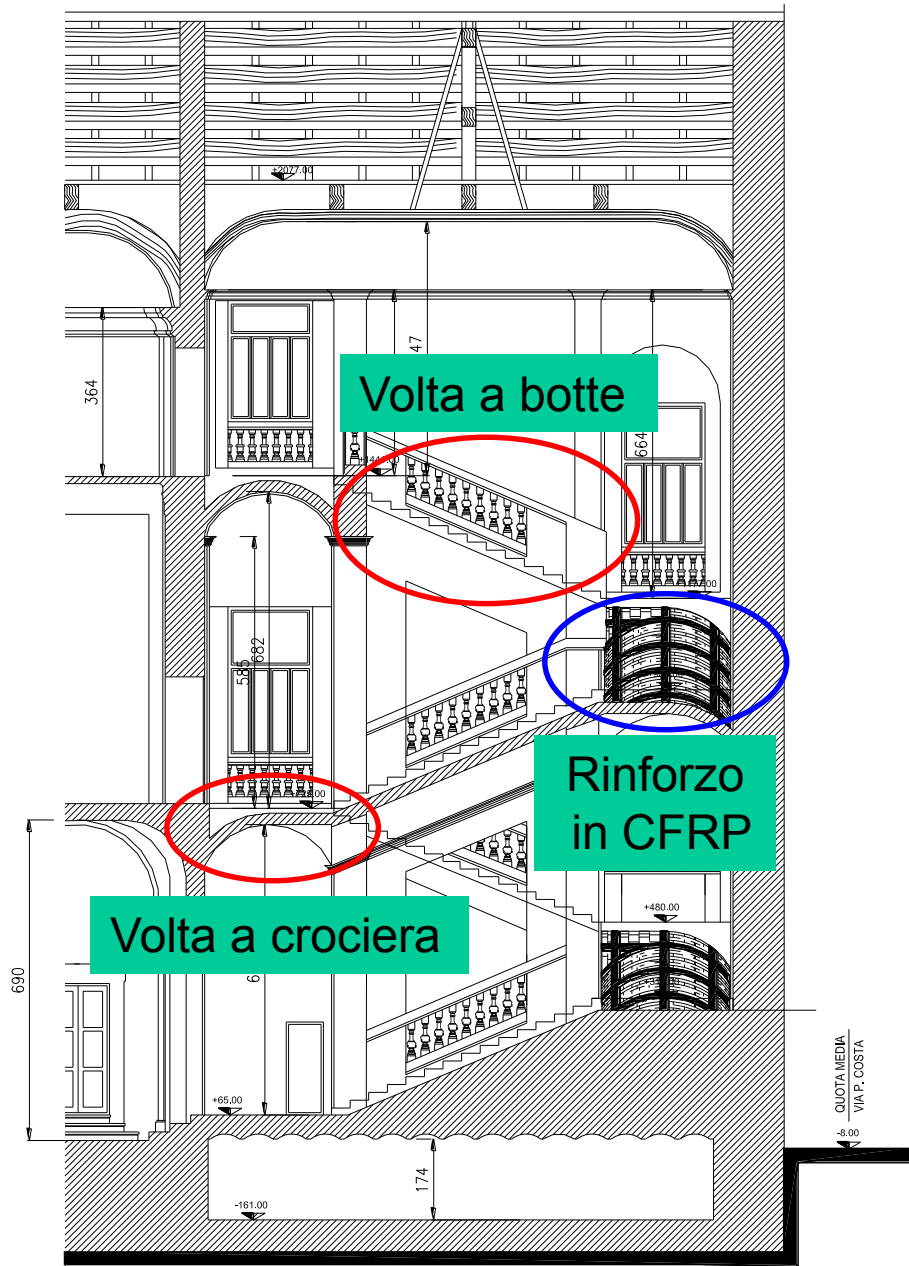
**Volte a botte costituenti le rampe della scala**



# **CONSOLIDAMENTO SCALA PRINCIPALE DI PALAZZO SPRETI - RAVENNA**

## **TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO**

- **SIGILLATURA DELLE FESSURE CON RESINA EPOSSIDICA DI CONSISTENZA TIXOTROPICA**
- **INIEZIONE CON RESINA A BASSA VISCOSITA' PER IL RIPRISTINO DELLA CONTINUITA' MATERIALE TRA I CORSI E NELLE FESSURE INTERNE**
- **APPLICAZIONE DEL RINFORZO CON NASTRI DI TESSUTO IN FIBRA DI CARBONIO (CFRP) PER LA PREVENZIONE DI CINEMATISMI A ROTTURA**



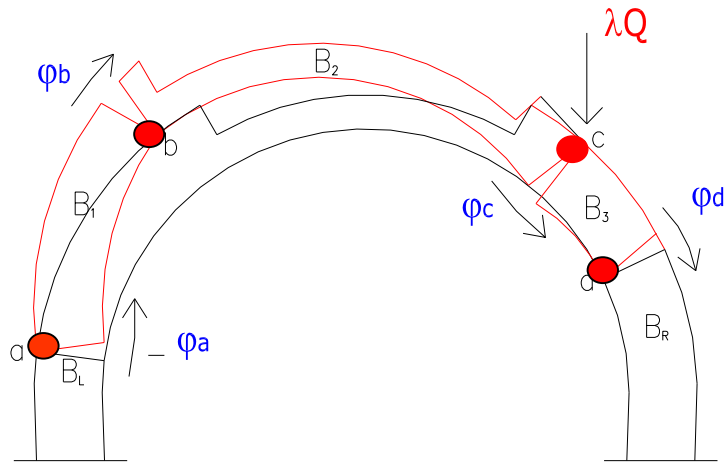


fig. 1a

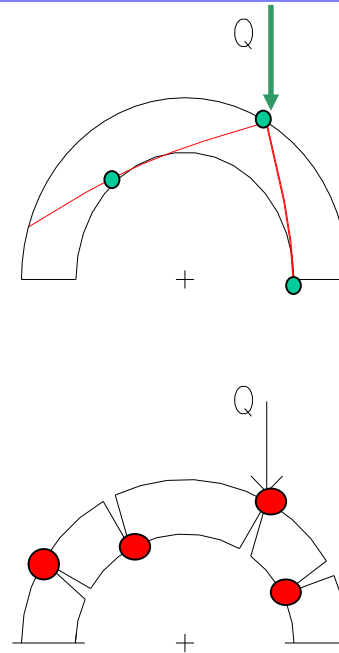


fig. 1b

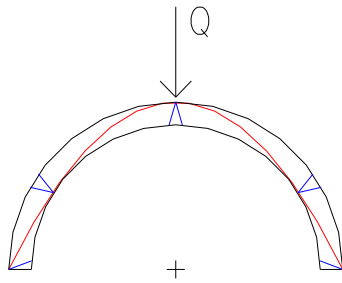
Rottura di un arco per formazione di un cinematismo ( $L_v=0$ )

Lavoro virtuale dei carichi esterni (positivo = abbassamento)

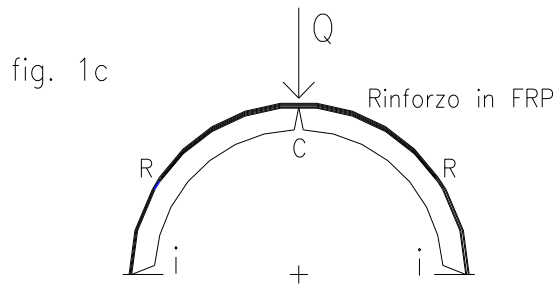
Lavoro virtuale dei pesi propri (negativo = innalzamento)

**Meccanismo di rottura con 4 cerniere alternate all'intradosso e all'estradosso**

**Curva delle pressioni interna allo spessore dell'arco non rinforzato**



arco non rinforzato con carico in chiave  
(cinematismo con 5 cerniere non dissipative)



arco rinforzato con carico in chiave  
(arco isostatico a 3 cerniere)

MECCANISMO DI ROTTURA  
DELLA MURATURA ARMATA  
schiacciamento della muratura  
rottura del rinforzo a trazione

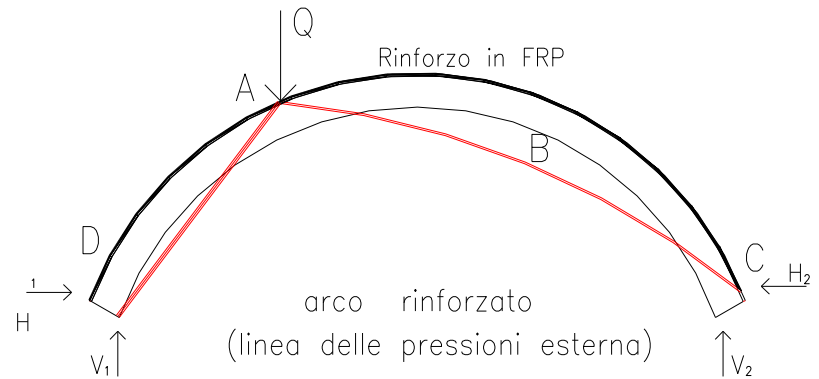


fig. 1d

arco rinforzato e carico asimmetrico  
(arco iperstatico)

### SCHEMA DI RINFORZO STRUTTURALE DI ARCHI E VOLTE IN MURATURA

**Arco rinforzato all'estradosso con tessuti in CFRP**

**Curva delle pressioni esterna alla sezione dell'arco rinforzato**

**Incremento di resistenza flessionale ed alle azioni orizzontali**

# CARATTERISTICHE DEL RINFORZO IN CFRP



## Caratteristiche tessuto in carbonio

**TIPO UNIDIREZIONALE 200/240/30**

**Modulo elastico: 240000 MPa**

**Resistenza a trazione = 3800 MPa**

**Densità delle fibre = 1.7 gr/cm<sup>3</sup>**

**Allungamento a rottura = 1.5%**

**Peso = 200 gr/mq**

**Altezza = 15-30 cm**

## Caratteristiche adesivo epossidico

**Modulo elastico: 6500 MPa**

**Resistenza a trazione = 31 MPa**

**Resistenza alla compr. = 92 MPa**

**Peso specifico = 1.5 gr/cm<sup>3</sup>**

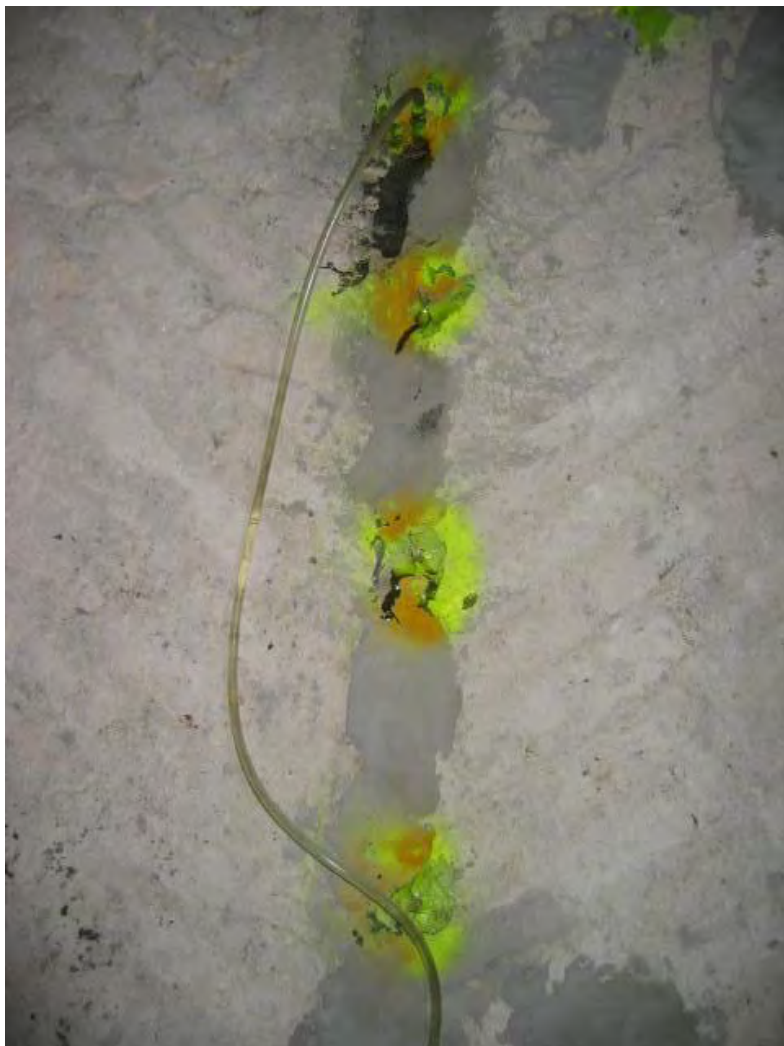
**Pot life = 80 min**





**Stuccatura delle fessure con resina epossidica tixotropica  
Iniezione di resina epossidica bassissima viscosità**





**Particolare beccucci di iniezione**



**Applicazione del rinforzo in CFRP**



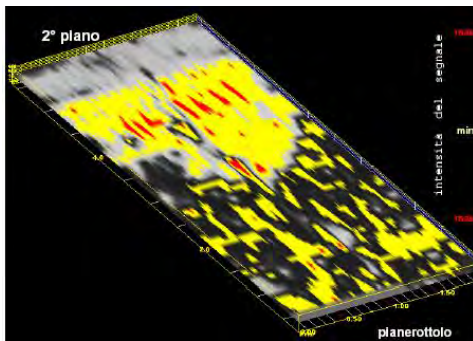


Riempimento tra estradosso volta ed intradosso pavimentazione  
Restauro e montaggio dei gradini originali

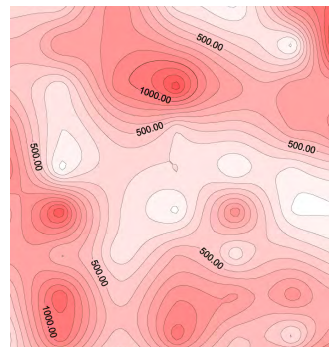


**Vista delle volte e delle rampe consolidate e restaurate**

# Indagini non distruttive



PROVE RADAR-STRATIGRAFICHE



PROVE SONICHE



PROVE ACCELEROMETRICHE

**Prove radar**

**Prove soniche**

**Prove vibrazionali**

**Omogeneità**

**Parametri elastici**

**Frequenze modali**



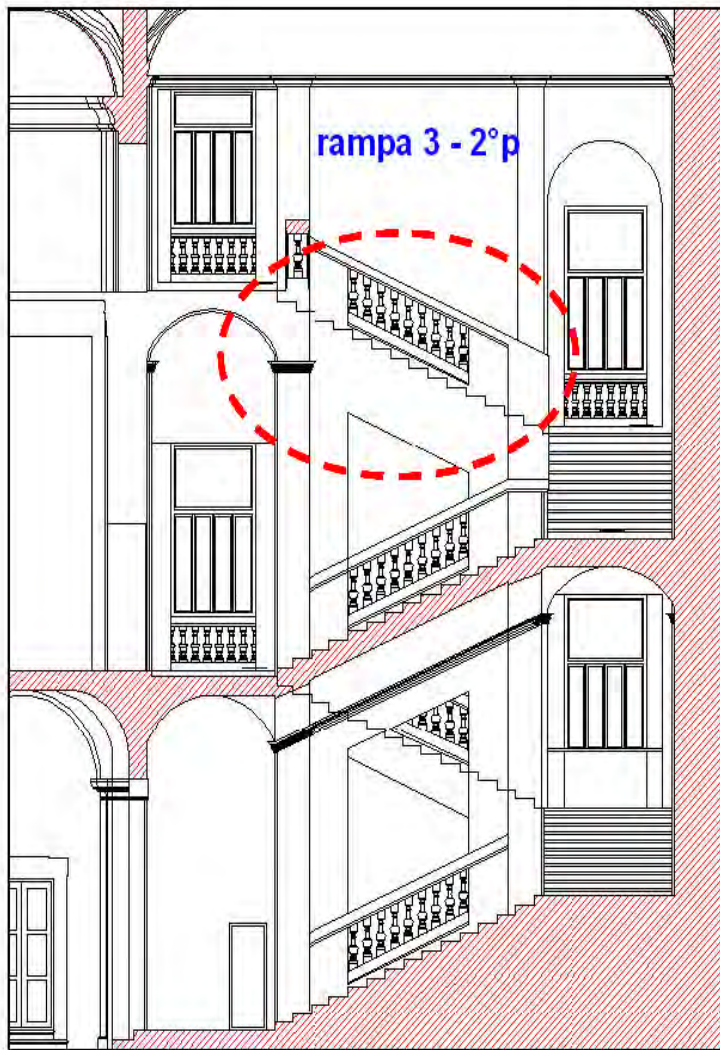


Fig. 2 - Localizzazione intervento all'interno dello stabile "Casa del Popolo"



Fig. 8 - Rilievo georadar precedente l'intervento di consolidamento

## PROVA RADAR

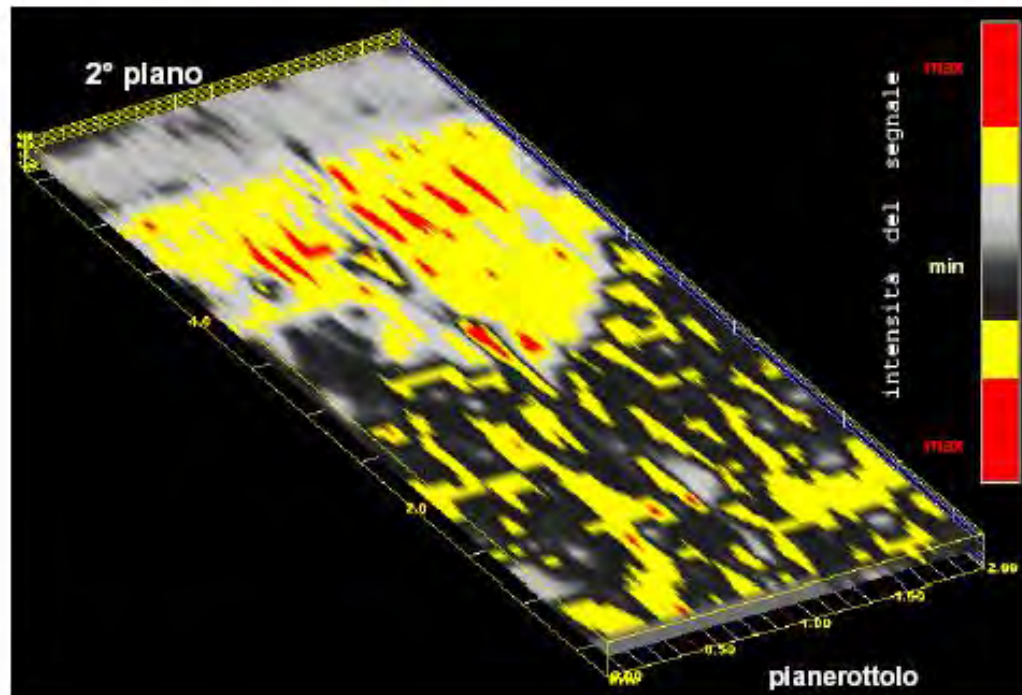
**identificazione vuoti, cavità e fessure;**  
valutare spessori, composizione strutturale, **omogeneità;**  
ricerca di eventuali armature interne

**Riflessione onde elettromagnetiche**



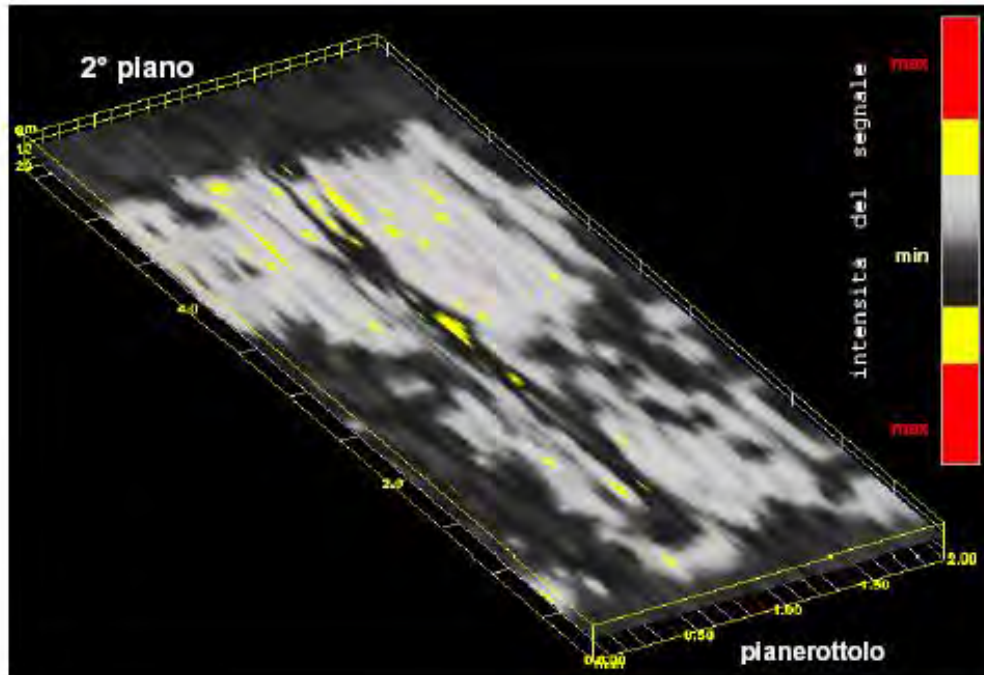
SEZIONE 5

1° rilievo - profondità di indagine 12 cm



**Sezione radar stratigrafica ante operam**

SEZIONE 6  
2° rilievo - profondità di indagine 12 cm



**Sezione stratigrafica post operam**

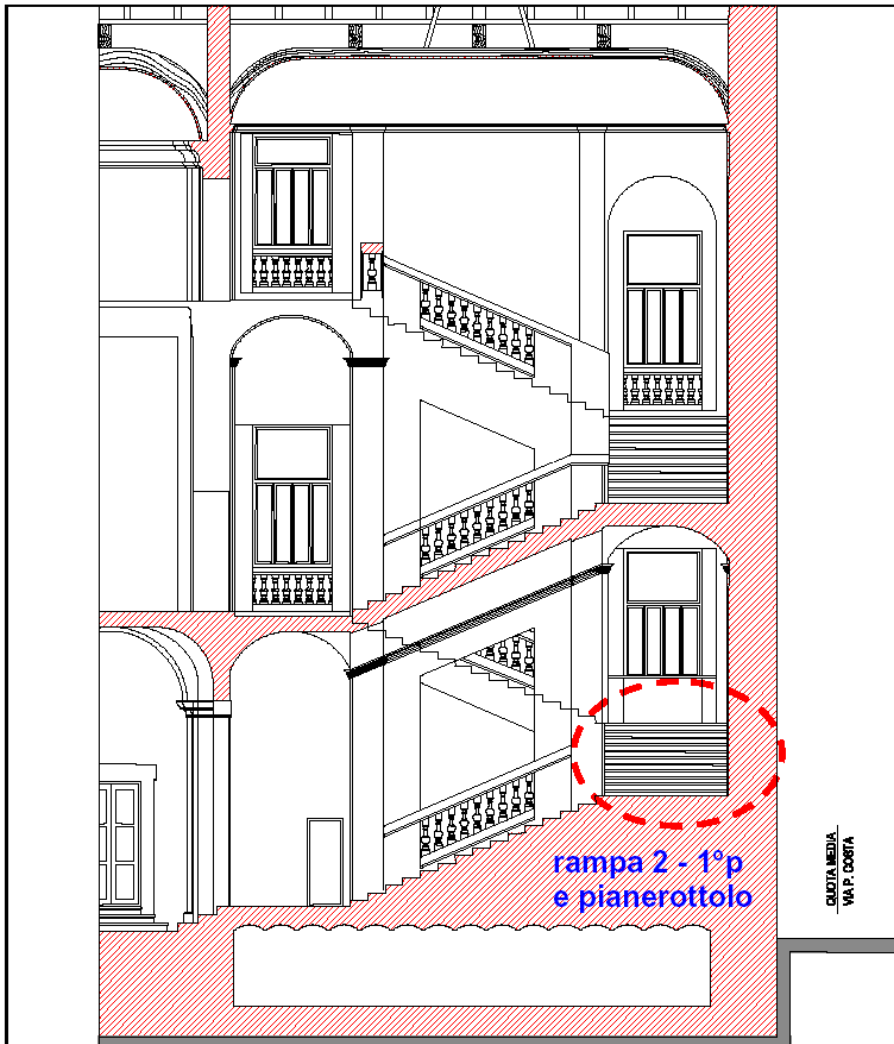


Fig. 2 - Localizzazione intervento all'interno dello stabile "Casa del Popolo"

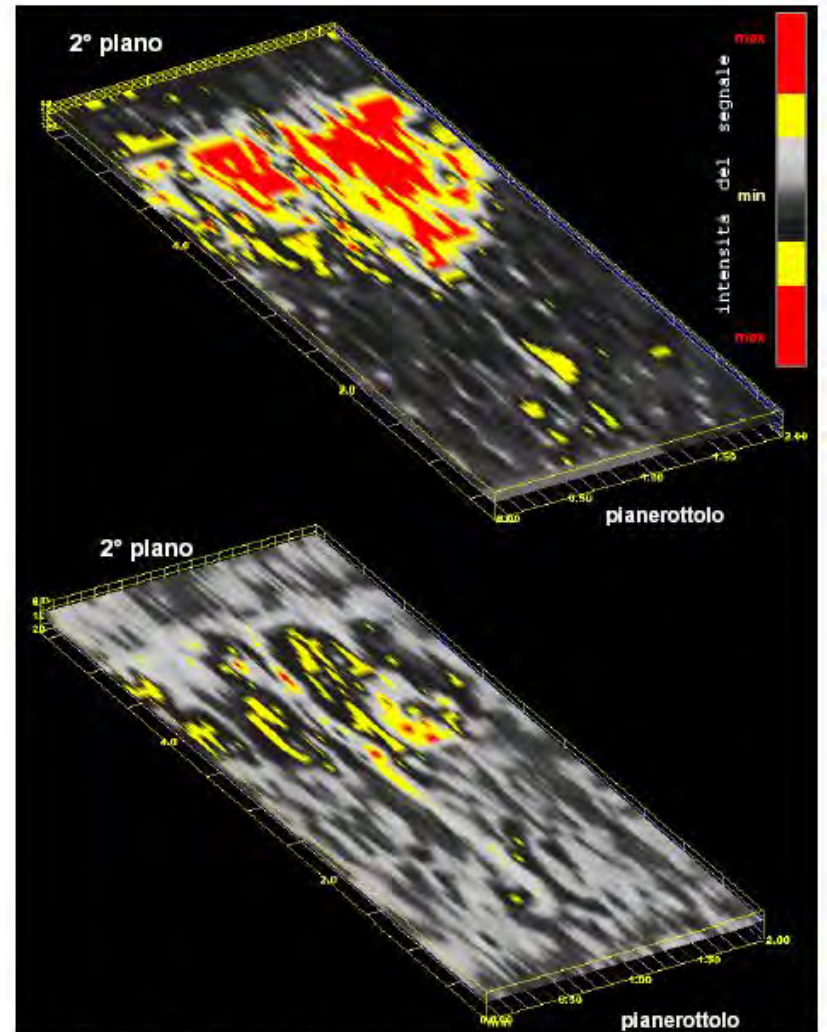


Fig. 10 - modello 3D, sezione xy alla profondità di 8,5 cm: situazione precedente (sopra) e successiva (sotto) all'intervento di consolidamento



# PROVE SONICHE

## Misura della velocità di propagazione degli impulsi

### INDAGINI SONICHE

- 1)  $V < 1000$  m/s: individua murature fortemente danneggiate con presenza di grossi vuoti interni;
- 2)  $1000 \text{ m/s} < V < 2000$  m/s: rappresenta la maggioranza delle murature in mattoni esistenti; valori di  $V$  inferiori ai 1500 m/s possono indicare presenza di vuoti e difetti, irregolarità nei corsi o nelle giunzioni.
- 3)  $V > 2000$  m/s: indica murature accuratamente costruite e conservate con elevata resistenza a compressione, stimabile fra i 5 e 15 MPa.

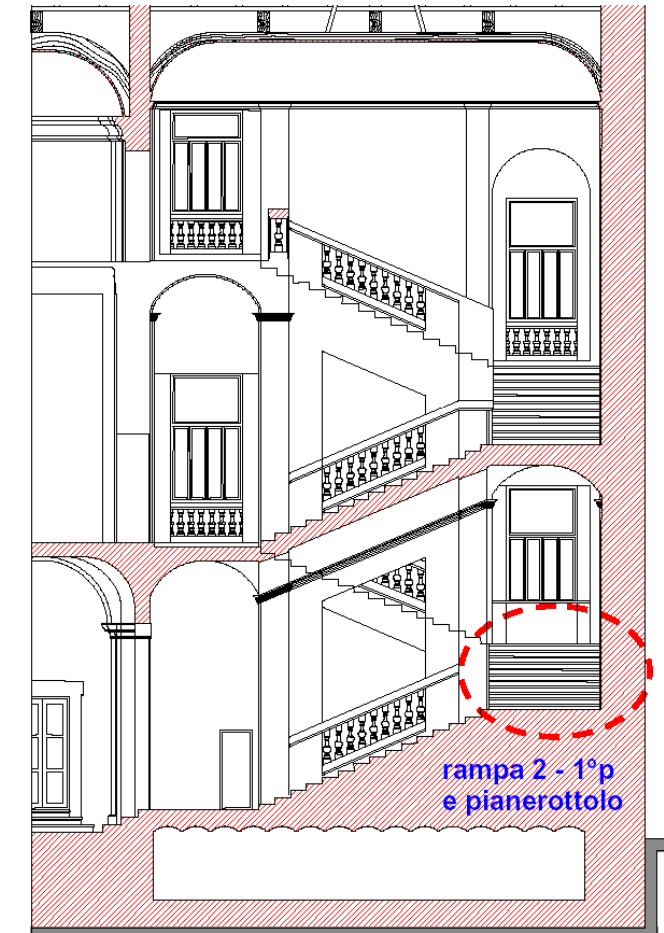
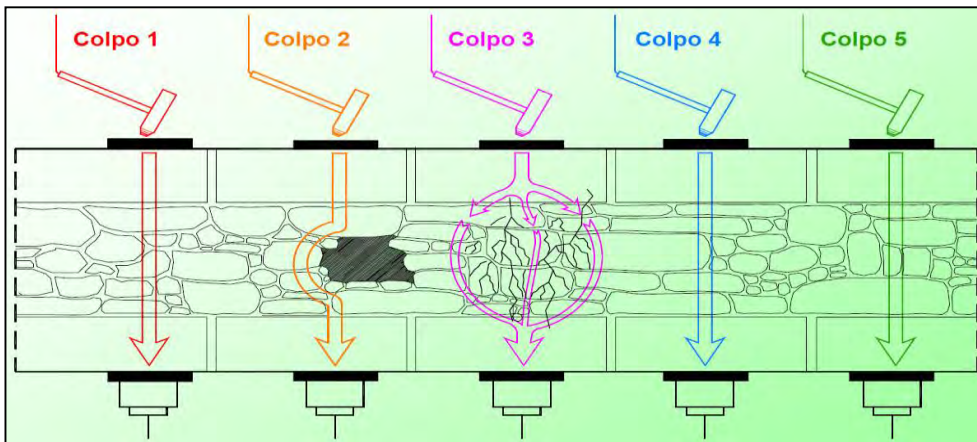
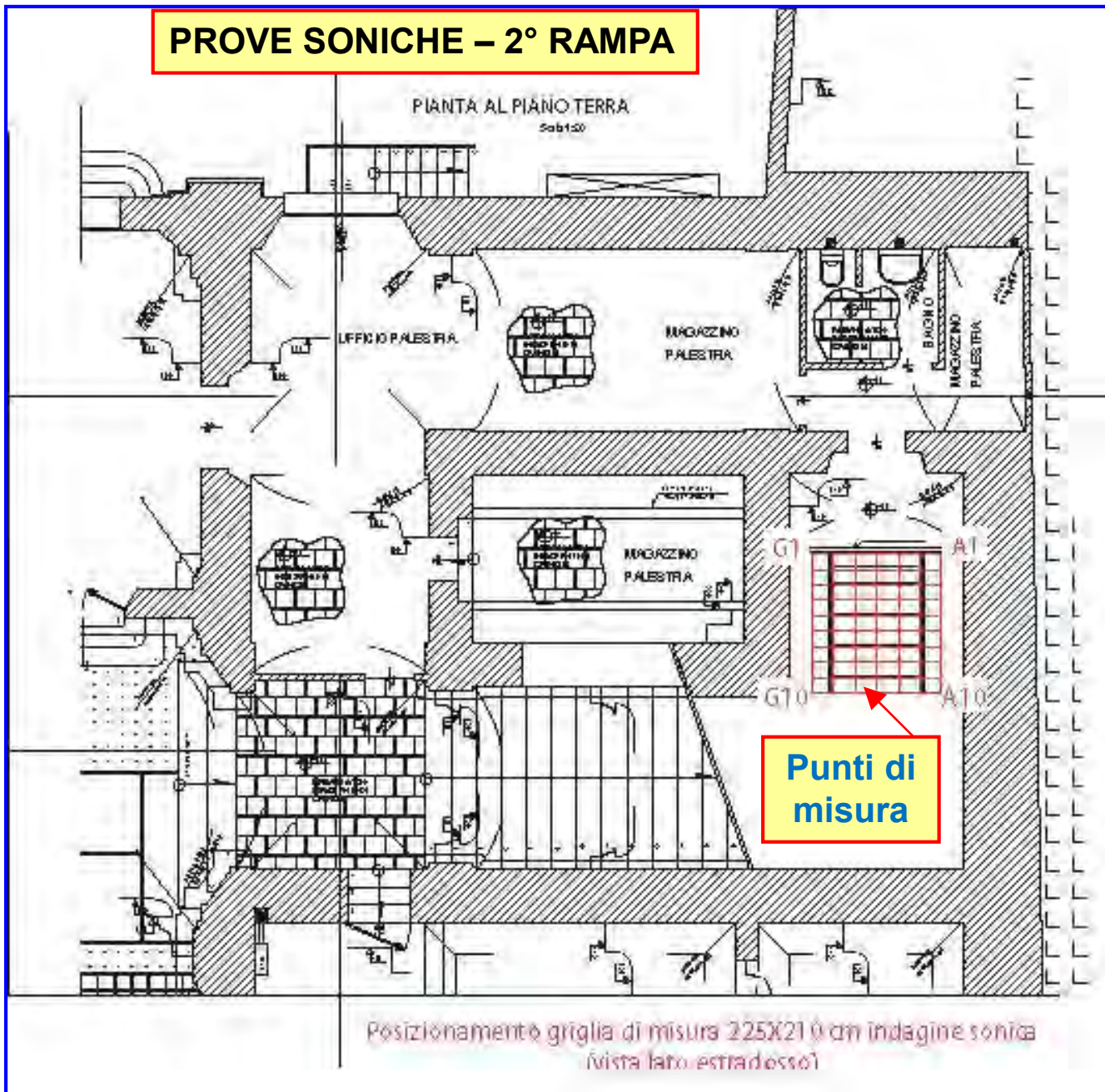


Fig. 2 - Localizzazione intervento all'interno dello stabile "Casa del Popolo"

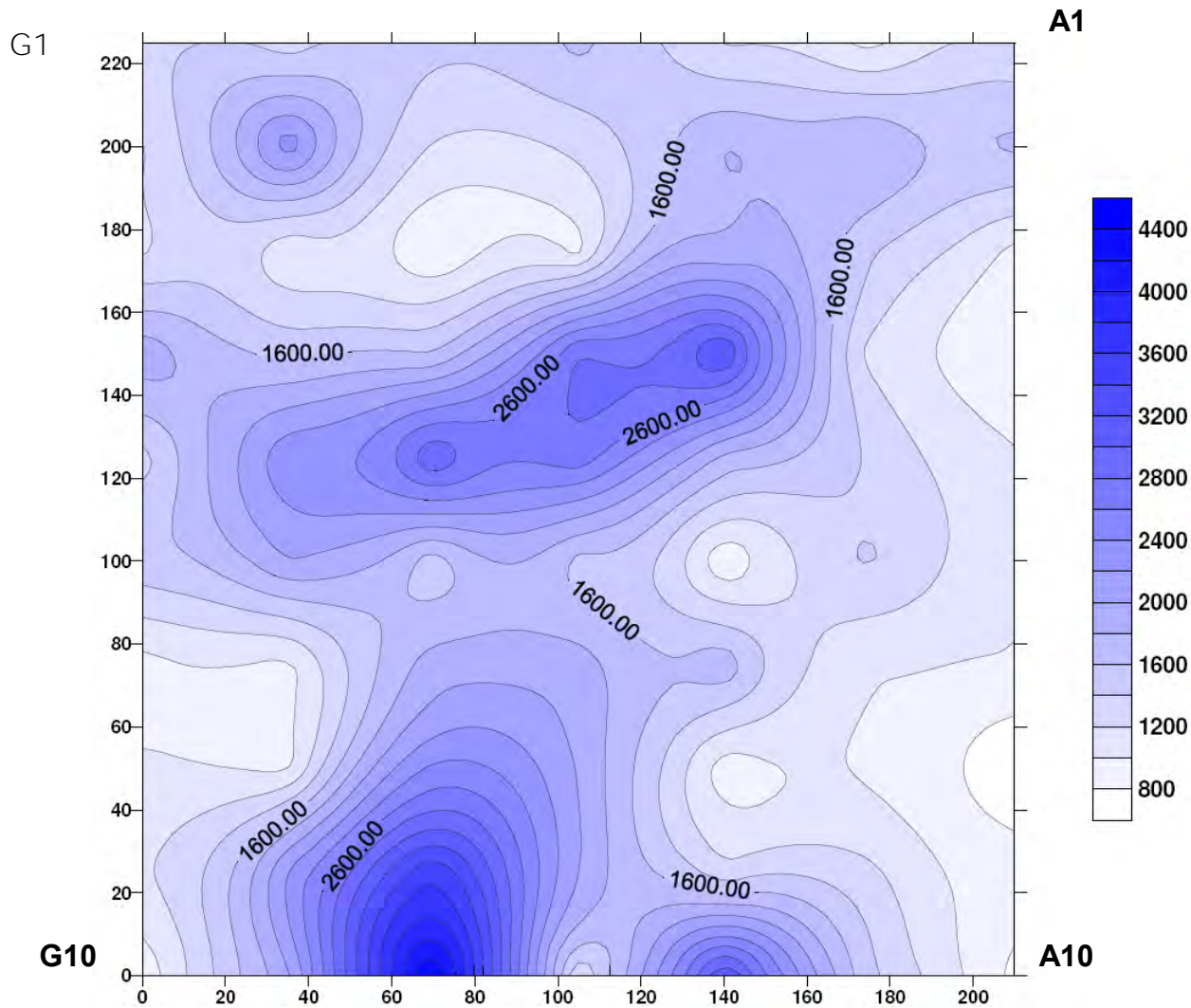
$$E = V^2 \rho \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

# PROVE SONICHE – 2° RAMPA





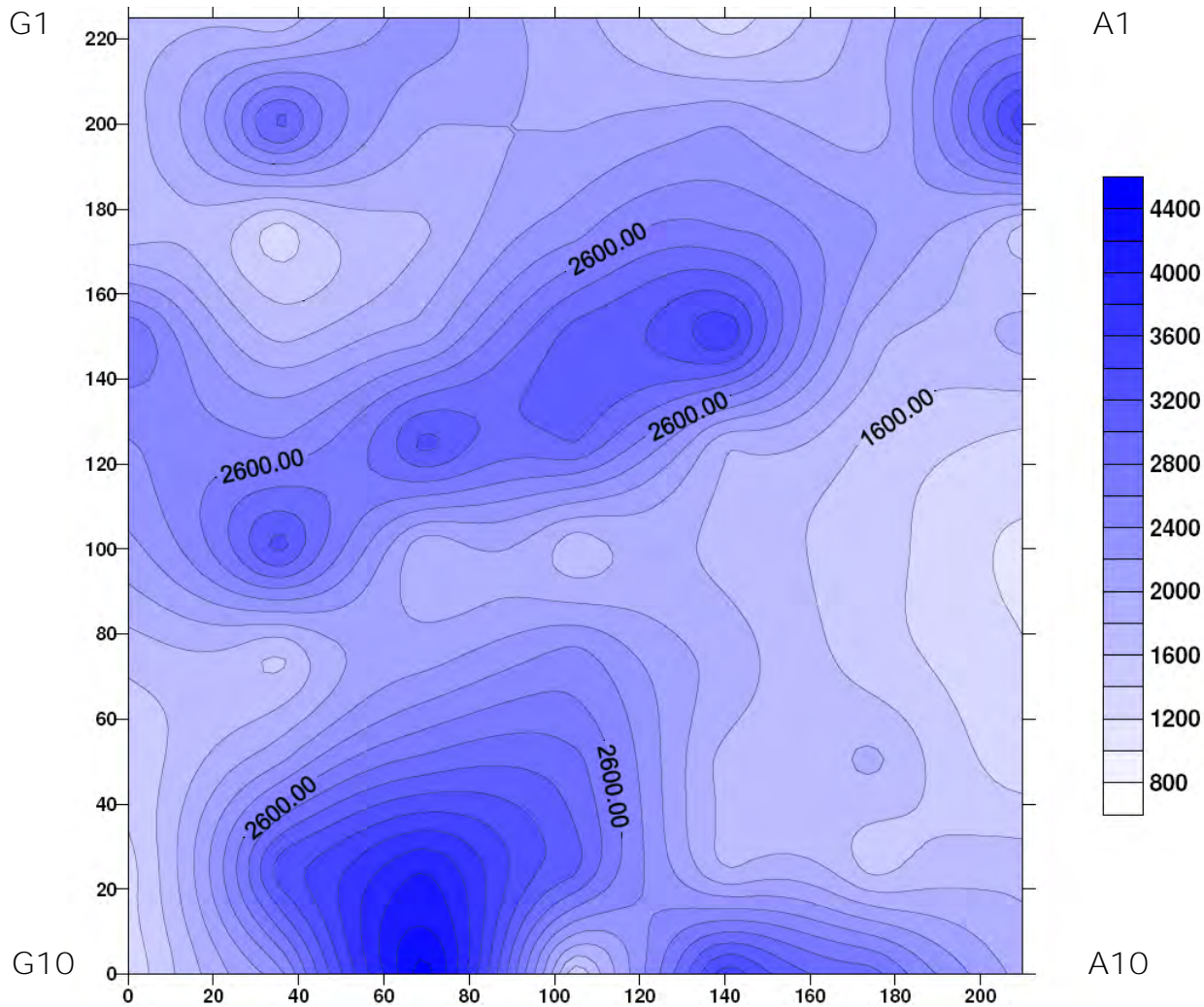
# PROVE SONICHE



**Curve di isovelocità prima del consolidamento**

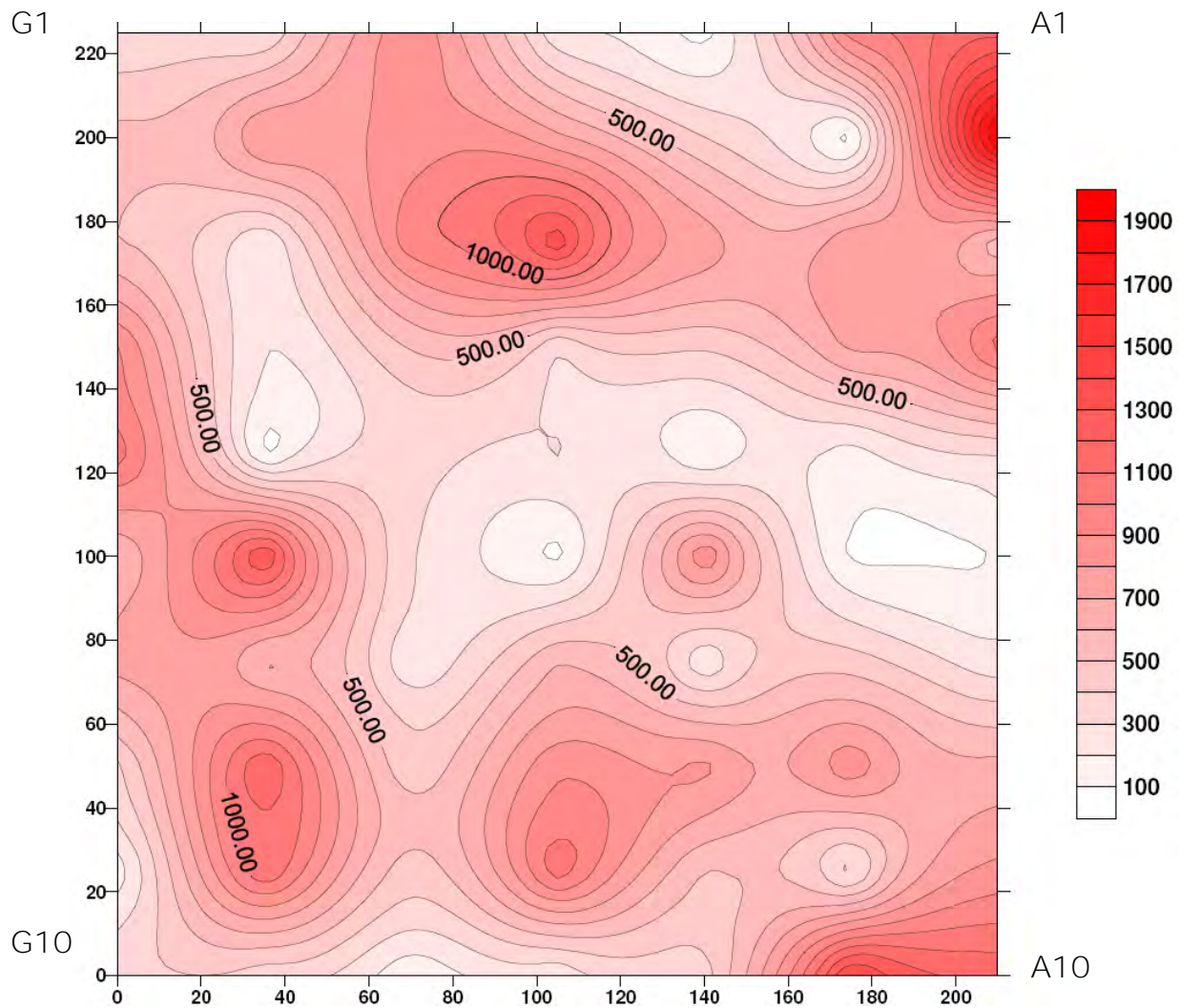


# PROVE SONICHE



**Curve di isovelocità dopo il consolidamento**

# PROVE SONICHE



**Incremento di velocità sonora**

## PROVE SONICHE

DIFFERENZA PRIMA - DOPO IL CONSOLIDAMENTO							
Velocità apparenti [m/s] - Spessore impostato: 20cm							
	A	B	C	D	E	F	G
1	390	330	110	210	350	1450	1170
2	130	1110	440	1080	490	230	830
3	380	1200	420	880	830	890	630
4	740	570	210	600	200	450	230
5	590	1330	310	70	910	80	100
6	1060	50	350	310	80	160	310
7	920	200	510	300	410	730	1050
8	500	200	970	1370	760	790	530
9	530	820	820	720	400	30	1990
10	310	290	900	220	60	970	1170

### Modulo elastico volta in muratura ( $\gamma=1800 \text{ kg/m}^3$ )

$$E = V^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu) \quad (\text{modulo elastico a basse deformazioni})$$

$$\rho = \gamma/g \quad \nu = 0.10$$

$$E_m \approx 5000 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{prima del consolidamento})$$

$$E_m \approx 10000 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{dopo il consolidamento})$$

# PROVE DINAMICHE ACCELEROMETRICHE

Strumentazione e risposta  
della struttura all'energizzazione

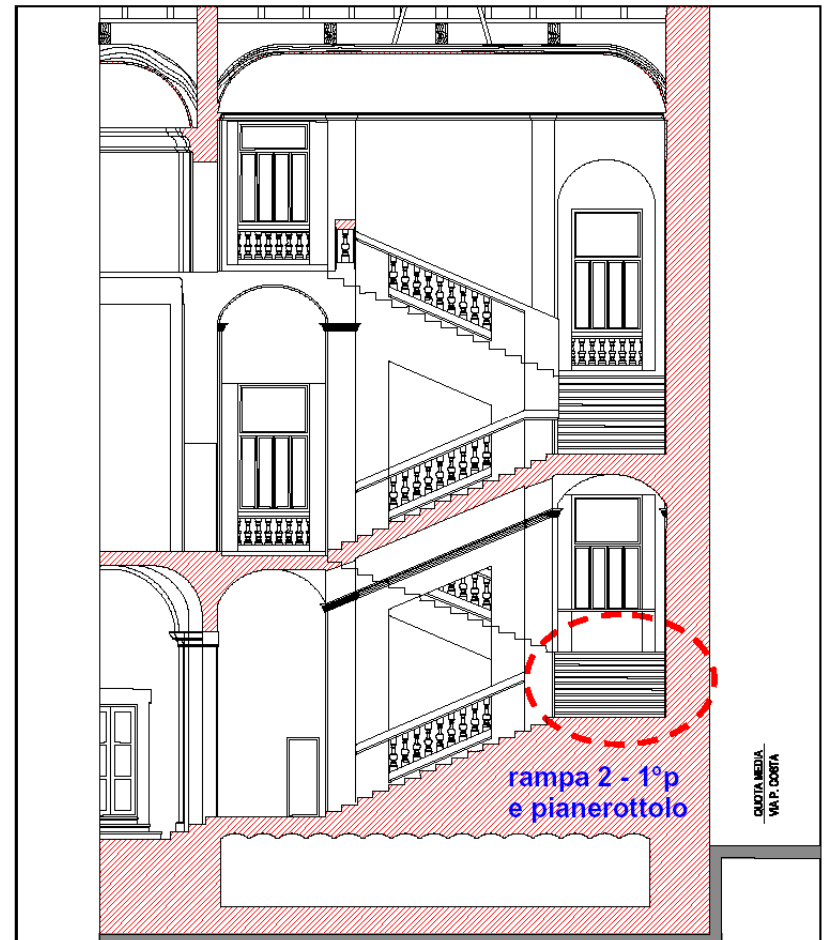
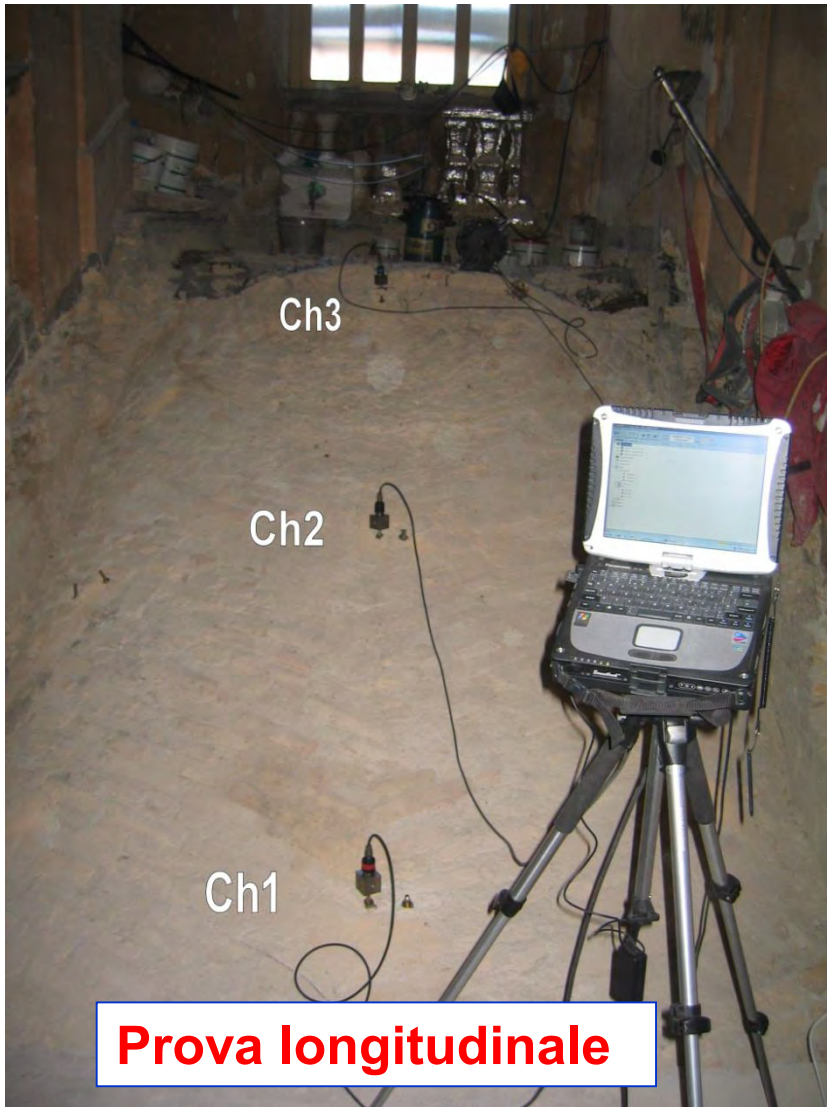


Fig. 2 - Localizzazione intervento all'interno dello stabile "Casa del Popolo"

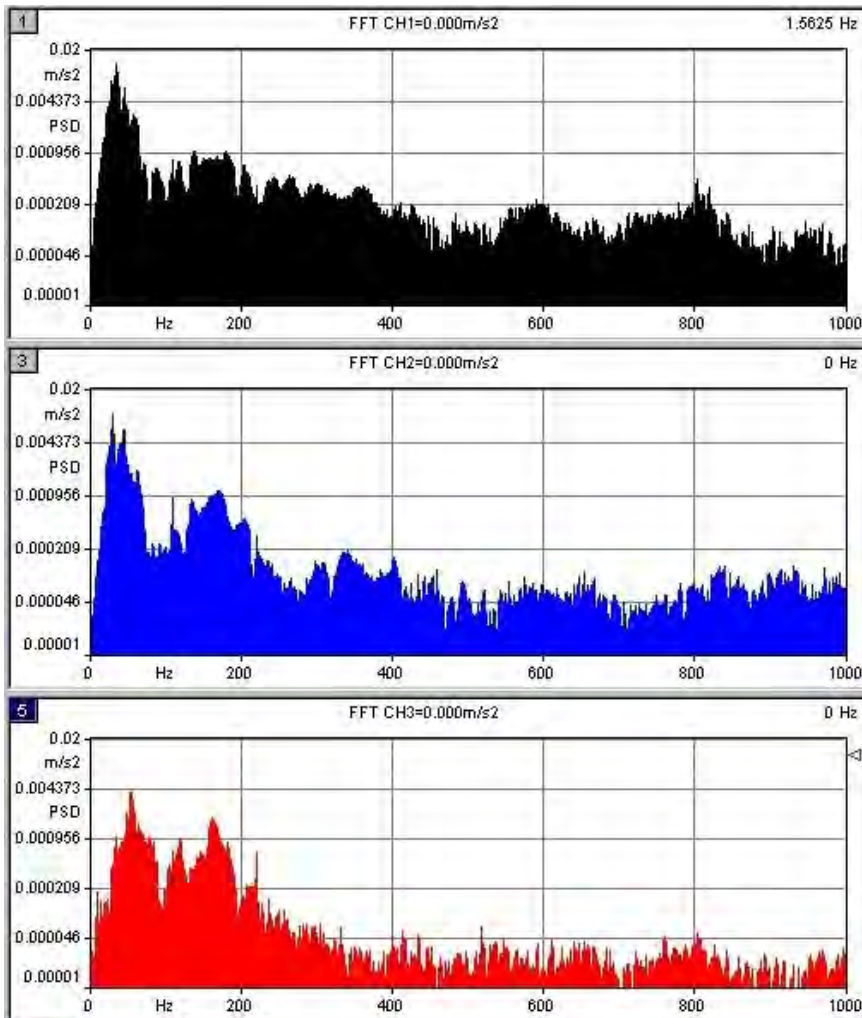




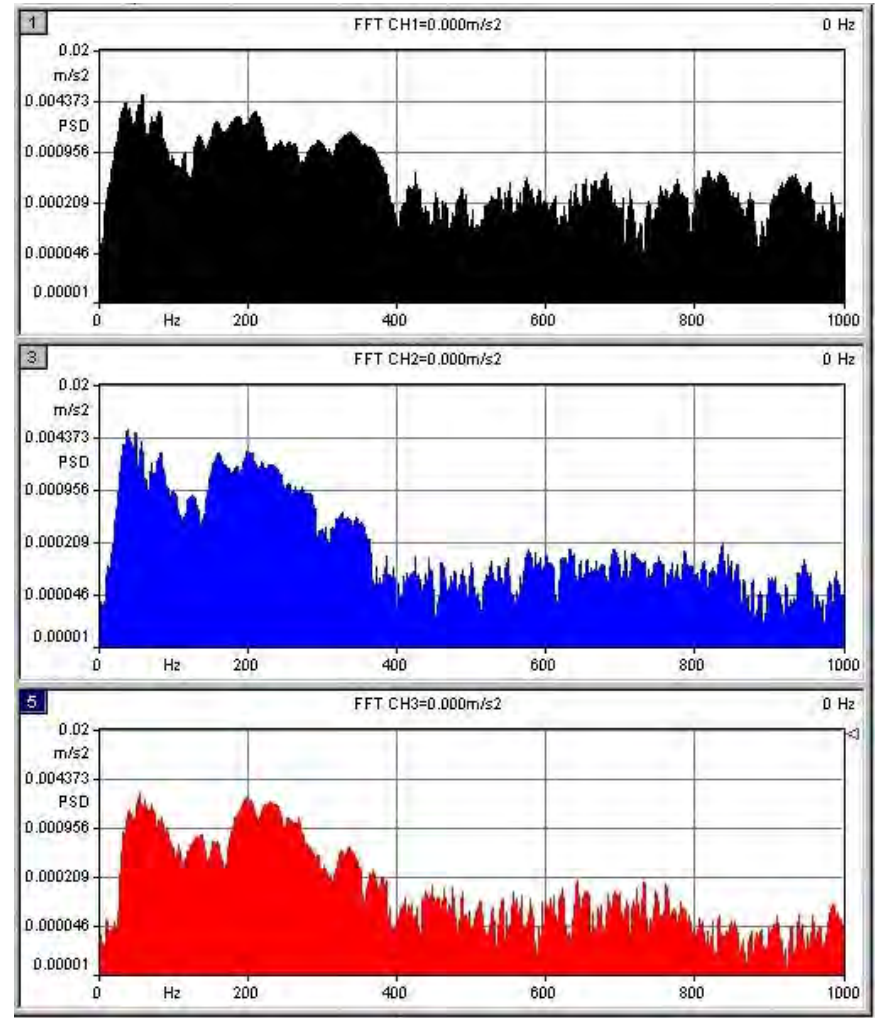
## Strumentazione di prova

Disposizione degli accelerometri in  
Direz. Longitudinale e Trasversale  
(ricerca delle frequenze modali)

## Stato iniziale



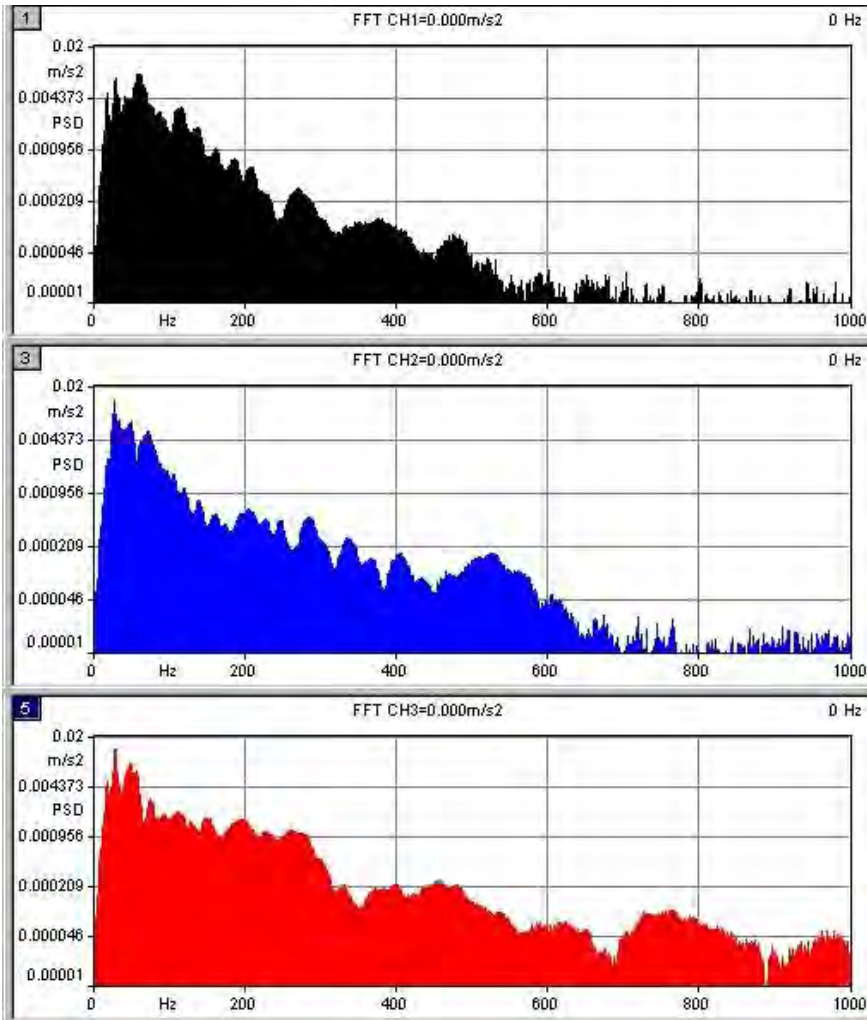
## Stato consolidato



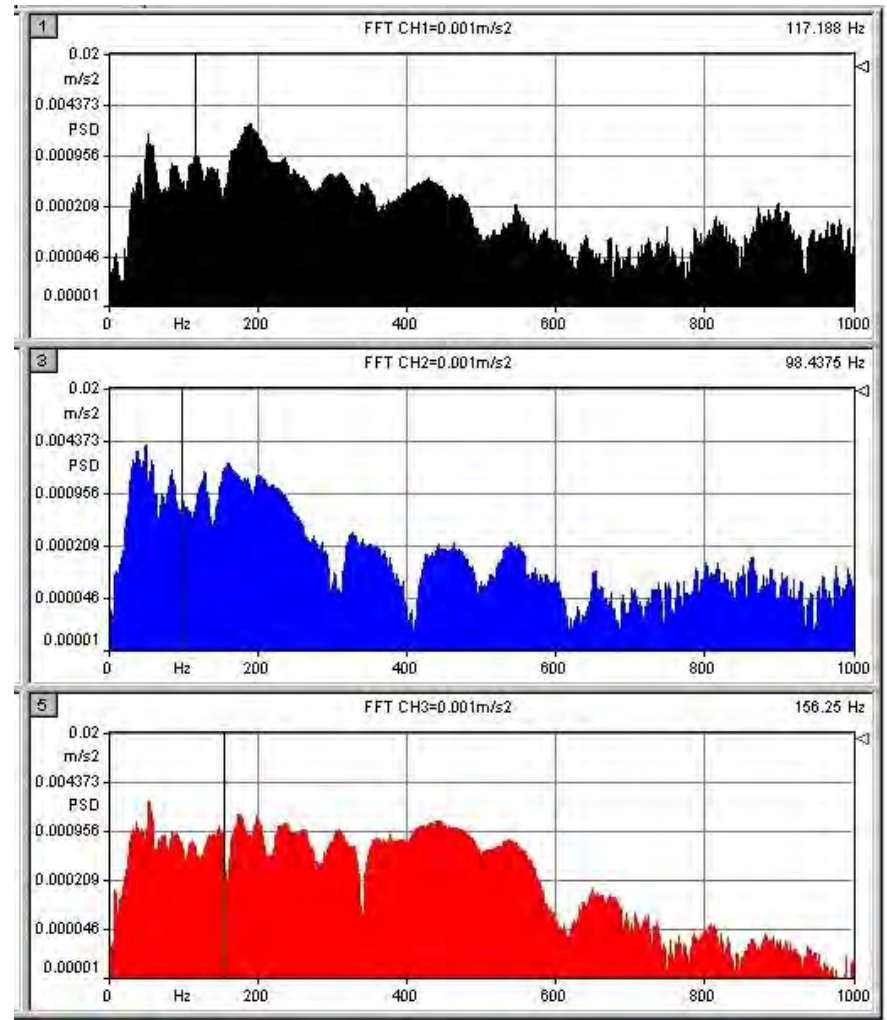
Trasformate di Fourier per eccitazioni in  
direzione **longitudinale** Ante e Post Operam



## Stato iniziale



## Stato consolidato



Trasformate di Fourier per eccitazioni in direzione **trasversale** Ante e Post Operam

# PROVE DINAMICHE ACCELEROMETRICHE

LONGITUDINALE ANTE OPERAM	FREQUENZA DI OSCILLAZIONE
Ch.1	30 Hz
Ch.2	31 Hz
Ch.3	34 Hz
TRASVERASALE ANTE OPERAM	FREQUENZA DI OSCILLAZIONE
Ch.1	20-31 Hz
Ch.2	30 Hz
Ch.3	20-31 Hz
LONGITUDINALE POST OPERAM	FREQUENZA DI OSCILLAZIONE
Ch.1	38 Hz
Ch.2	39 Hz
Ch.3	42 Hz
TRASVERASALE POST OPERAM	FREQUENZA DI OSCILLAZIONE
Ch.1	42 Hz
Ch.2	39 Hz
Ch.3	39 Hz

Frequenze di  
oscillazione

Ante operam

e

Post operam

$$\frac{E_{post}}{E_{ante}} = \frac{f_{post}^2}{f_{ante}^2}$$

$$\frac{E_{post}}{E_{ante}} = \frac{39^2}{30^2} = 1.7$$



**Vista d'insieme della scala di Palazzo Spreti**

# **PARTE SECONDA**

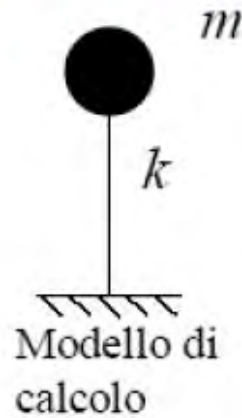
**COMPORTAMENTO DINAMICO  
DI STRUTTURE SOGGETTE  
AD UNA FORZANTE SISMICA**



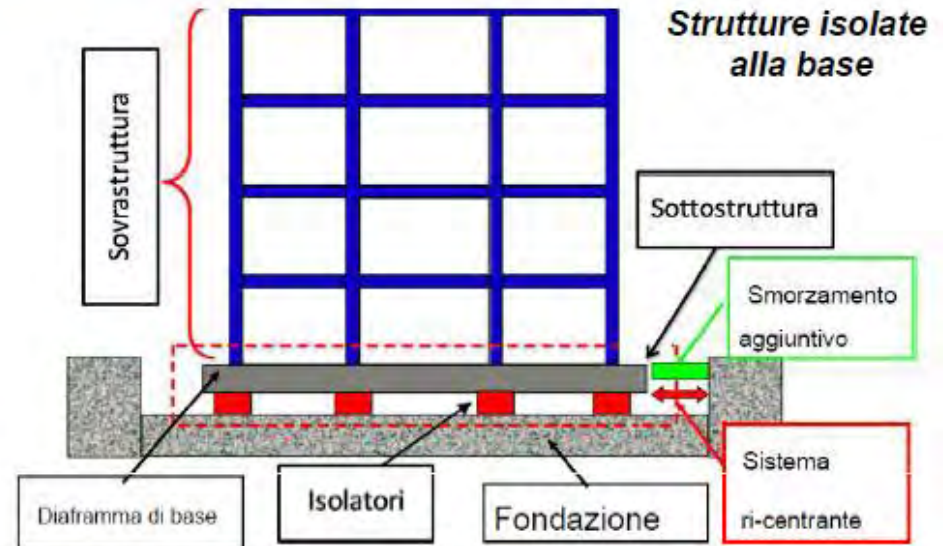
# Modello dell'oscillatore elementare



*Serbatoi pensili*



*Modello SDOF*



*Ponti a travata continua*



*Capannoni industriali*

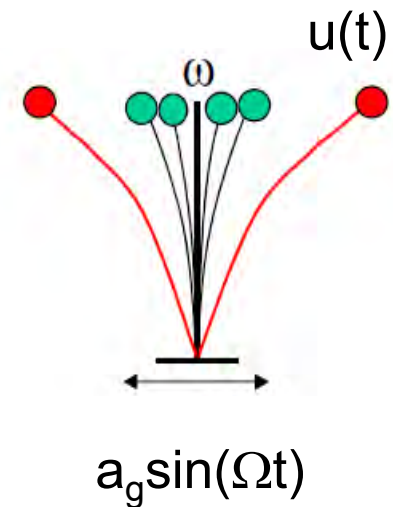
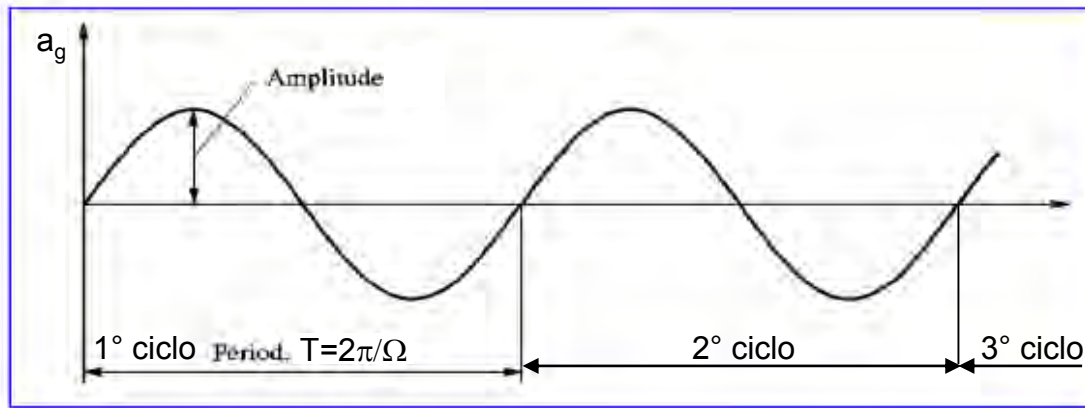
**Modello a 1 g.d.l. (SDOF)**

**$M$  = Massa della struttura**

**$K$  = Rigidezza del vincolo**

# RISPOSTA DELL'OSCILLATORE AD UNA SINGOLA FORZANTE ARMONICA

(FORZANTE A BANDA STRETTA)

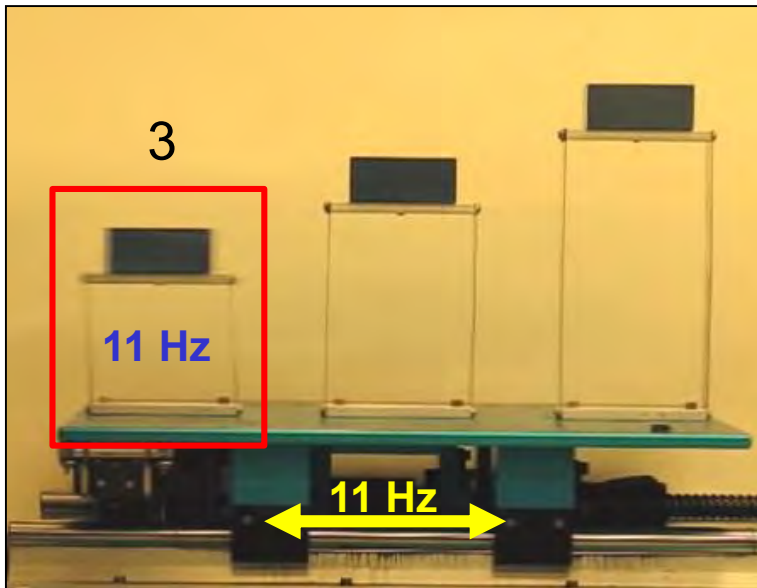
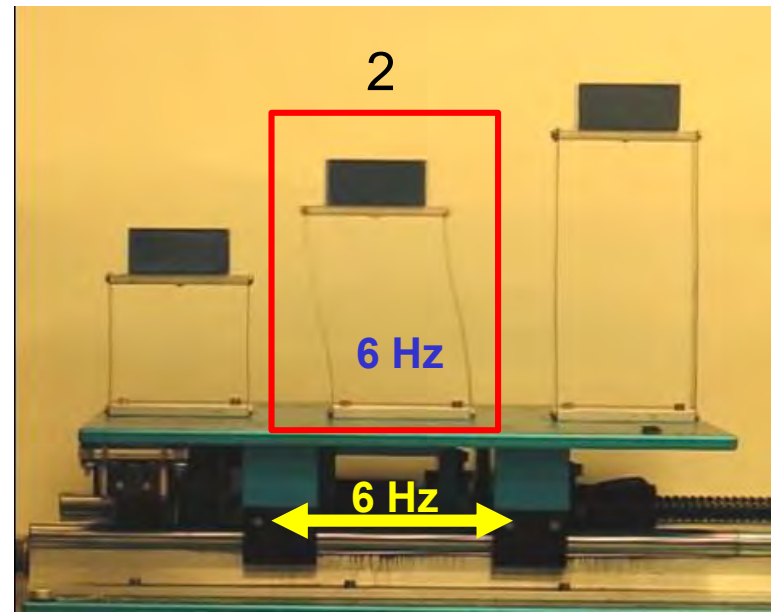
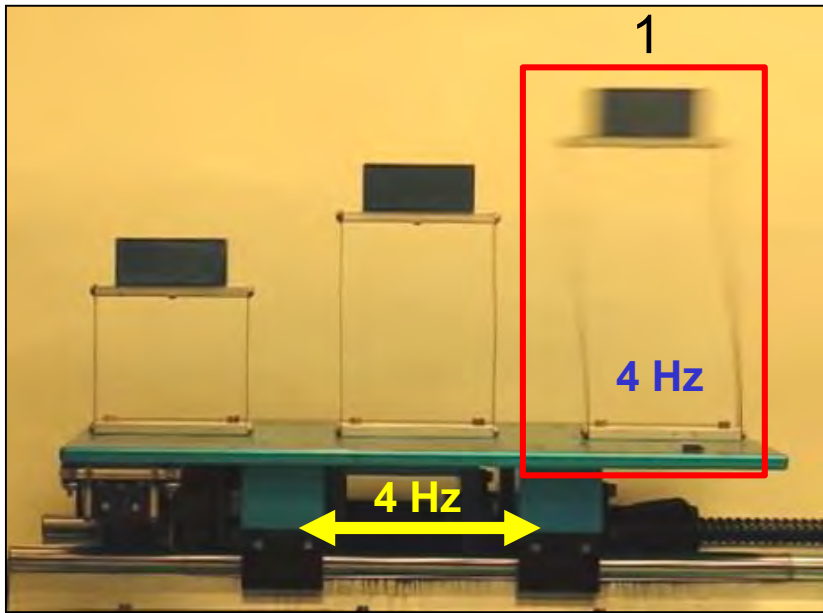


$\Omega$  = frequenza della forzante

$\omega$  = frequenza di oscillazione naturale

Forzante armonica = somma di cicli singoli consecutivi

(moto impresso armonico)

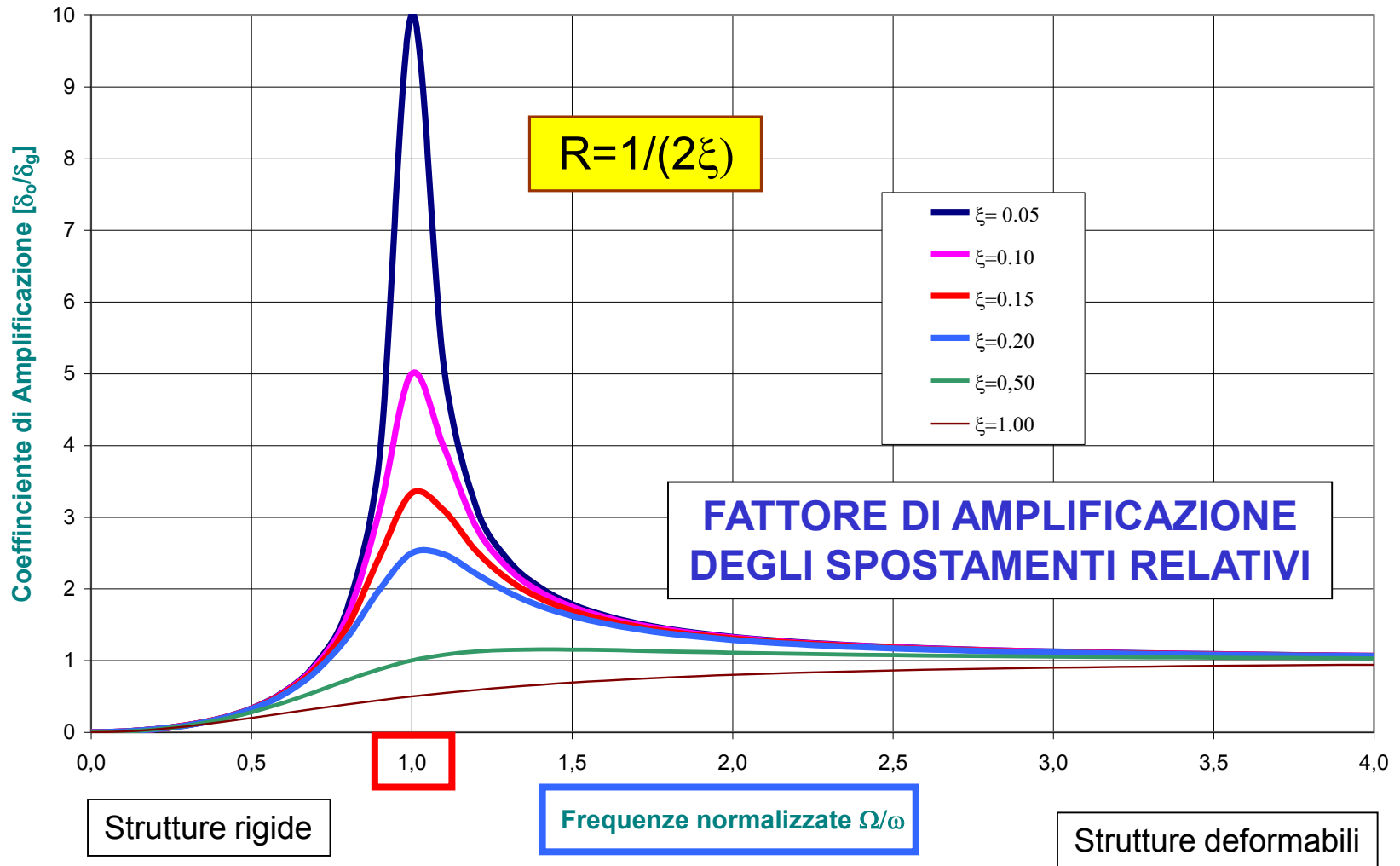


## Prova su tavola vibrante

[SDOF Resonance Vibration Test]

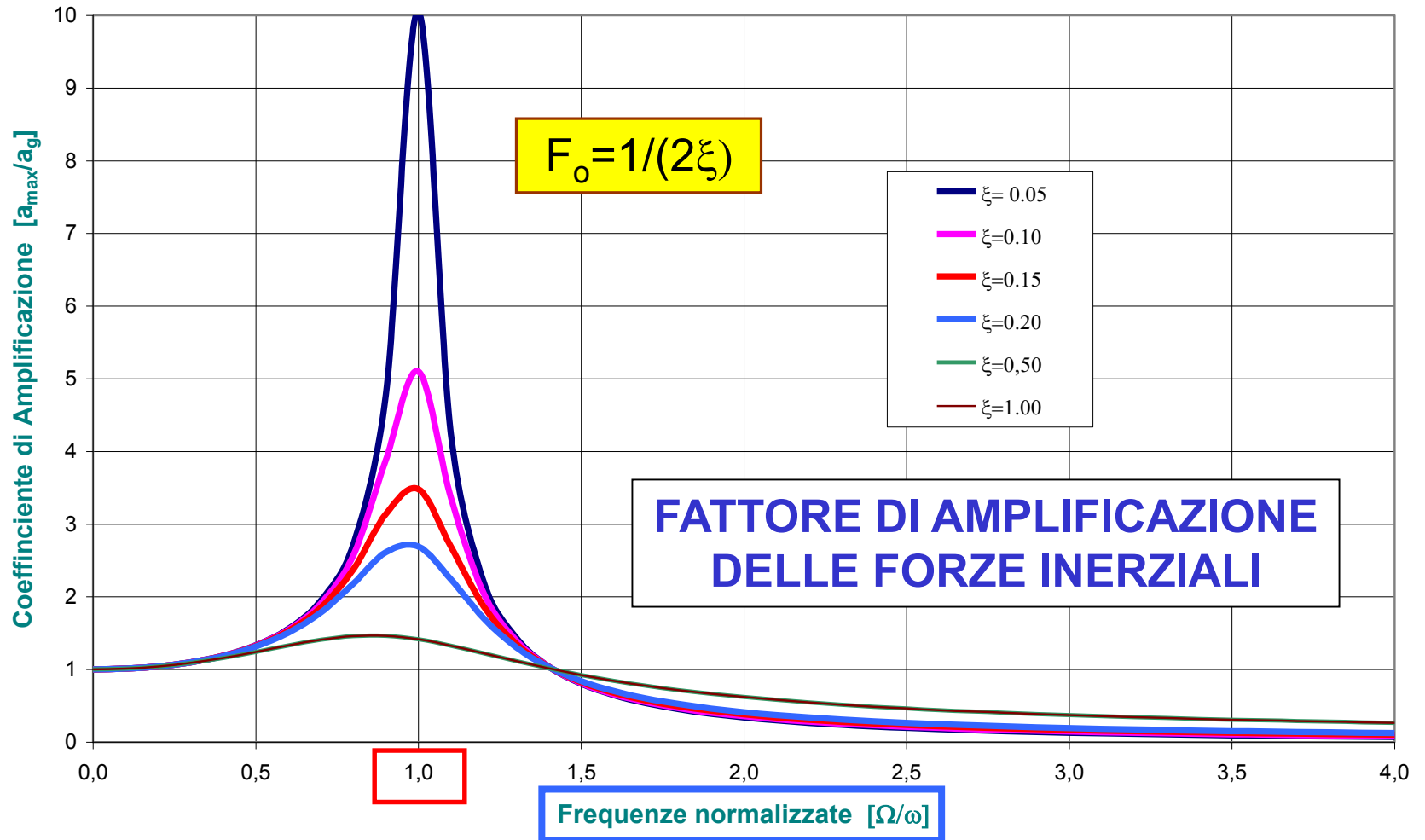
Quando la frequenza di eccitazione eguaglia la frequenza naturale di un oscillatore, solo questo amplifica il proprio moto mentre gli altri non manifestano amplificazioni apprezz.

# Coefficiente di Amplificazione dello Spostamento Relativo dell'Oscillatore



Fattore di amplificazione dinamica degli spostamenti (relativi) dell'oscillatore

## Coefficiente di Amplificazione dell'Accelerazione Assoluta dell'Oscillatore



Risposta  
quasi statica  
(rigidezza)

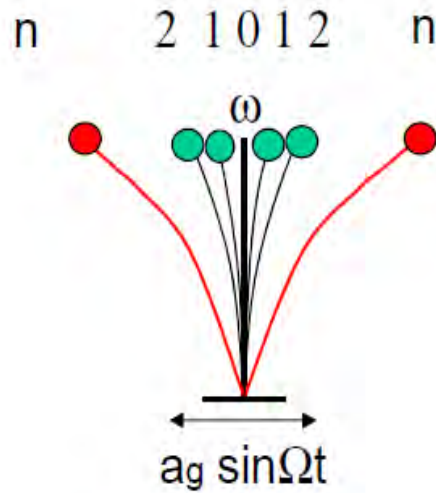
Risposta  
risonante  
(smorzamento)

Risposta  
sismografica  
(massa)



# RISONANZA STRUTTURALE

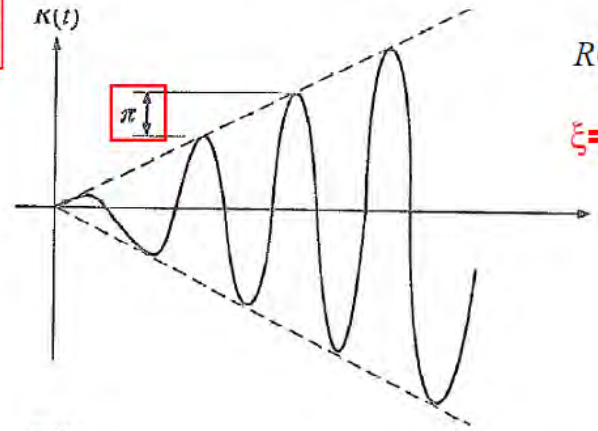
## AMPLIFICAZIONE PER RISONANZA



$$\Omega = \omega$$

RISONANZA

$$R(t) = \frac{\delta_{din}}{\delta_{st}}$$



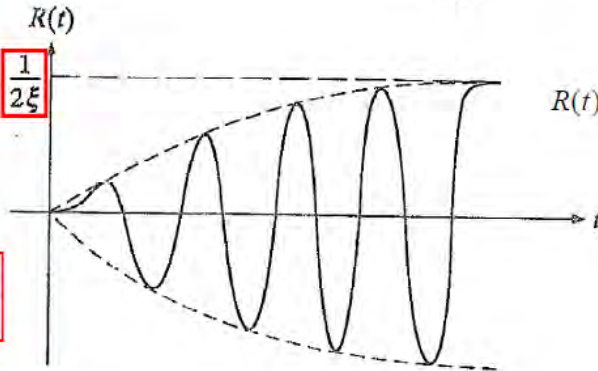
$$R(t) = \frac{1}{2} \cdot [\sin \omega t - \omega t \cdot \cos \omega t]$$

$$\xi = 0.00 \quad R_{max} = \infty$$

Sistemi non smorzati

Carico ciclico

Response ratio,  $R(t)$



$$R(t) = \frac{1}{2\xi} \cdot [(e^{-\xi\omega t} - 1) \cdot \cos \omega t + \xi \cdot e^{-\xi\omega t} \cdot \sin \omega t]$$

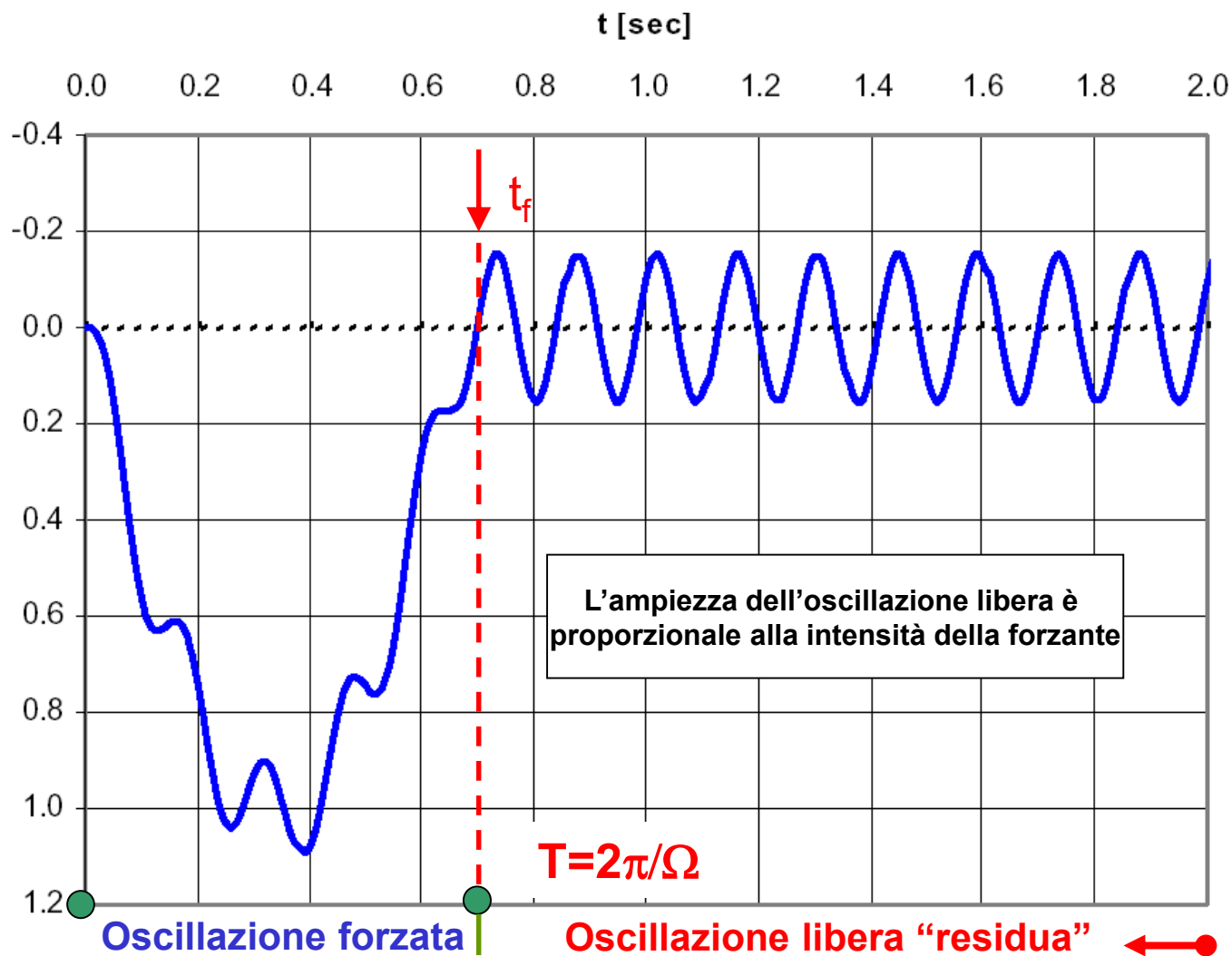
Sistemi smorzati

$$\xi = 0.05 \quad R_{max} = 10$$

$$\xi = 0.02 \quad R_{max} = 25$$

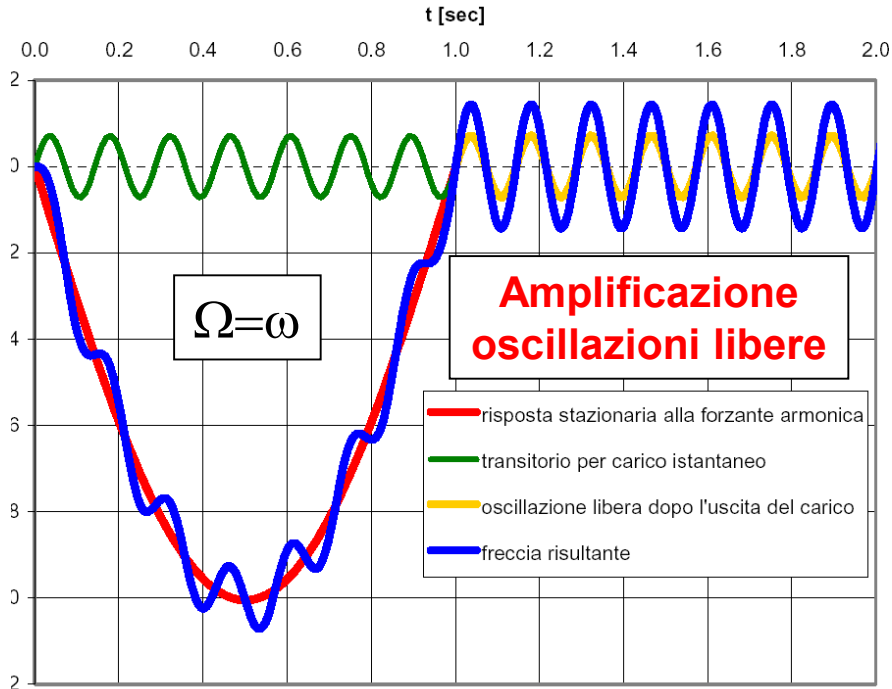
$$R(t) = \frac{\delta_{din}}{\delta_{st}}$$

# Risposta ad un singolo impulso sinusoidale



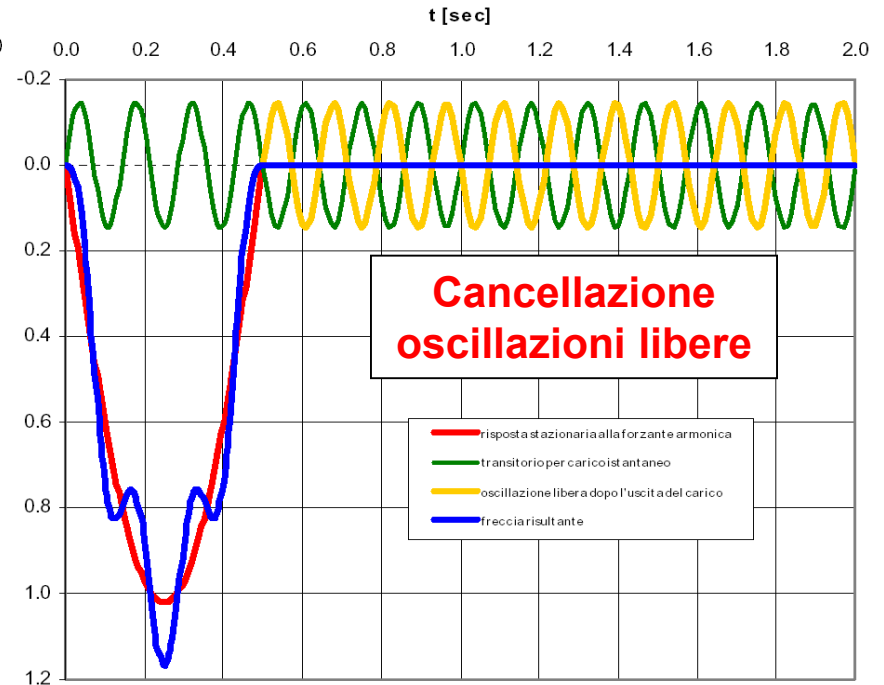
# Risposta ad un singolo impulso sinusoidale

Amplificazione delle vibrazioni libere

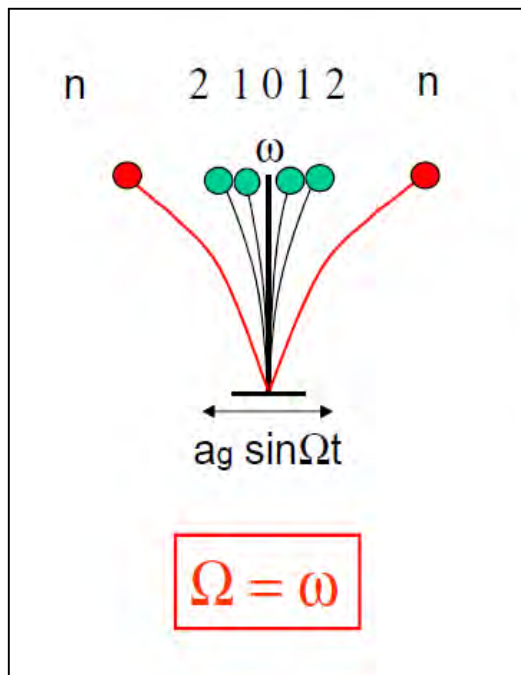


**Amplificazione max ( $\Omega=\omega$ )  
delle oscillazioni libere residue**

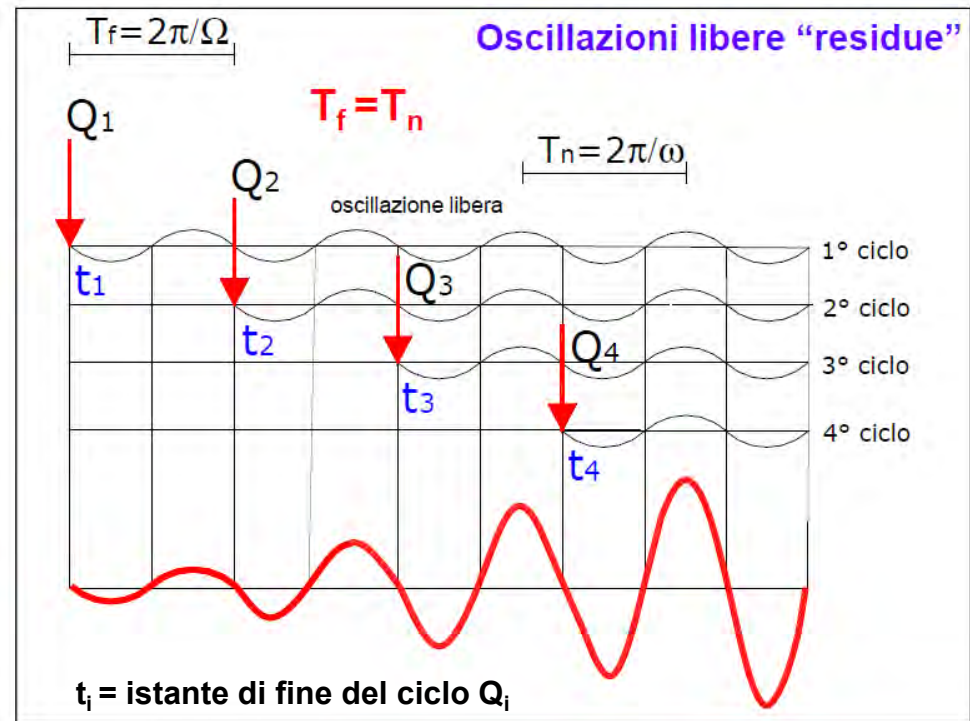
Cancellazione delle vibrazioni libere



**Cancellazione delle  
oscillazioni libere residue**



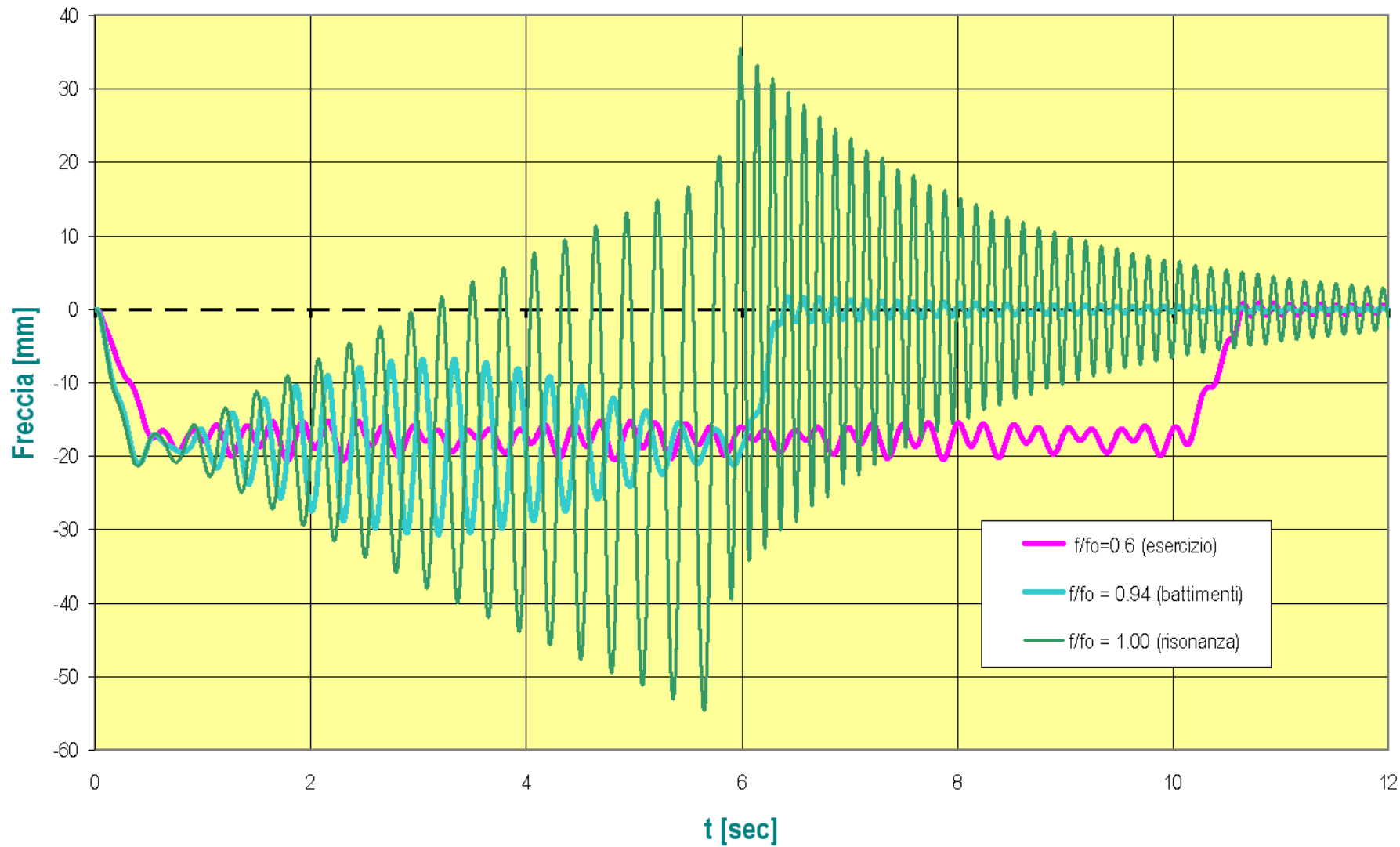
**RISONANZA**



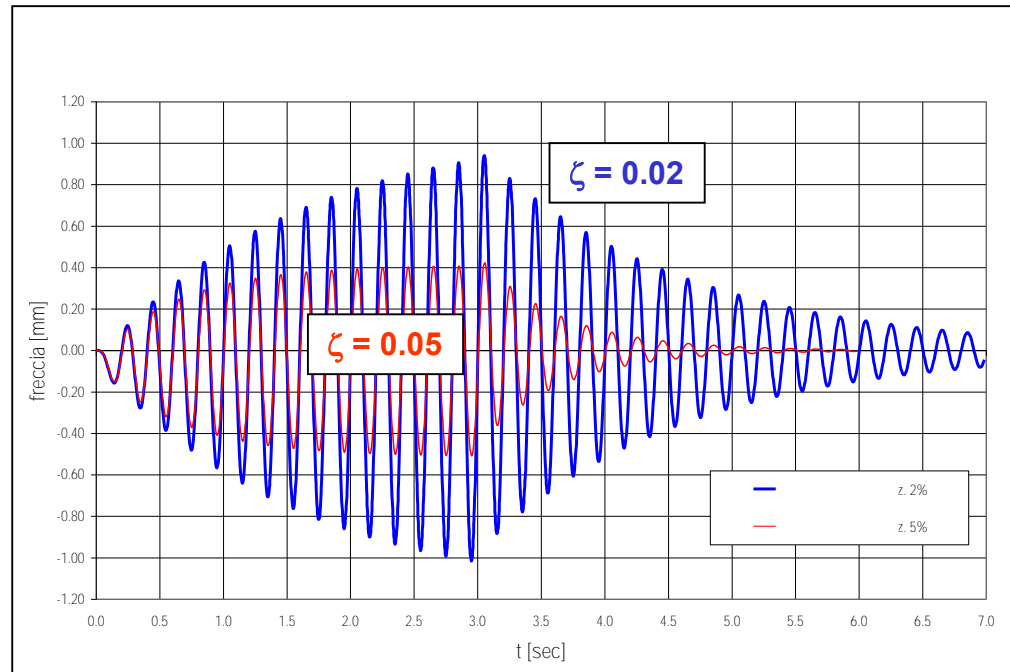
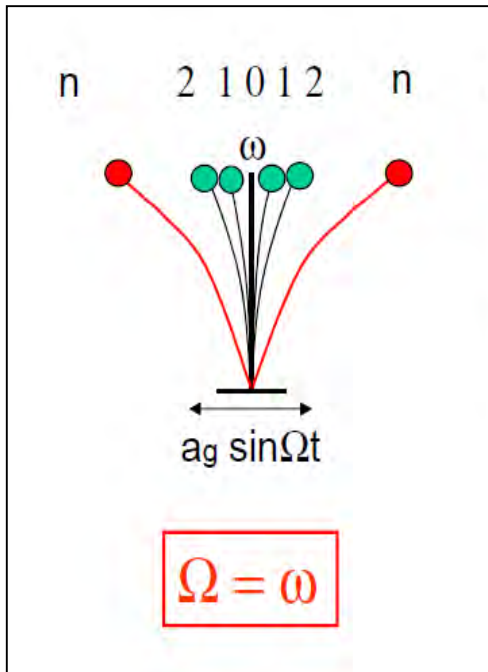
Sovrapposizione delle **vibrazioni libere** in **condizioni di risonanza**

**LA RISONANZA COSTITUISCE UN'AMPLIFICAZIONE CONTINUA DEL MOTO CHE SI MANIFESTA ALLA FREQUENZA NATURALE DI OSCILLAZIONE. TRAE ORIGINE DALLA SOMMA IN FASE DELLE OSCILLAZIONI LIBERE CHE IL CICLO DI CARICO LASCIA MAN MANO IN EREDITA' AL SUO CESSARE. QUANDO LA FREQUENZA DELLA FORZANTE ALLA QUALE SI GENERANO LE VIBRAZIONI LIBERE RESIDUE COINCIDE CON QUELLA DI OSCILLAZIONE NATURALE, LE VIBRAZIONI LIBERE RAGGIUNGONO IL LORO MASSIMO NELLO STESSO ISTANTE. IN QUESTE CASO IL MOTO SI RINFORZA NEL TEMPO SINO A QUANDO AGISCE LA FORZANTE.**

## Time History - Oscillazione forzata (20 cicli)



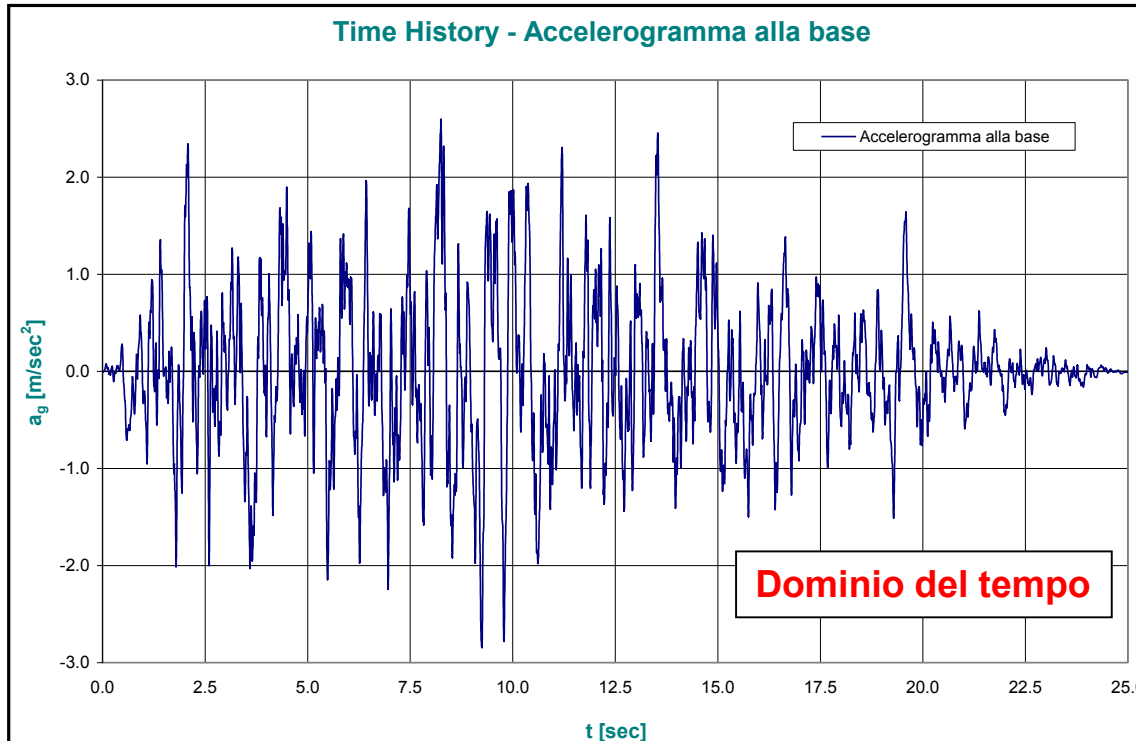




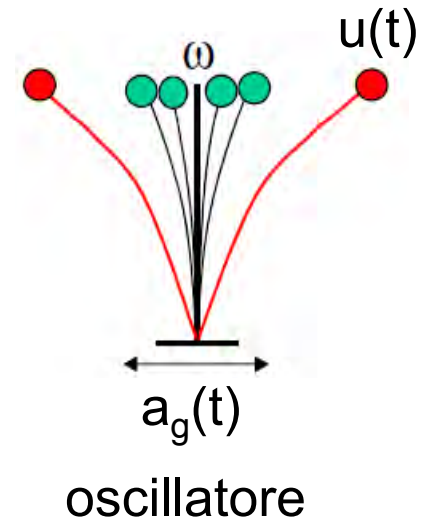
## RISONANZA IN PRESENZA DI SMORZAMENTO

PER EFFETTO DELLO SMORZAMENTO L'OSCILLAZIONE RESIDUA RISULTANTE TENDE POI A STABILIZZARSI POICHE' LE PRIME OSCILLAZIONI RESIDUE CHE TENDONO A ESAURIRSI VENGONO SOSTITuite DA QUELLE GENERATE DAGLI ULTIMI CICLI DI CARICO.

# RISPOSTA DELL'OSCILLATORE AD UNA FORZANTE SISMICA



FORZANTE A  
BANDA LARGA



ANALISI  
DINAMICA

TIME HISTORY

Restituisce l'oscillazione  $u(t)$  della struttura forzata dal sisma, ossia da una forzante ad ampio spettro assegnata sotto forma di accelerogramma  $a_g(t)$

# RISPOSTA DELL'OSCILLATORE AD UNA FORZANTE SISMICA

(FORZANTE A BANDA LARGA)

$\omega$  = frequenza di oscillazione naturale

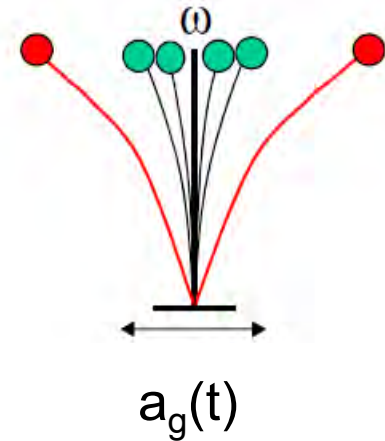
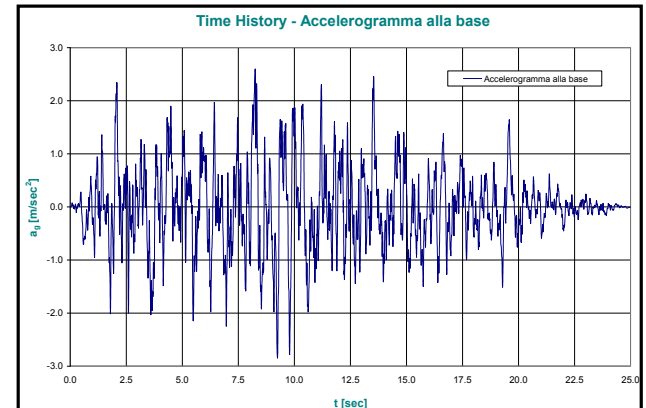
$\Omega_1$  = 1a frequenza della forzante

$\Omega_2$  = 2a frequenza della forzante

$\Omega_n$  = n-esima frequenza della forzante

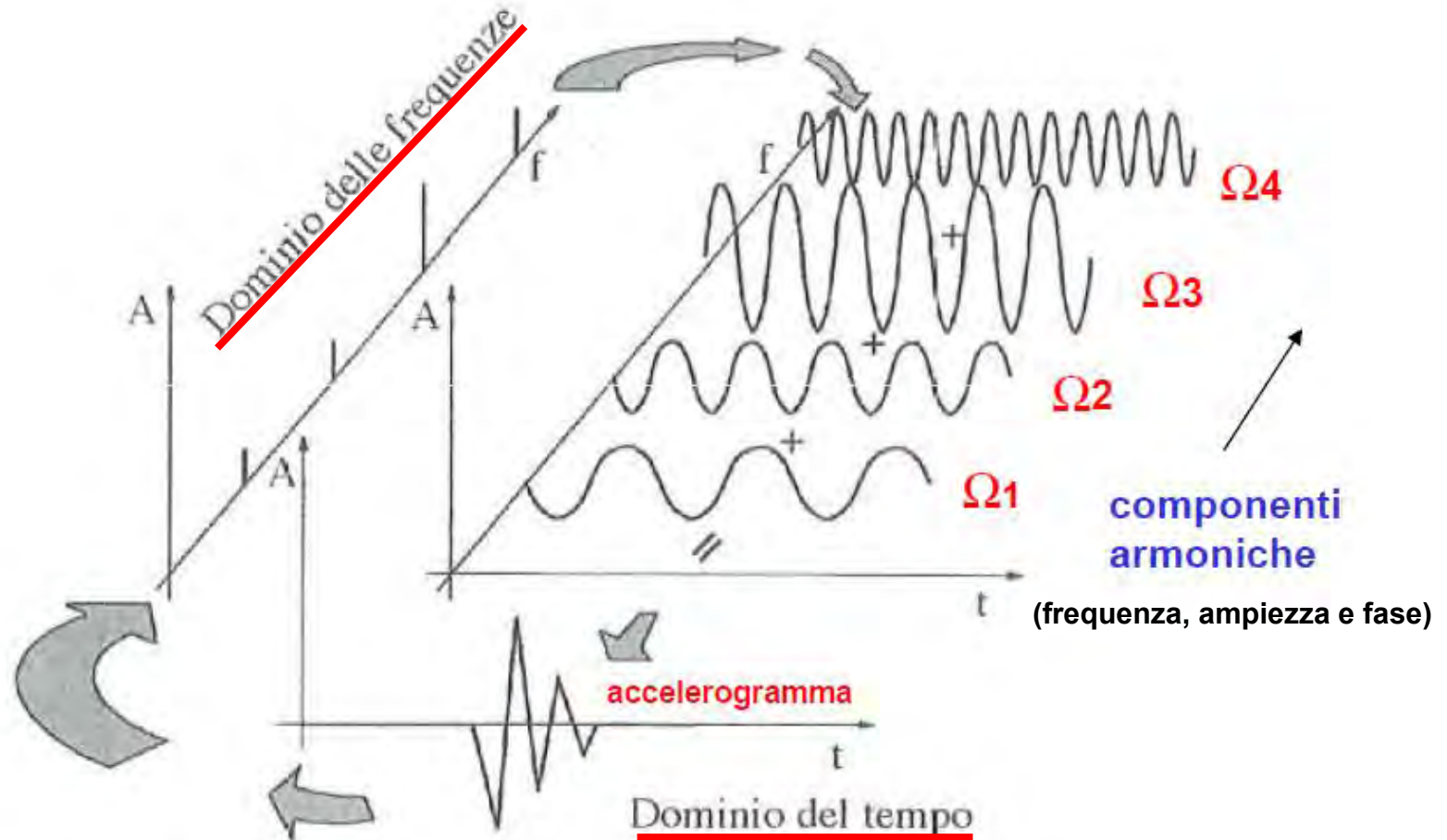
(Serie di Fourier  $T < \infty$ ; Trasformata di Fourier  $T = \infty$ )

Un accelerogramma si compone di infinite componenti armoniche di frequenza  $\Omega_n = 2\pi n/T$

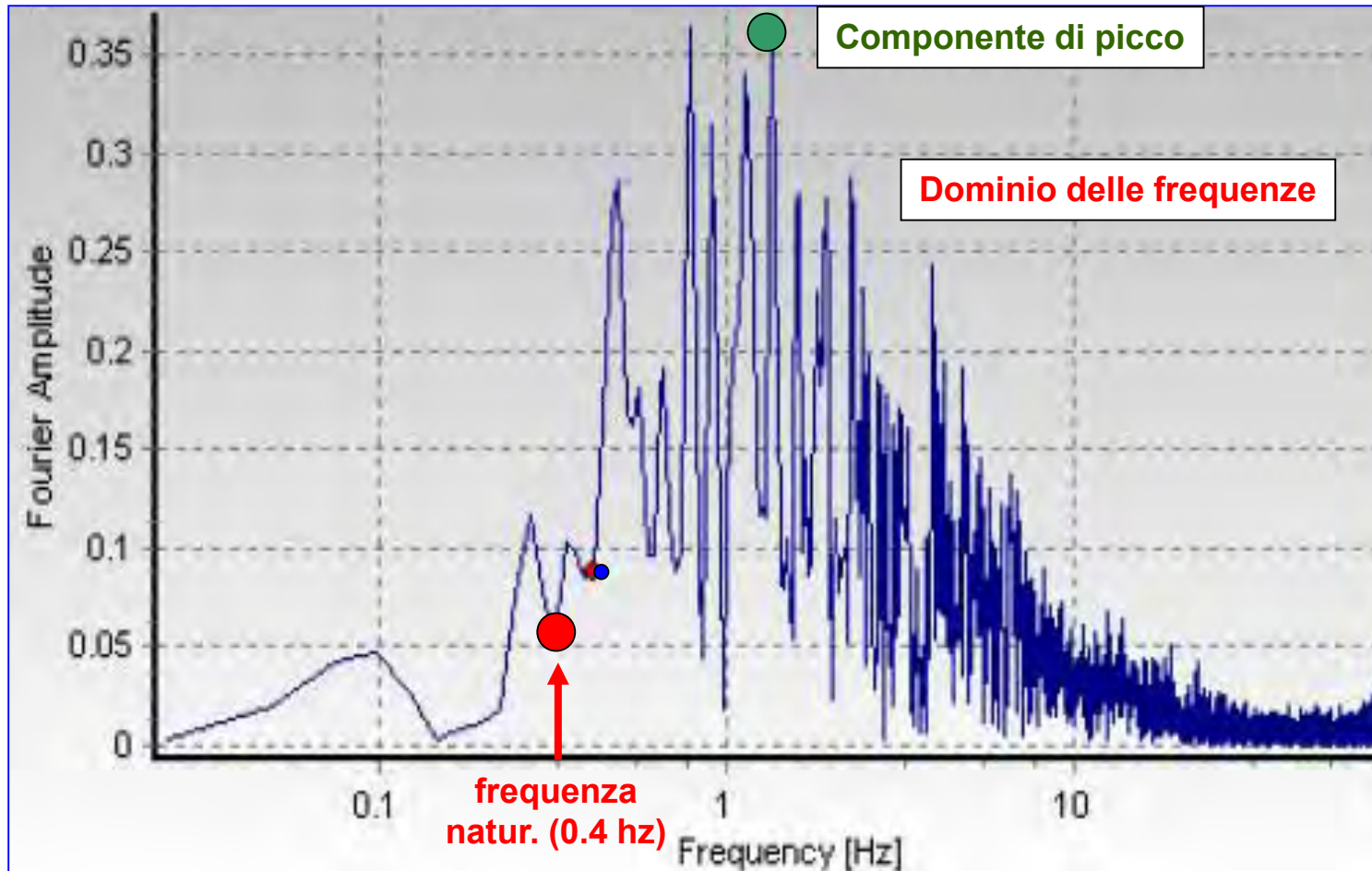


$$a_g(t) = \sum a_{gn} \sin(\Omega_n t - \phi_n)$$

# ANALISI DI FOURIER DI UN SEGNALE SISMICO



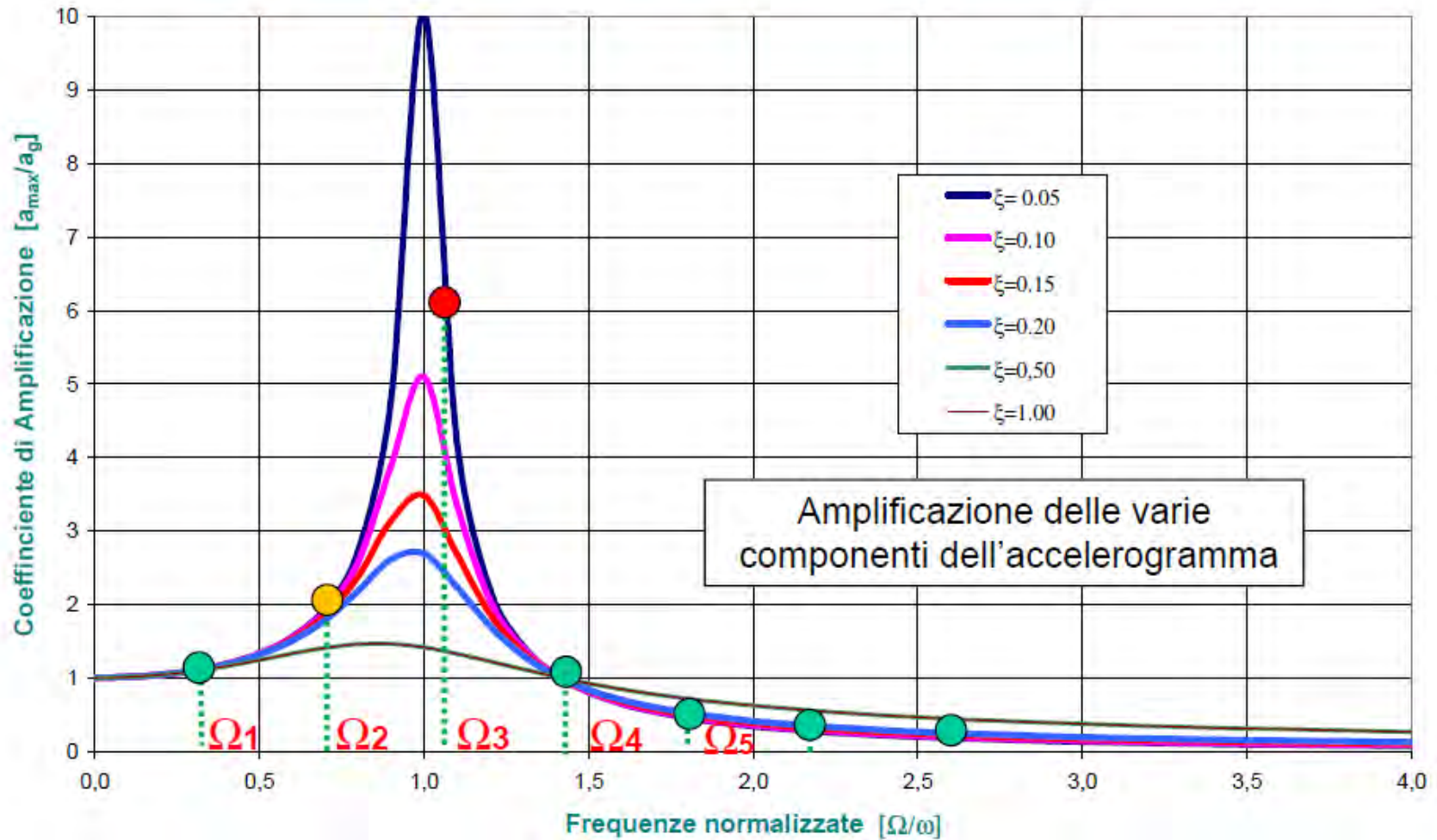
**SCOMPOSIZIONE DELL'ACCELEROGRAMMA IN COMPONENTI ARMONICHE – DOMINIO DELLE FREQUENZE**



Spettro in frequenza di un accelerogramma sismico  $A_g(\Omega)$



## Coefficiente di Amplificazione dell'Accelerazione Assoluta dell'Oscillatore



$$H_A(\Omega) = \omega^2 |H(\Omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + 4\zeta^2 (\Omega/\omega)^2}}$$

**Analisi nel dominio delle frequenze - Spostamenti**

Input  
sismico



filtro  
(struttura)



risposta  
struttura in  
spostamento

$$A_g(\Omega)$$

SPETTRO DI FOURIER ACCELERAZIONE

$$|H(\Omega)| = \frac{1}{\omega^2 \cdot \sqrt{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + 4\zeta^2(\Omega/\omega)^2}}$$

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO  
(SPOSTAMENTO)

$$U(\Omega) = H(\Omega) \cdot A_g(\Omega)$$

SPETTRO DI FOURIER SPOSTAMENTO

# Analisi nel dominio delle frequenze - Spostamenti

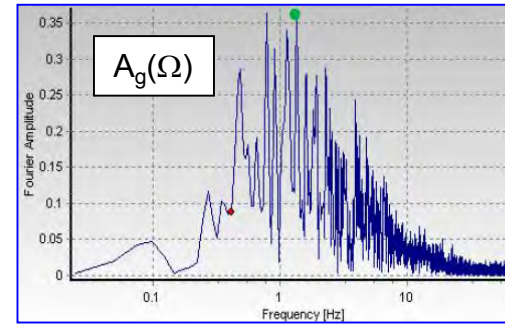
Input  
sismico



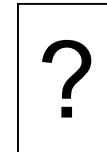
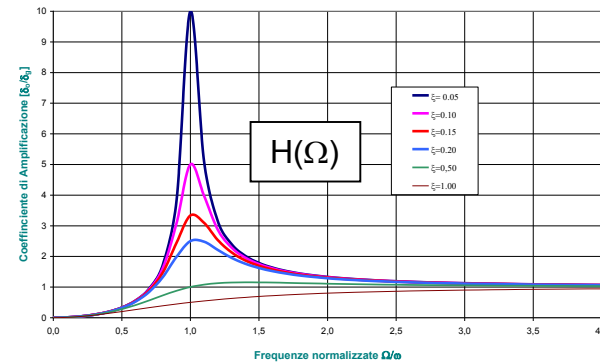
filtro  
(struttura)



risposta  
struttura in  
spostamento



Coefficiente di Amplificazione dello Spostamento Relativo dell'Oscillatore



# Analisi nel dominio delle frequenze - Spostamenti

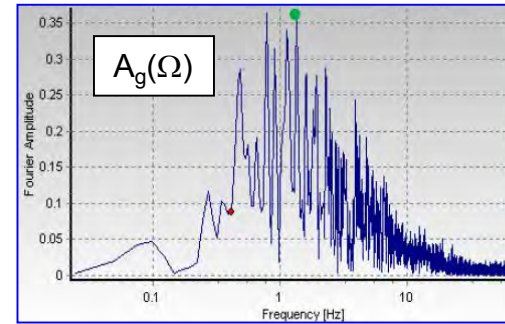
Input  
sismico



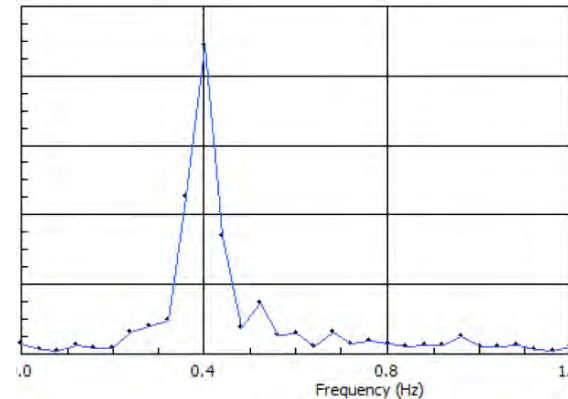
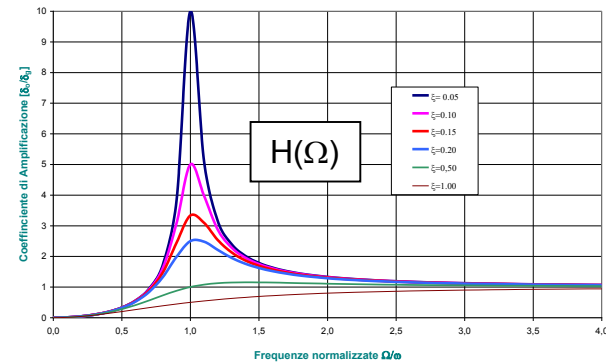
Filtro  
(struttura)



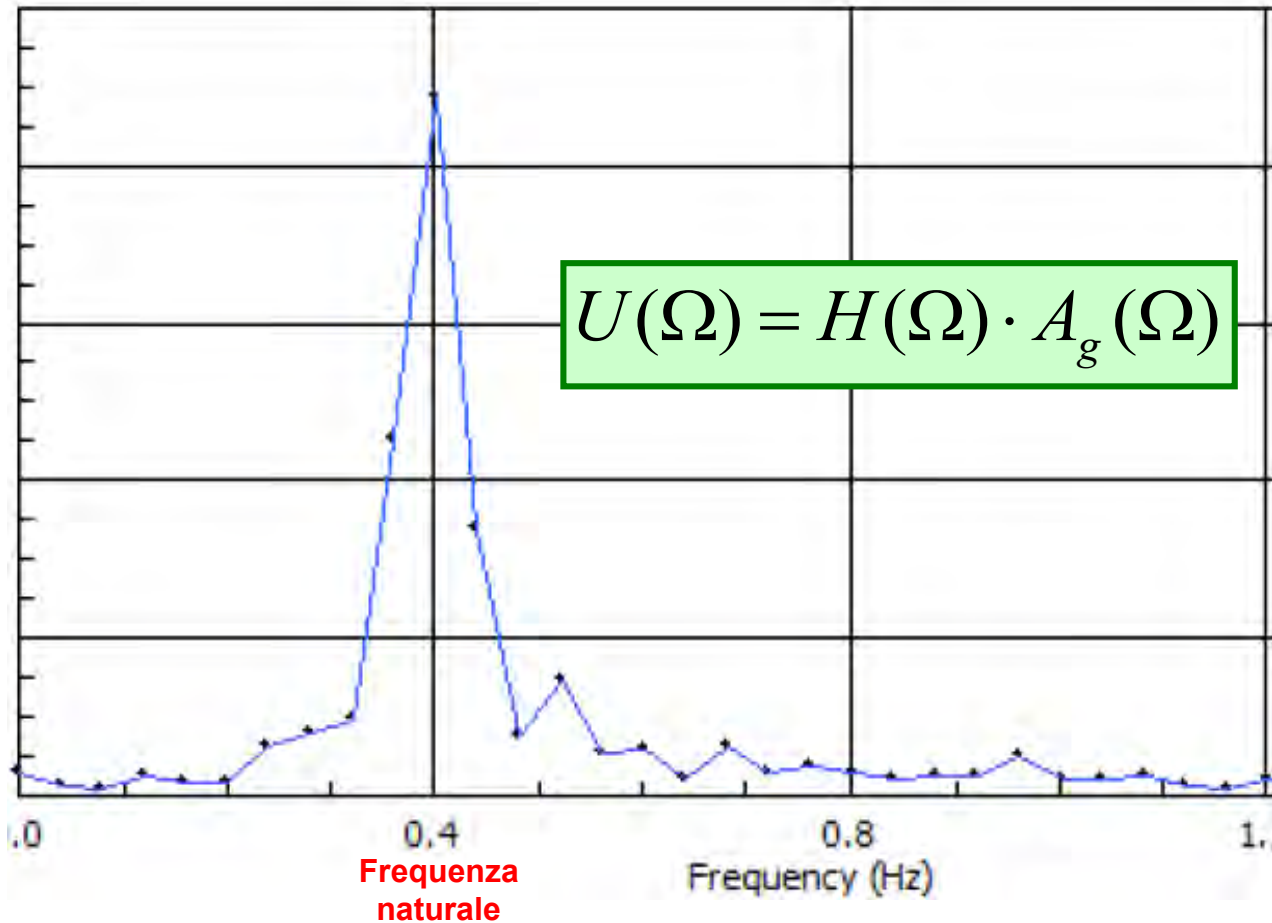
Risposta della  
struttura in  
spostamento



Coefficiente di Amplificazione dello Spostamento Relativo dell'Oscillatore



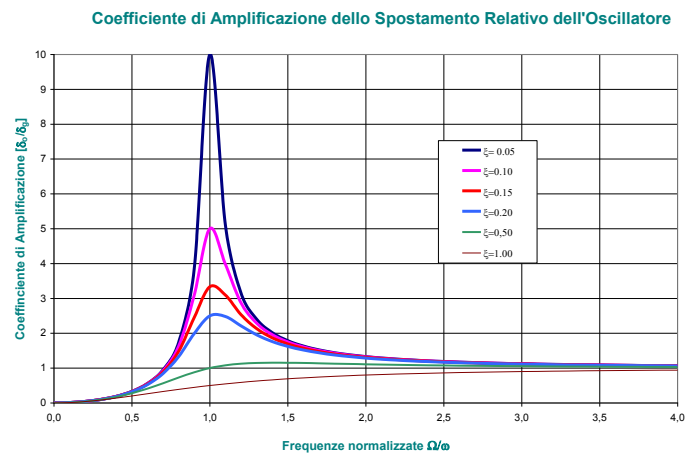
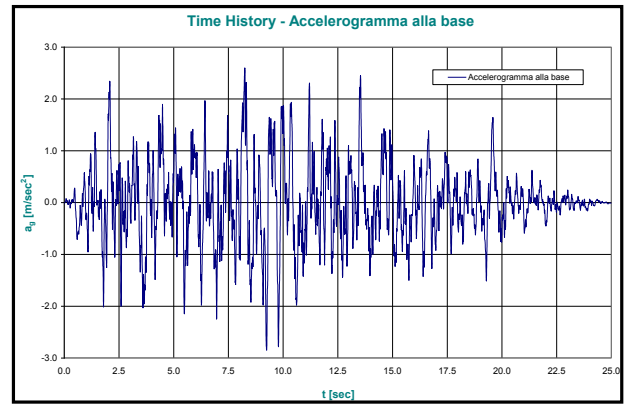
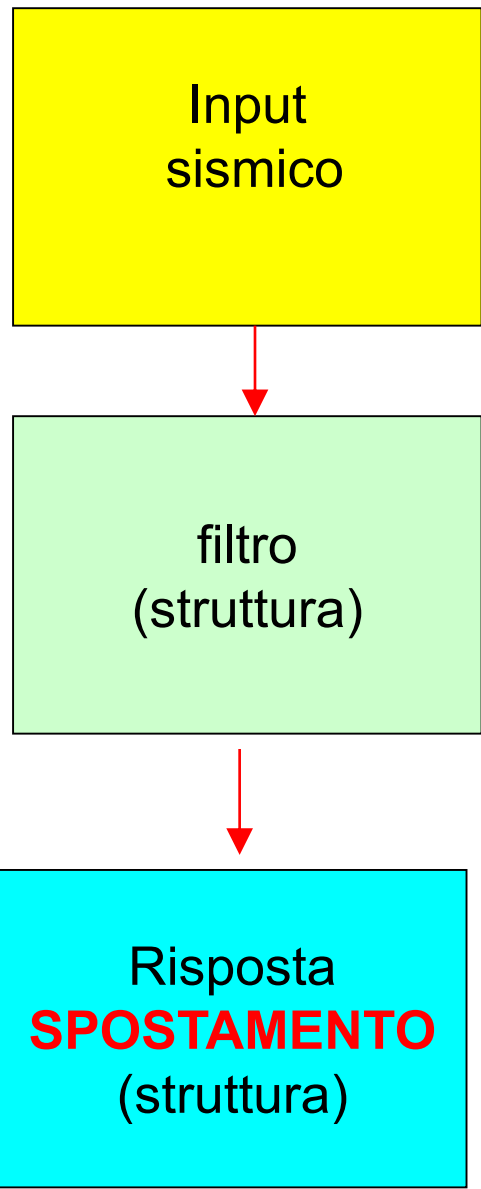
**Trasformata di Fourier dello spostamento  $U(\omega)$**



Spettro in frequenza della risposta strutturale  $U(\Omega)$



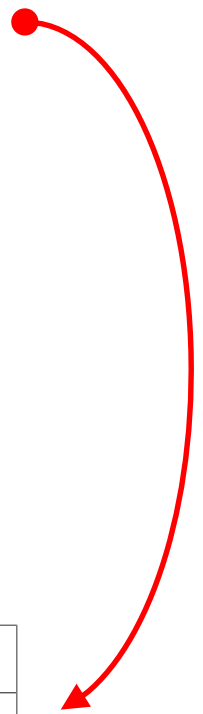
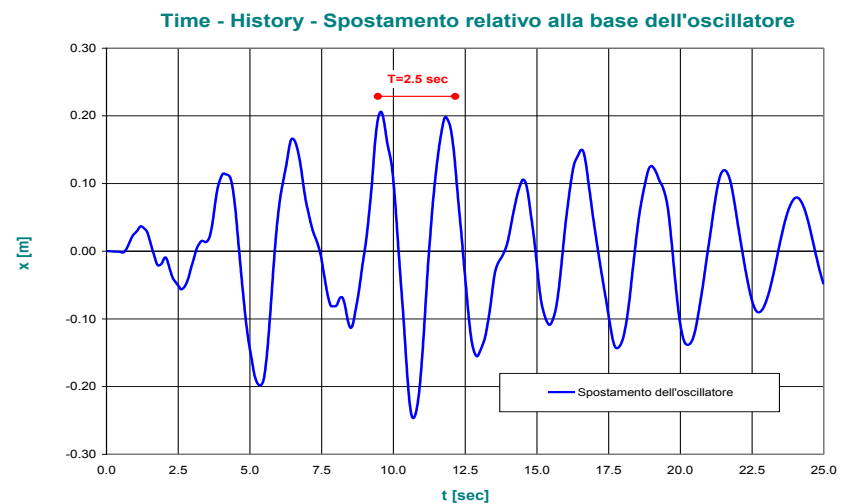
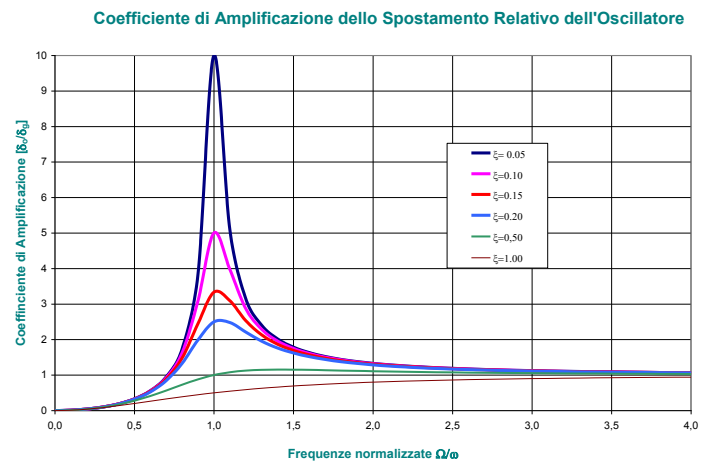
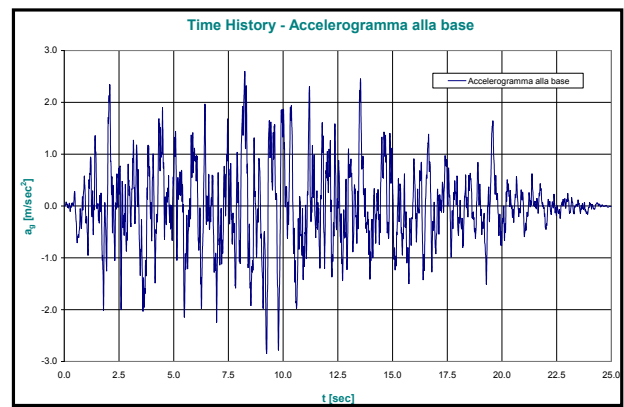
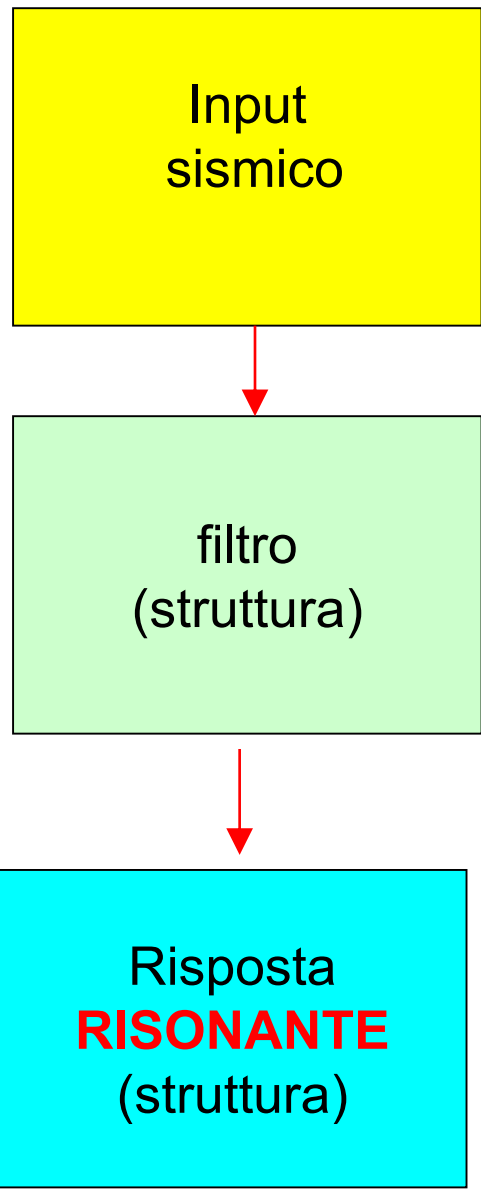
DOMINIO  
DEL  
TEMPO



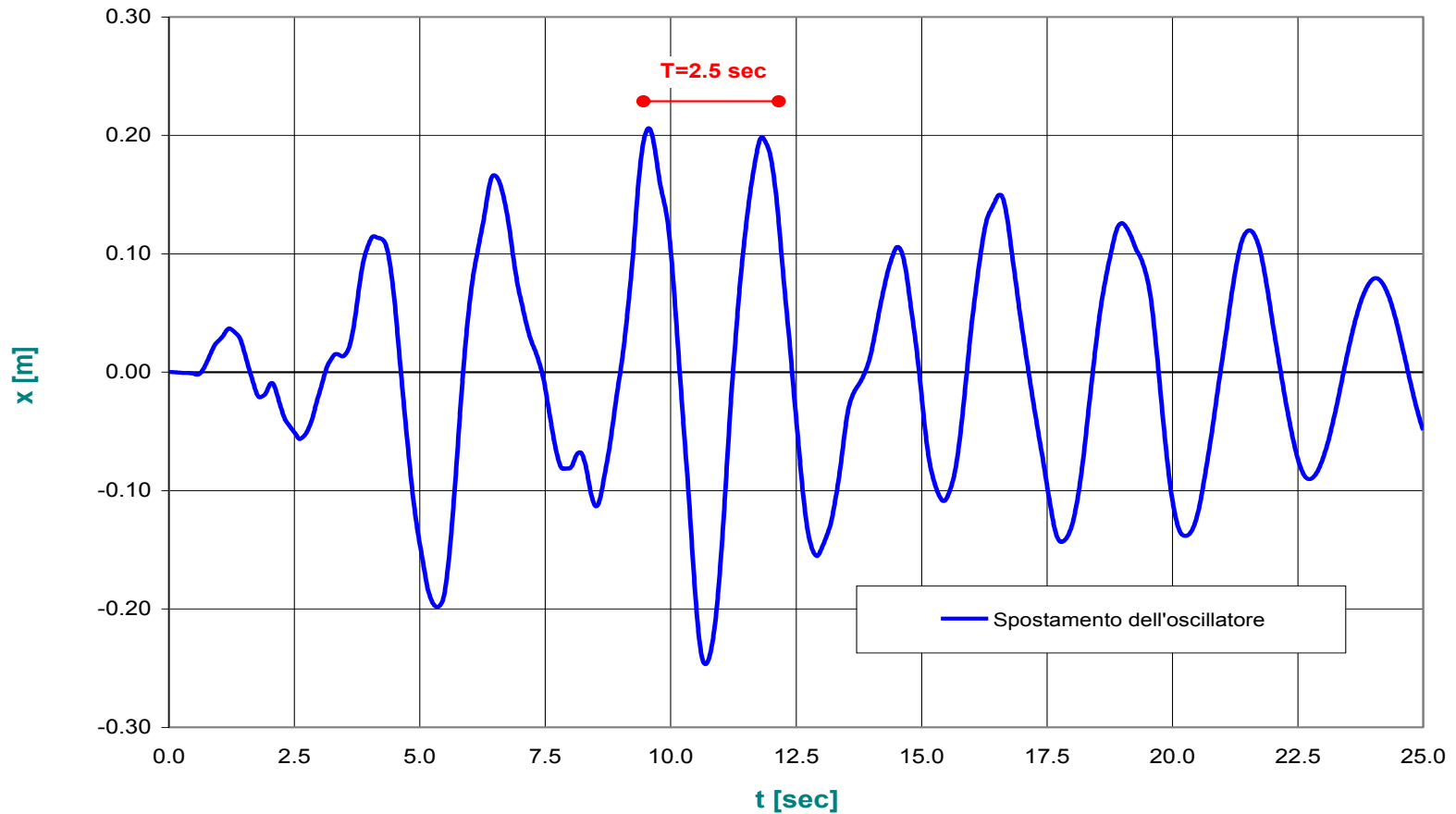
$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U(\Omega_n) \cos(\Omega_n t - \varphi_n)$$

(notazione simbolica)

DOMINIO  
DEL  
TEMPO



## Time - History - Spostamento relativo alla base dell'oscillatore



Time history dello spostamento  $U(t)$

# Analisi nel dominio delle frequenze - Accelerazione efficace

DOMINIO DELLE FREQUENZE

Input  
sismico



filtro  
(struttura)



risposta  
struttura in  
accelerazione

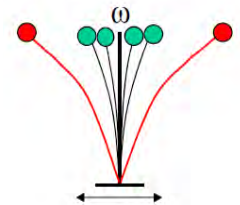
$$A_g(\Omega)$$

SPETTRO DI FOURIER ACCELERAZIONE

$$|HA(\Omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + 4\zeta^2(\Omega/\omega)^2}}$$

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO  
(ACCELERAZIONE)

$$S_e(\Omega) = H_A(\Omega) \cdot A_g(\Omega)$$



SPETTRO DI FOURIER PSEUDO-ACCELERAZIONE

# Analisi nel dominio delle frequenze - Accelerazione efficace

DOMINIO DELLE FREQUENZE

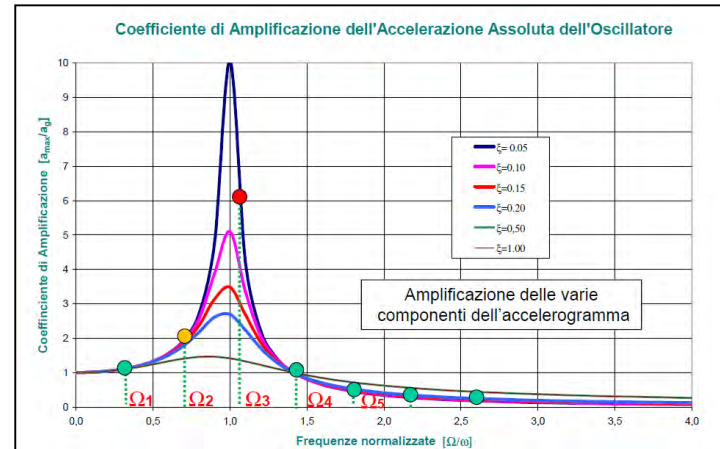
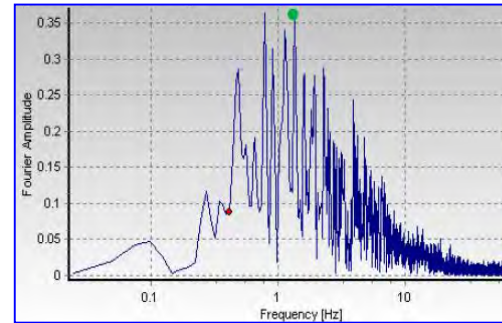
Input  
sismico



filtro  
(struttura)



risposta  
struttura in  
accelerazione



$$S_e(\Omega) = H_A(\Omega) \cdot A_g(\Omega)$$



**Struttura isolata alla base** [ $T_n = 2.5 \text{ sec}$  ;  $f_n = 0.4 \text{ hz}$ ,  $\zeta=0.10$ ]

**Frequenza di picco  $f_p = 1.2 \text{ hz}$**

Accelerazione di picco del terreno

$$A_g(1.2 \text{ hz}) = 0.280 \text{ g}$$

Fattore di amplificazione [ $\Omega/\omega=3$ ]

$$H_A(1.2 \text{ hz}) = 0.124$$

Accelerazione efficace massa isolata

$$S_e(1.2 \text{ hz}) = 0.045 \text{ g}$$

**Frequenza naturale  $f_n = 0.4 \text{ hz}$**

Accelerazione del terreno

$$A_g(0.4 \text{ hz}) = 0.04 \text{ g}$$

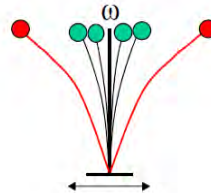
Fattore di amplificazione [ $\Omega/\omega=1$ ]

$$H_A(0.4 \text{ hz}) = 5.00$$

Accelerazione efficace massa isolata

$$S_e(0.4 \text{ hz}) = 0.20 \text{ g}$$

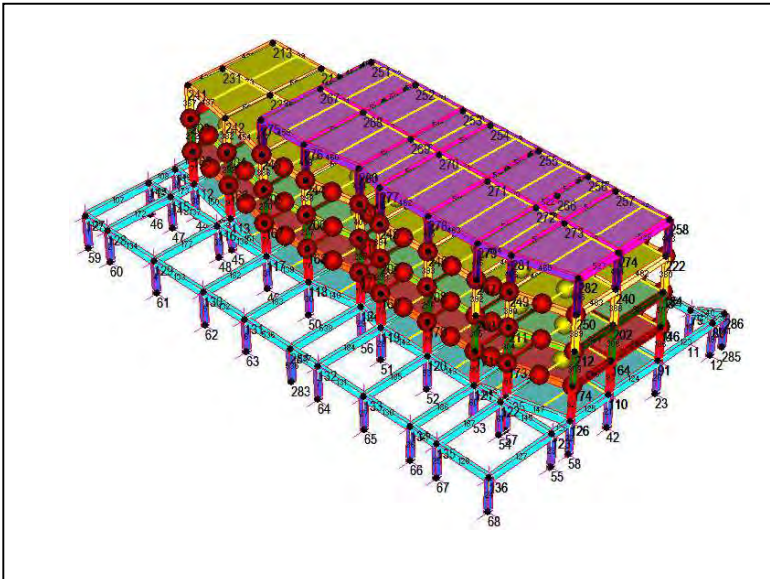
$$S_e(\Omega) = H_A(\Omega) \cdot A_g(\Omega)$$



$$S_e = 0.20 \text{ g} \quad \text{a} \quad 0.4 \text{ hz}$$

**RISPOSTA IN RISONANZA**

# ANALISI DINAMICA – DOMINIO DELLE FREQUENZE



**Annotazioni sul Comportamento Sismico Risonante  
delle Strutture Validato mediante Analisi Dinamiche  
Time History e Analisi nel Dominio delle Frequenze**

**Maurizio Lenzi, Paola Campana, Ivan Missiroli**

# Esempio di Analisi in Frequenza di **Strutture Isolate**

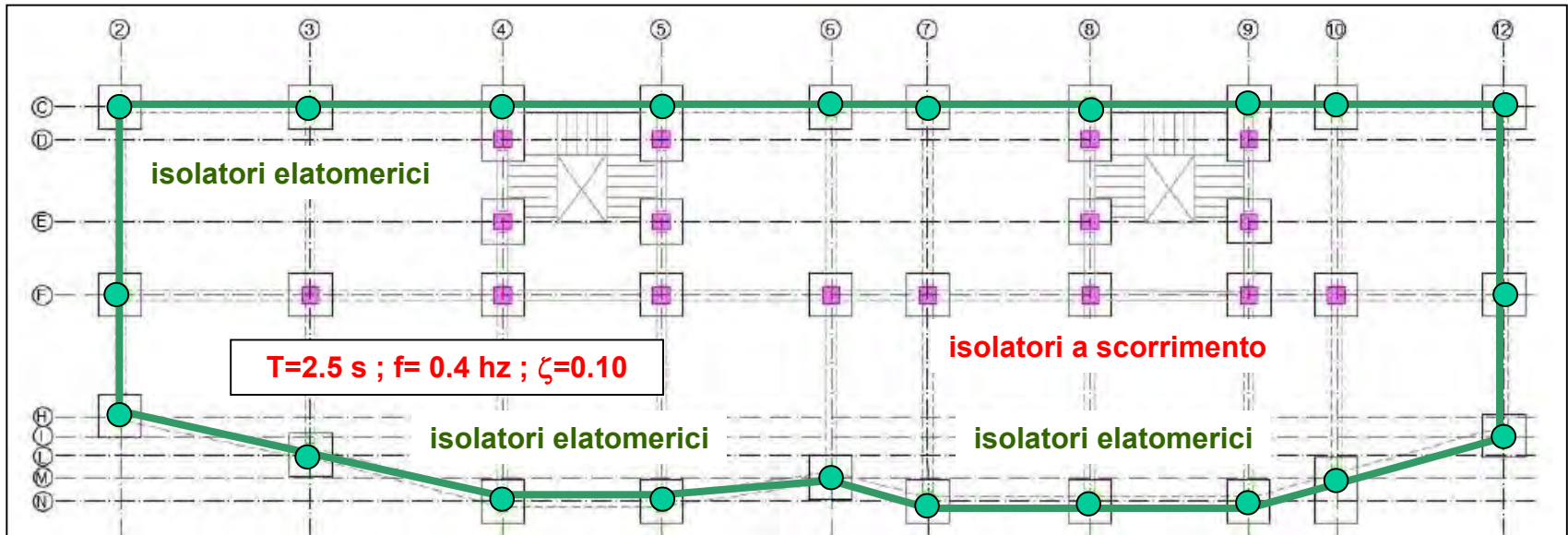
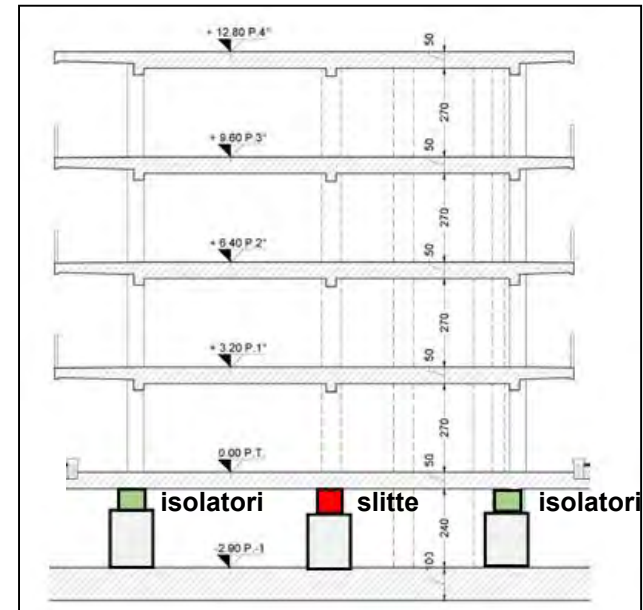
## Edificio residenziale multipiano

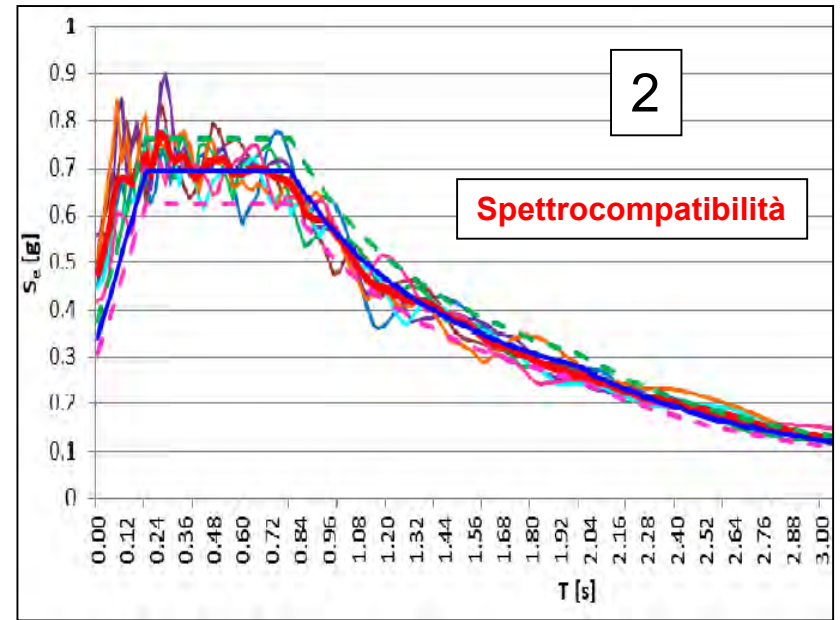
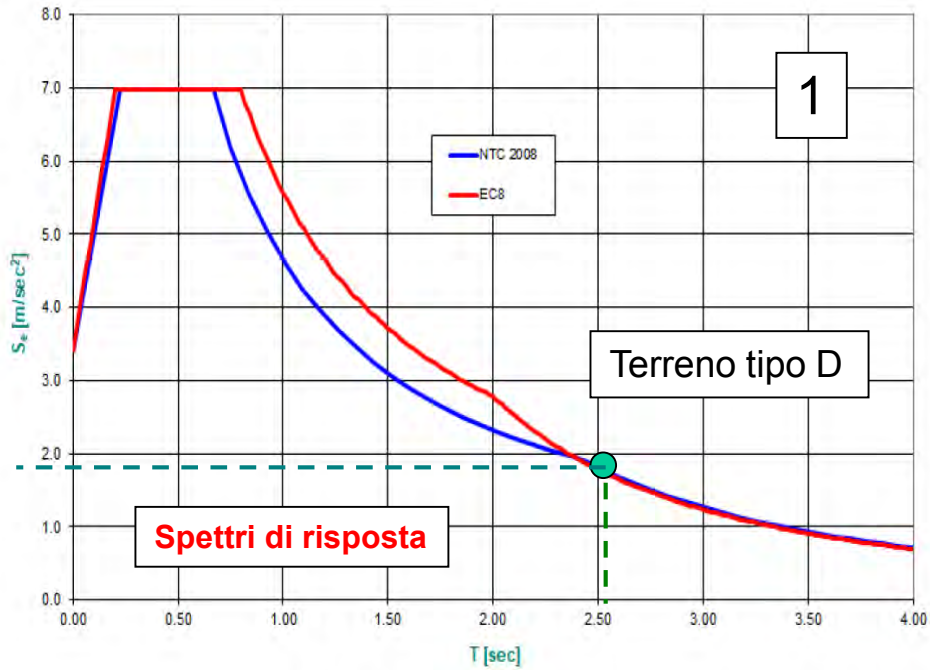
$N_o$  isolatori elastomerici ● = 22

$N_o$  isolatori a scorrimento ■ = 16

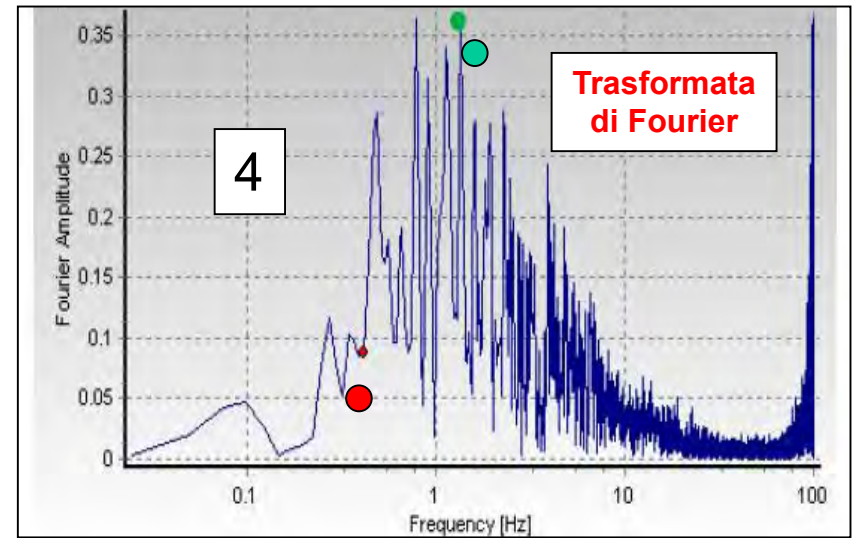
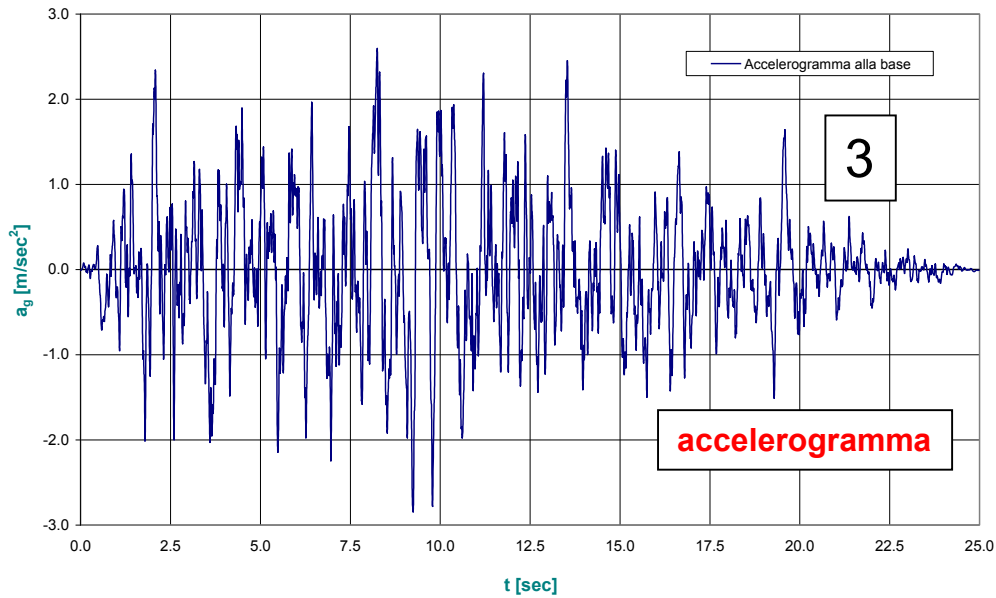
Diametro degli isolatori = 650 mm

$G = 0.4 \text{ N/mm}^2$  (Gomma soft)

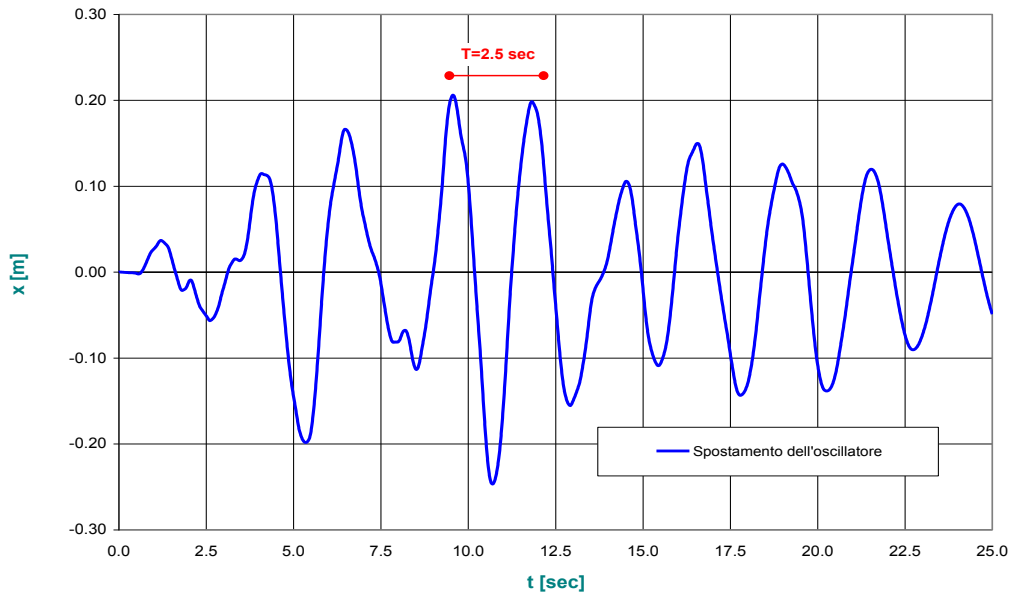




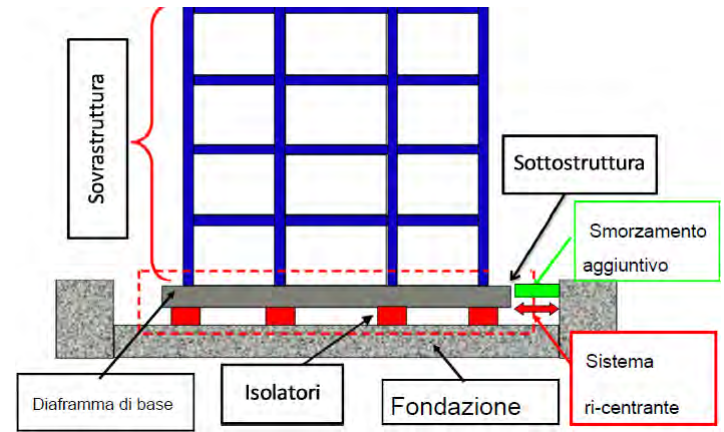
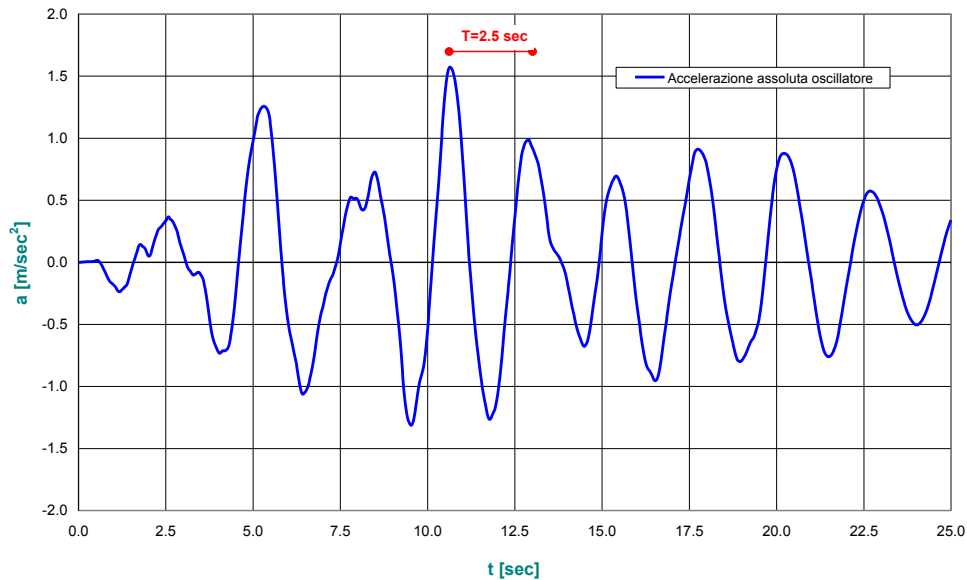
Time History - Accelerogramma alla base



Time - History - Spostamento relativo alla base dell'oscillatore



Time - History - Accelerazione assoluta dell'oscillatore



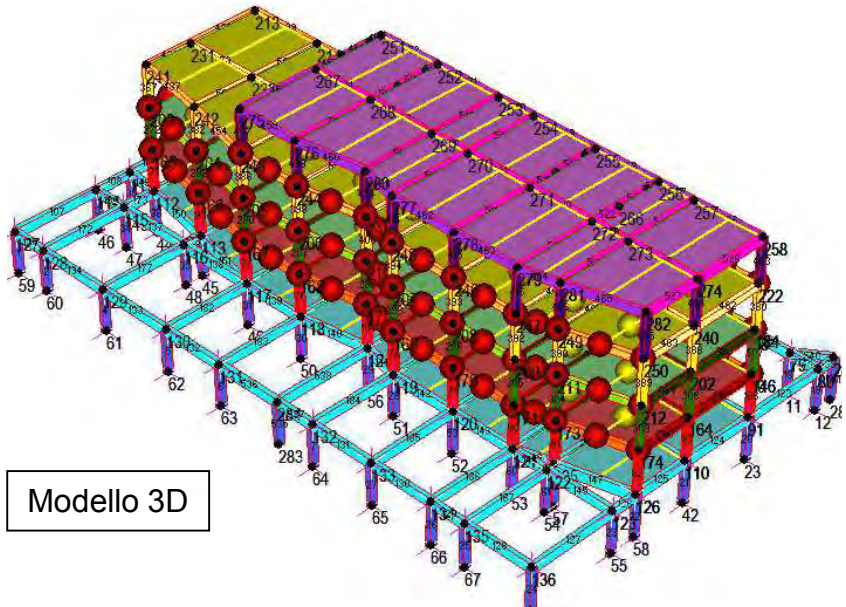
**TIME HISTORY**  
(Metodo di Newmark)  
**MODELLO**  
**OSCILLATORE**  
**ELEMENTARE**

**Oscillazione forzata**  
**alla frequenza**  
**di risonanza**  
**( $T_n=2.5$  sec)**

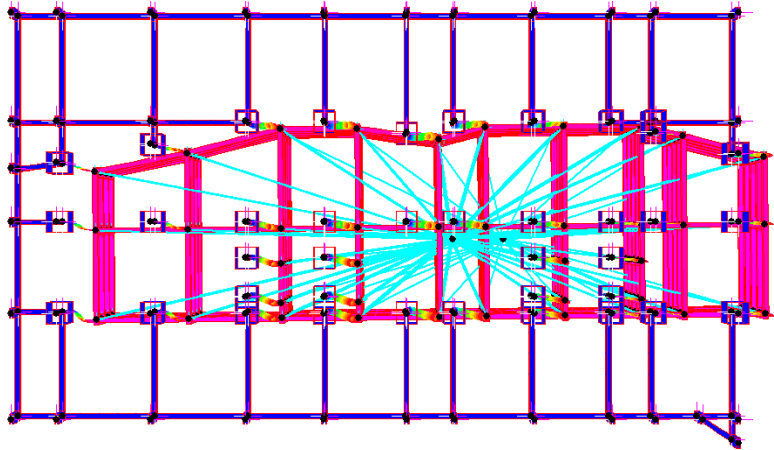




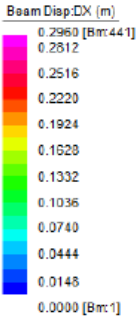
# Modello numerico FEM



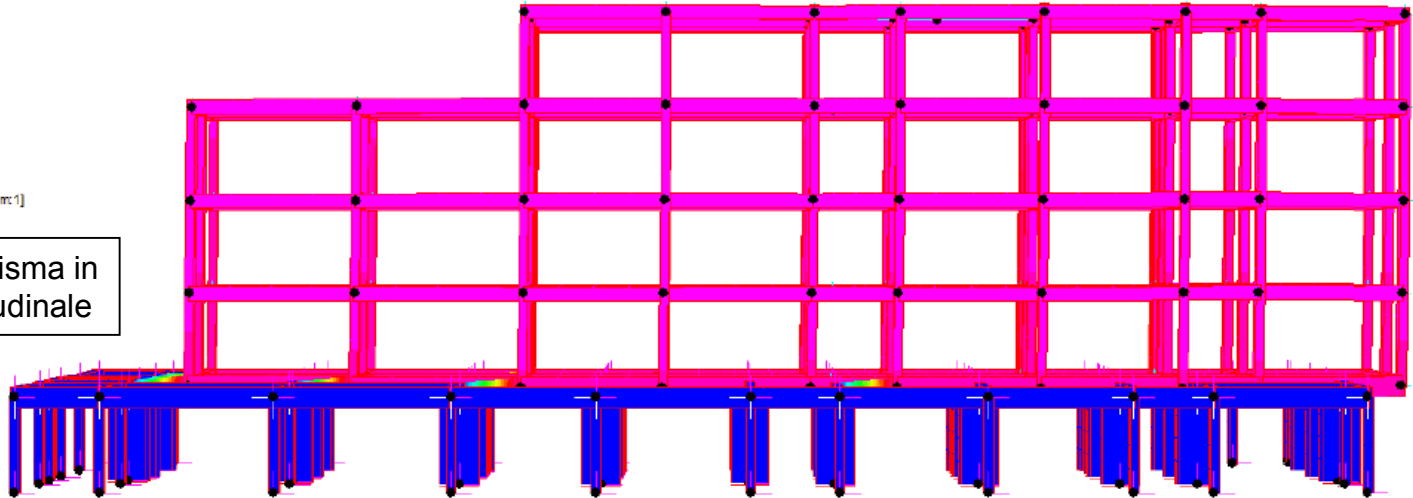
Modello 3D



Deformata modale 1° modo

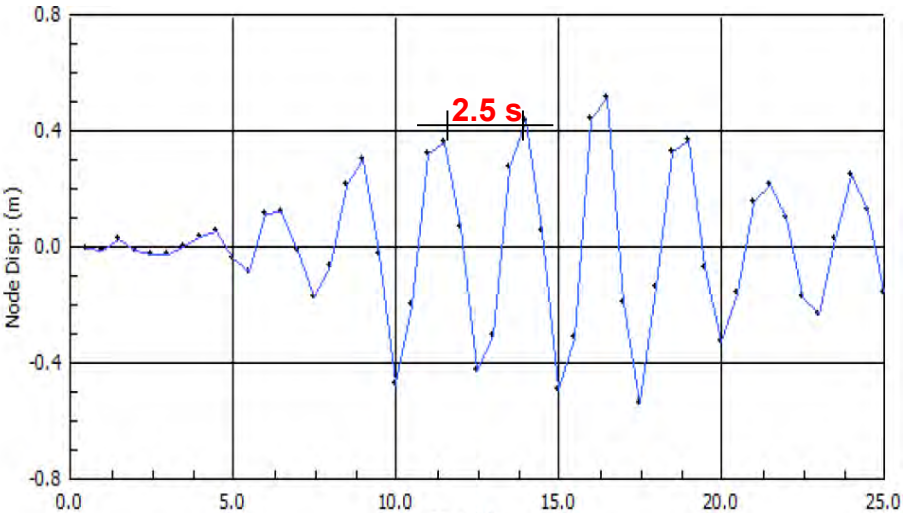


Deformata per sisma in direzione longitudinale

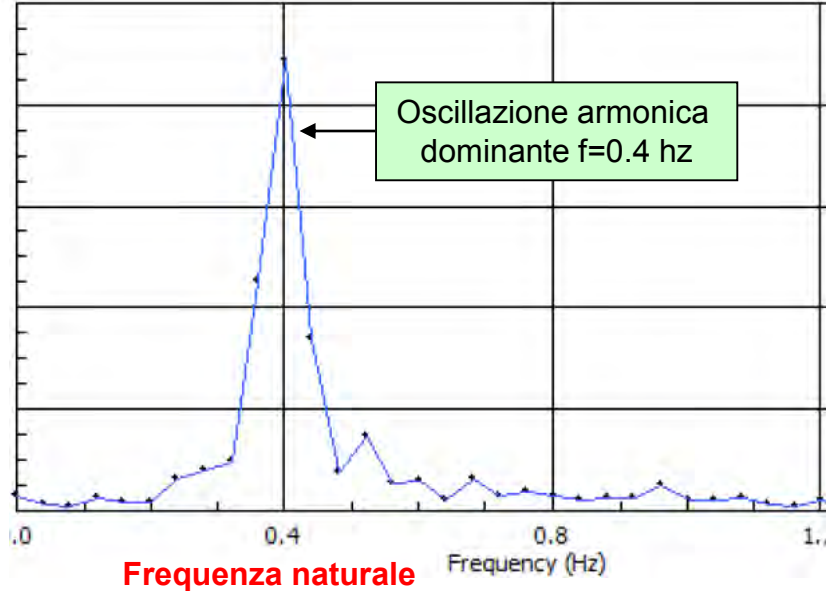


# Time histories del modello numerico FEM

Time history spostamenti piano copertura  
Modello FEM

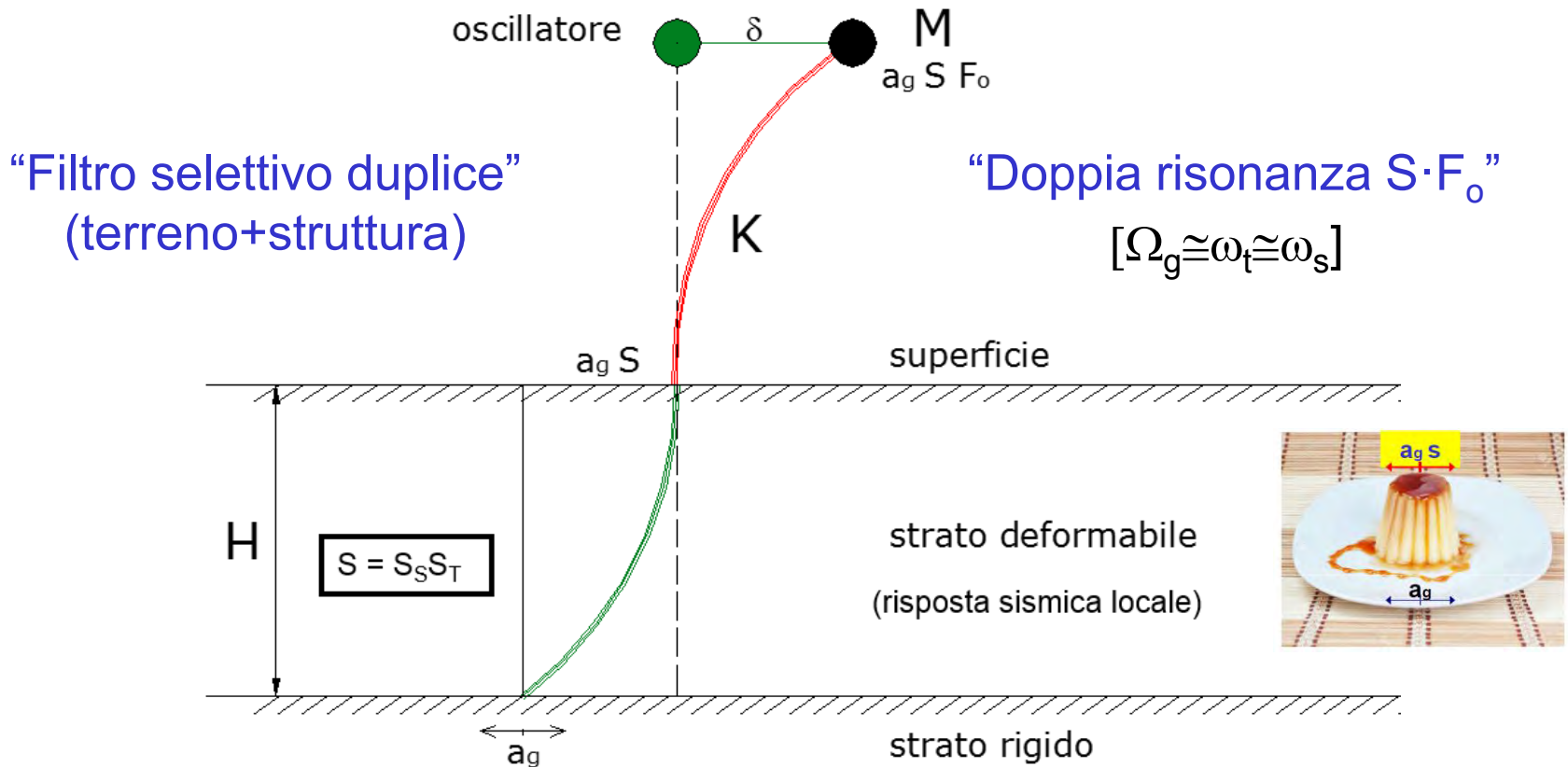


Spettro di Fourier degli spostamenti piano copertura  
Modello FEM



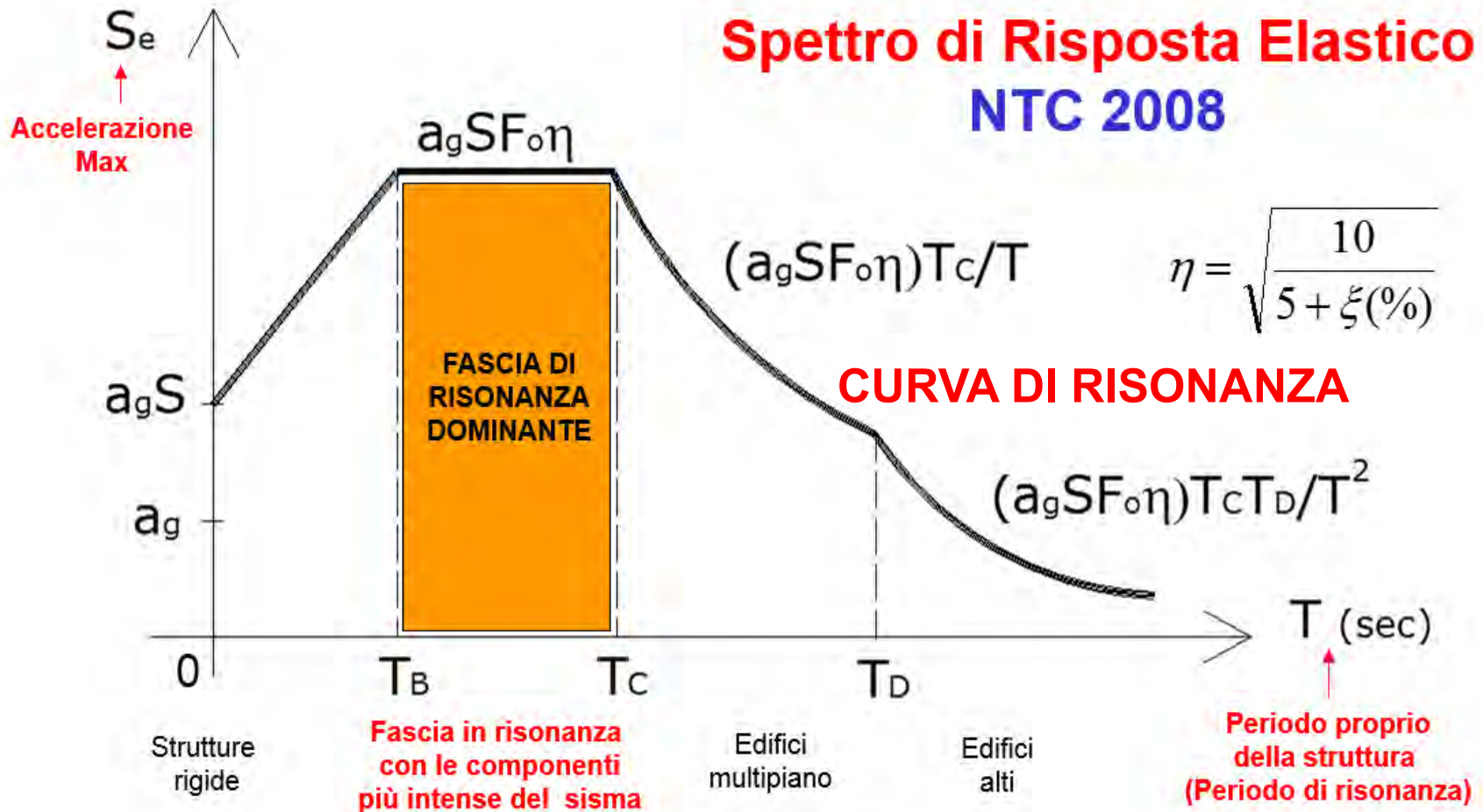
**RISPOSTA  
RISONANTE**

# RISPOSTA RISONANTE DELLE STRUTTURE



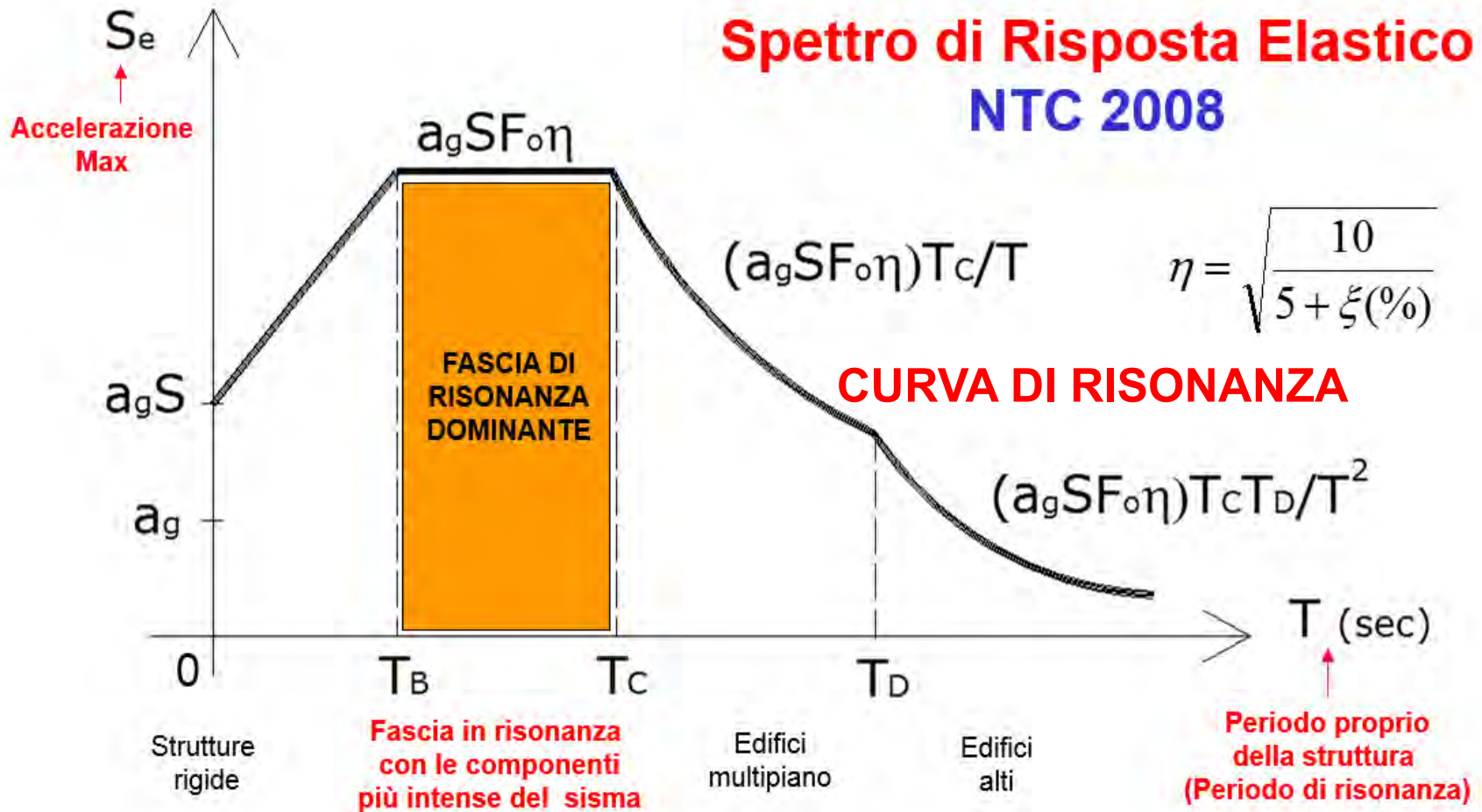
L'analisi in frequenza mostra come il comportamento dinamico delle strutture presenti aspetti complessi assenti nella risposta statica come nel caso sismico siano sostanzialmente da ascrivere alla sovrapposizione dello spettro a banda larga della forzante con lo spettro a banda stretta del filtro operato dalla struttura tramite la funzione di trasferimento che attiva **una risposta in risonanza**.

# Spettro di Risposta Elastico NTC 2008



L'appellativo pertinente per la fascia di frequenze contenute all'interno del **plateau** dello spettro elastico è quello di **risonanza dominante** tra le **molteplici risonanze possibili**. In altri termini il fenomeno della risonanza non rappresenta un'esclusiva proprietà di amplificazione delle componenti più intense del sisma ma invece interessa tutte le frequenze contenute nello spettro di risposta, che rappresenta un involuppo di risonanza

# Spettro di Risposta Elastico NTC 2008



Ogni componente armonica interagisce con la struttura in funzione della frequenza naturale di questa determinando amplificazioni od attenuazioni anche rilevanti dell'accelerazione impressa alla base e anche maggiori di quella indotta dalla componente di picco. **Le strutture di lungo periodo subiscono accelerazioni minori** in quanto **amplificano in risonanza componenti del sisma meno intense.**

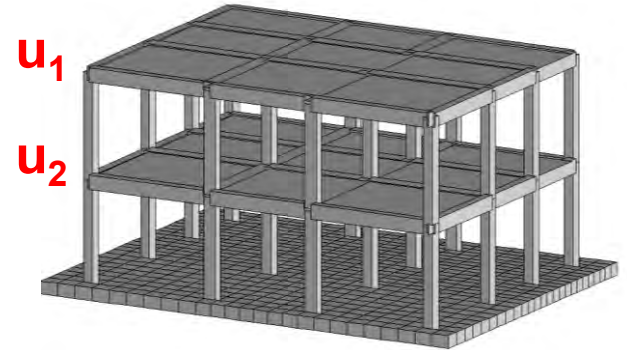


## STRUTTURE A PIU' GRADI DI LIBERTA'

### Strutture a due gradi di libertà (telai shear type)

$$H_{U_1}(\Omega) = \phi_{11}^2 \cdot H_1(\Omega, \omega_1) + \phi_{12}^2 \cdot H_2(\Omega, \omega_2)$$

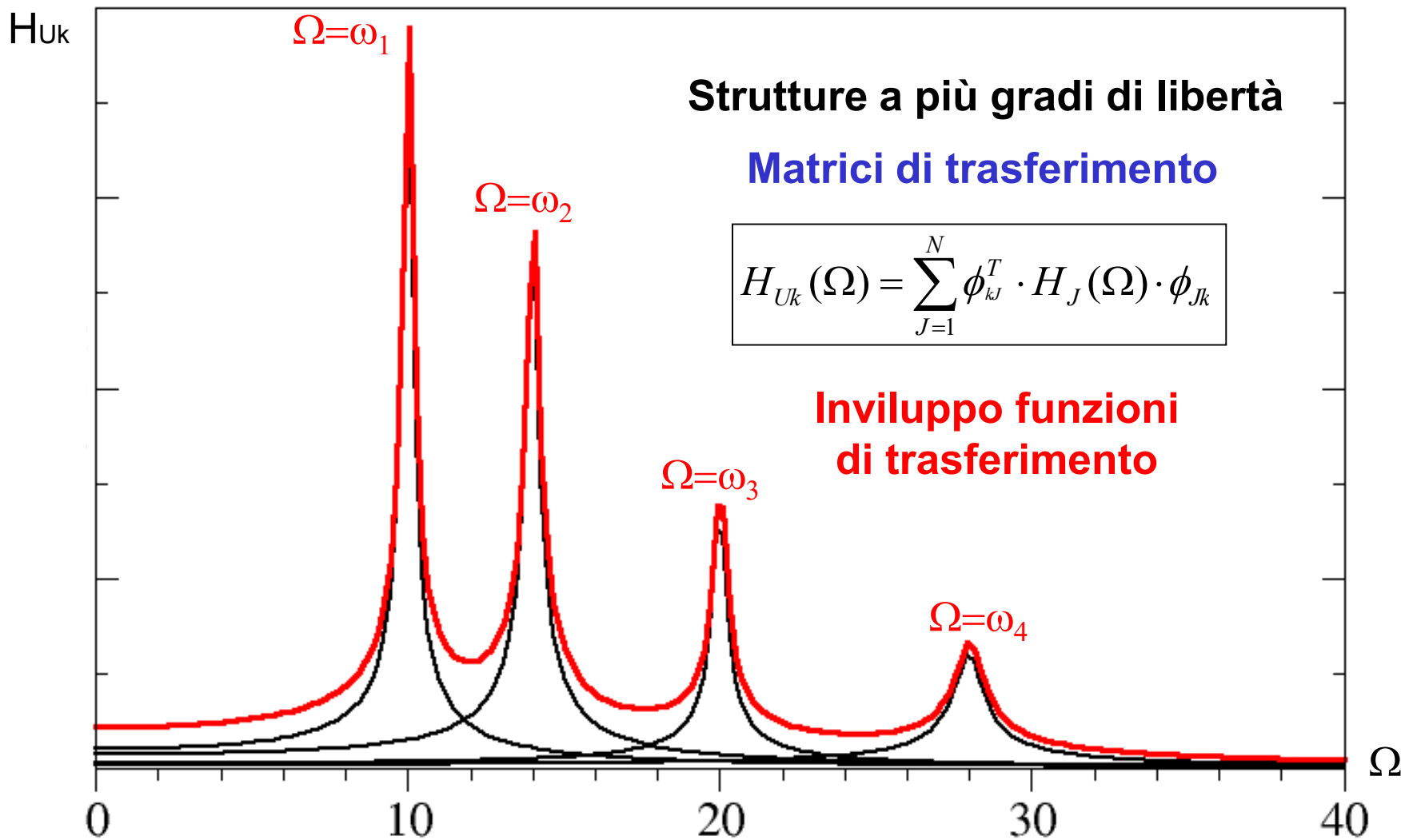
$$H_{U_2}(\Omega) = \phi_{21}^2 \cdot H_1(\Omega, \omega_1) + \phi_{22}^2 \cdot H_2(\Omega, \omega_2)$$



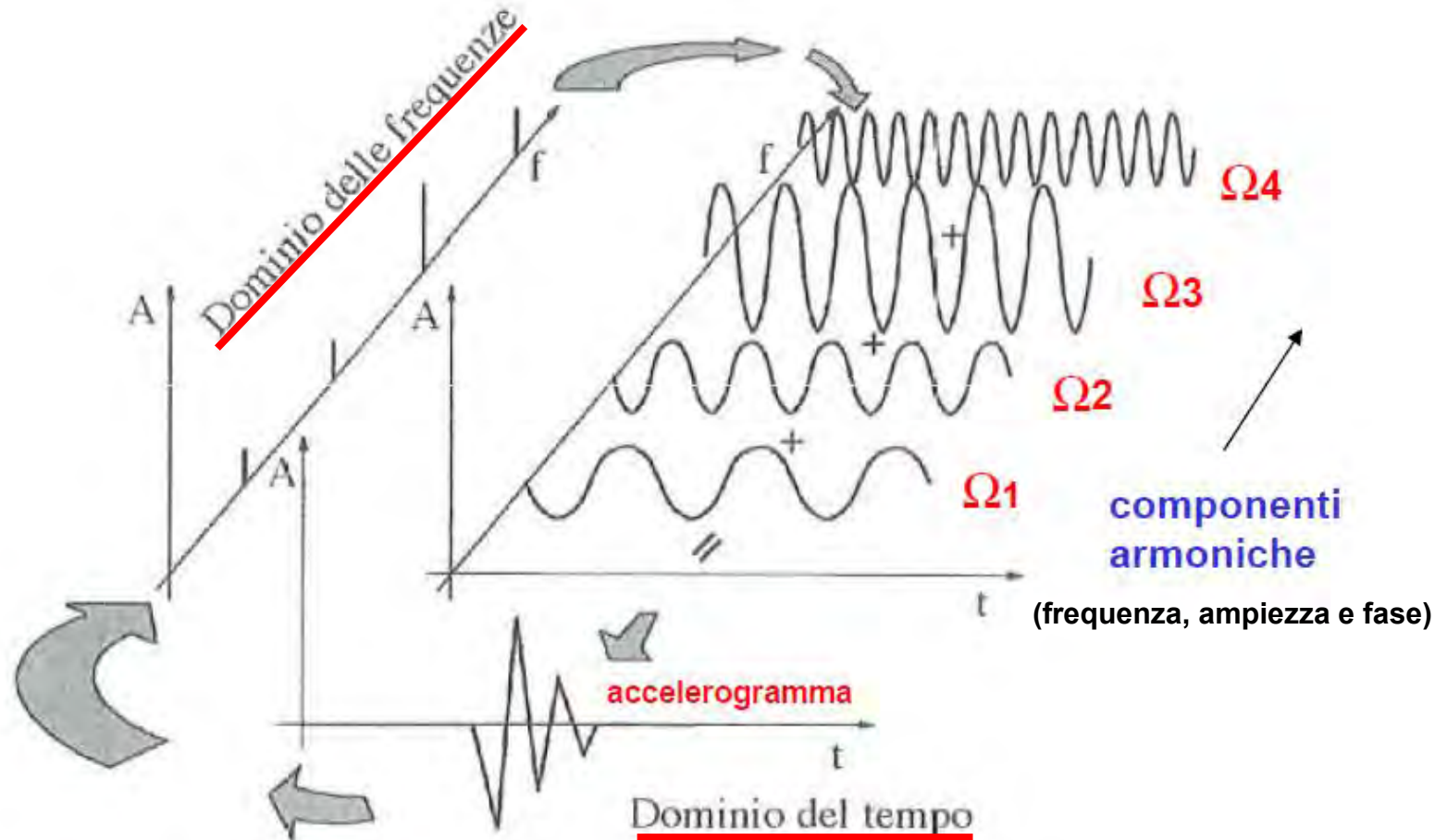
Quando il sisma che investe la base della struttura presenta componenti che includono le frequenze proprie, lo spostamento di piano viene allora attivato per effetto di entrambe le risonanze ciascuna delle quali è pesata dalla forma modale normalizzata  $\phi_{ij}$  corrispondente a tale frequenza.

**L'amplificazione risultante** é una **combinazione di risposte risonanti** ognuna delle quali **amplifica la forma modale** ad essa **associata**.

# Risonanze multiple

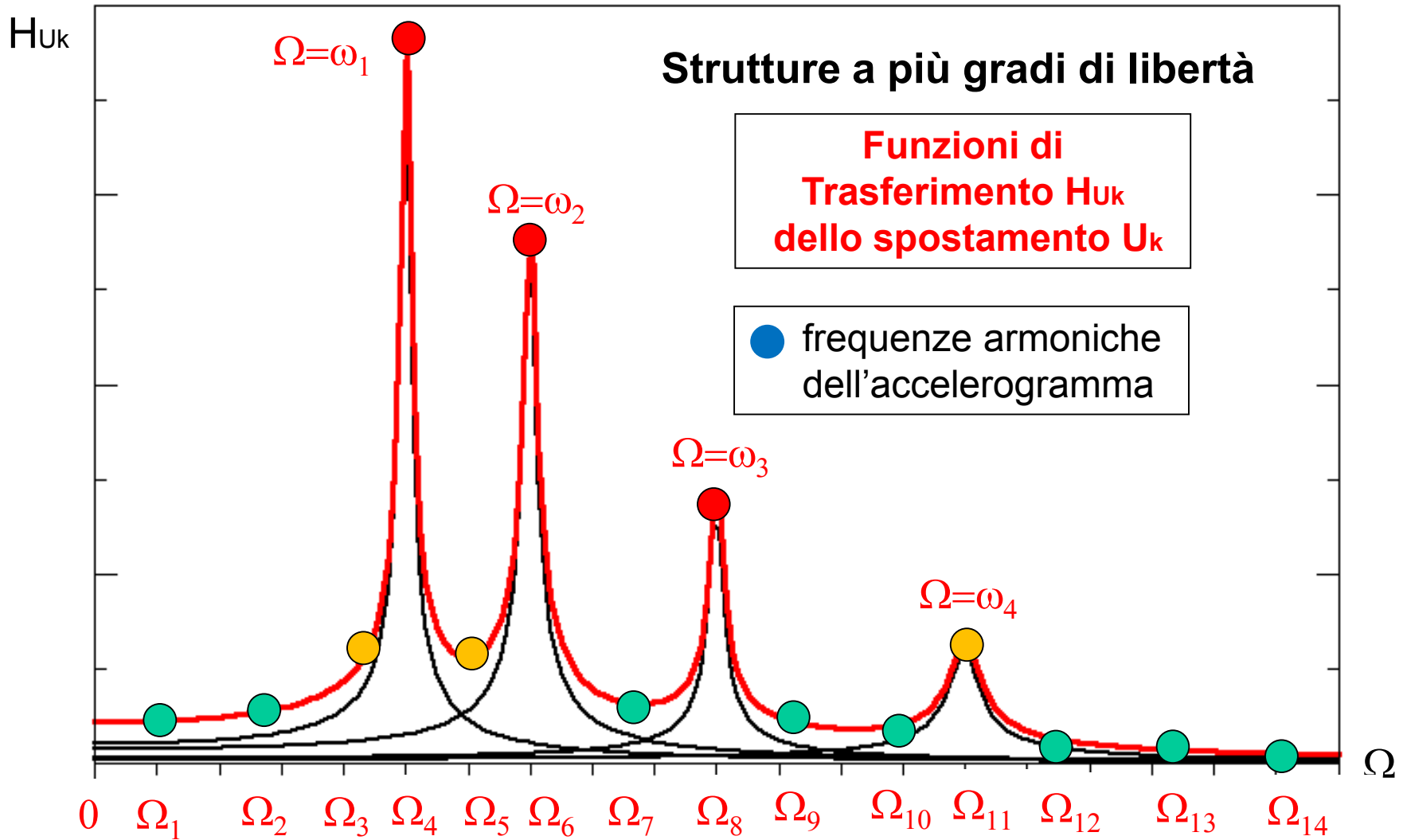


# ANALISI DI FOURIER DI UN SEGNALE SISMICO



**SCOMPOSIZIONE DELL'ACCELEROGRAMMA IN COMPONENTI ARMONICHE – DOMINIO DELLE FREQUENZE**

# Risonanze multiple



# Analisi nel dominio delle frequenze - Spostamenti

Input  
sismico

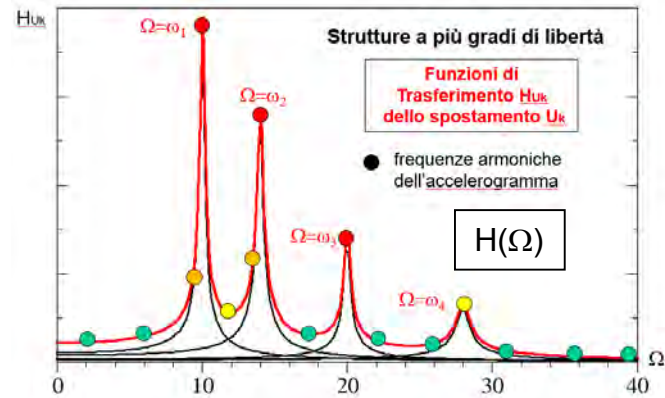
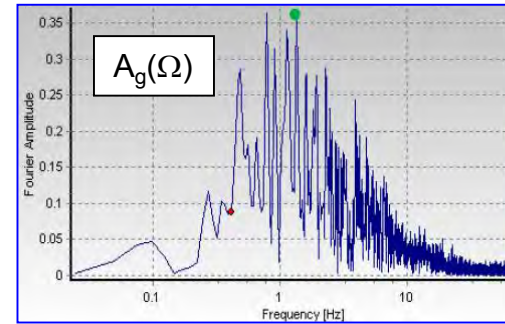


Filtro  
(struttura)



$U(\Omega)$

Risposta  
risonante  
della struttura



?



# Analisi nel dominio delle frequenze - Spostamenti

Input  
sismico

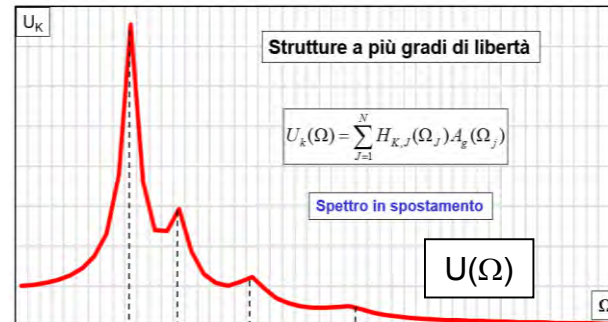
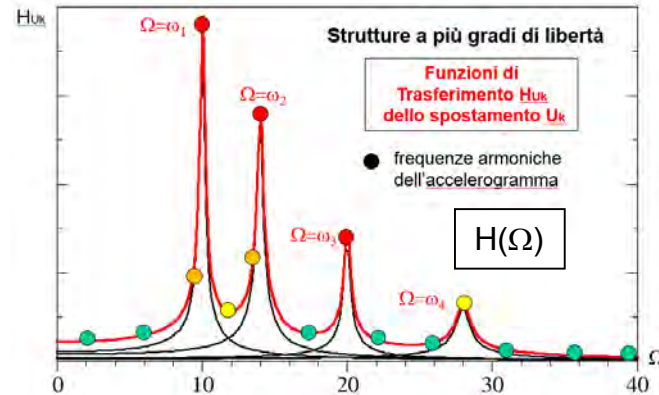
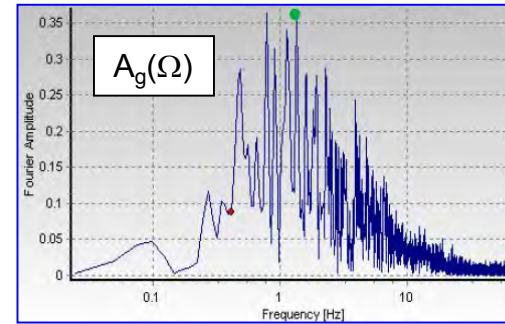


Filtro  
(struttura)

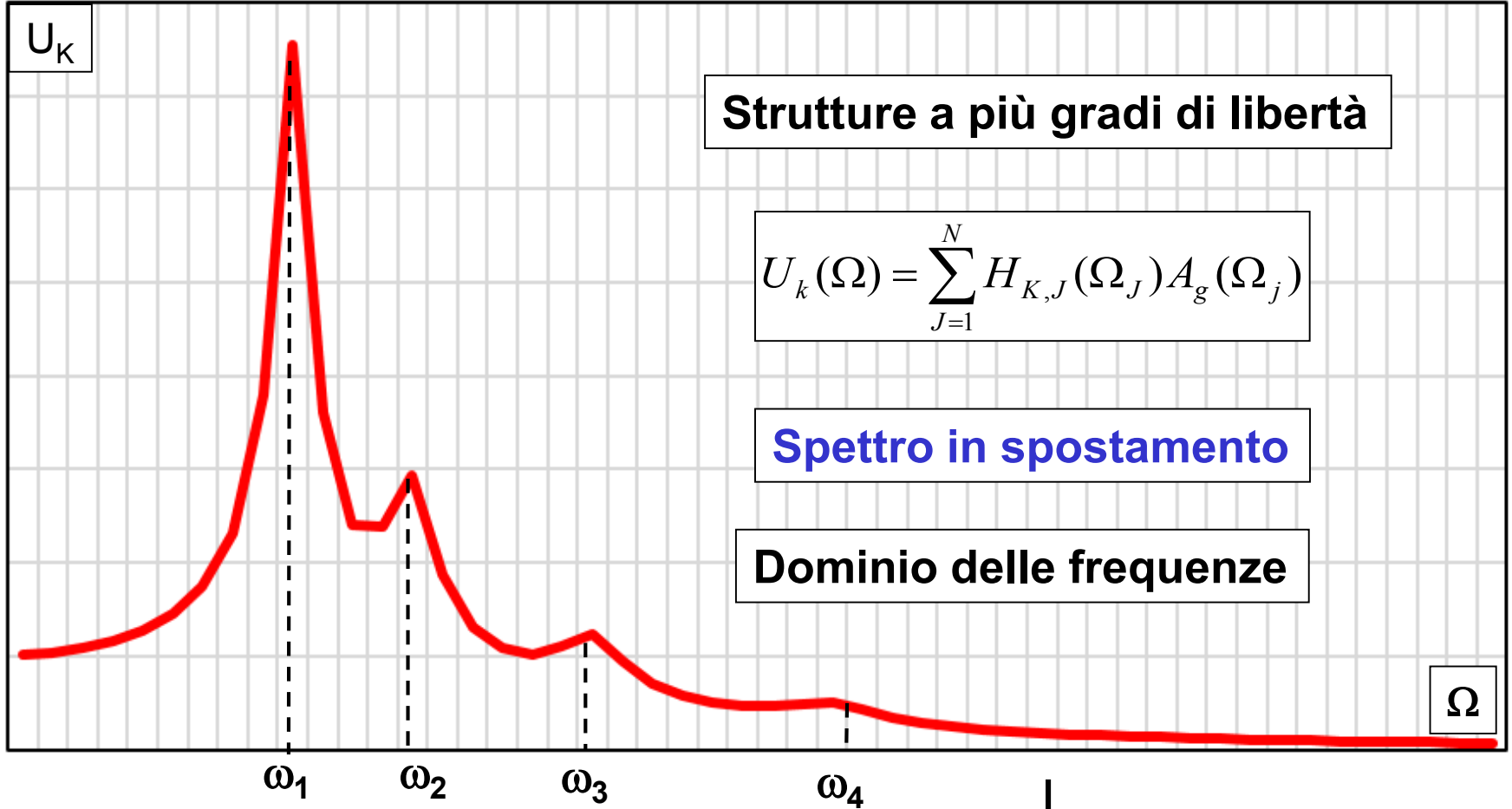


$U(\Omega)$

Risposta  
risonante  
della struttura



# SPETTRO IN SPOSTAMENTO



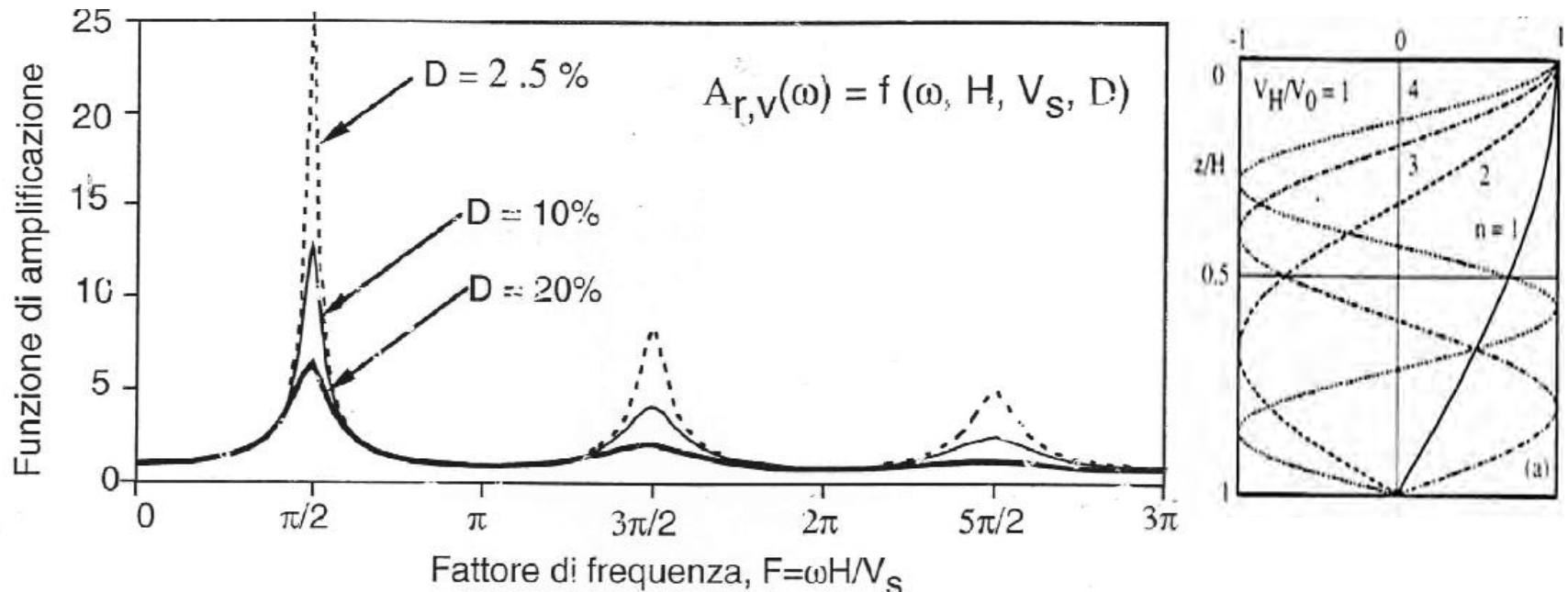
$$u_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_k(\Omega_n) \cos(\Omega_n t - \varphi_n)$$

↓

**Dominio del tempo**

←

## RISPOSTA MULTIMODALE DEL TERRENO



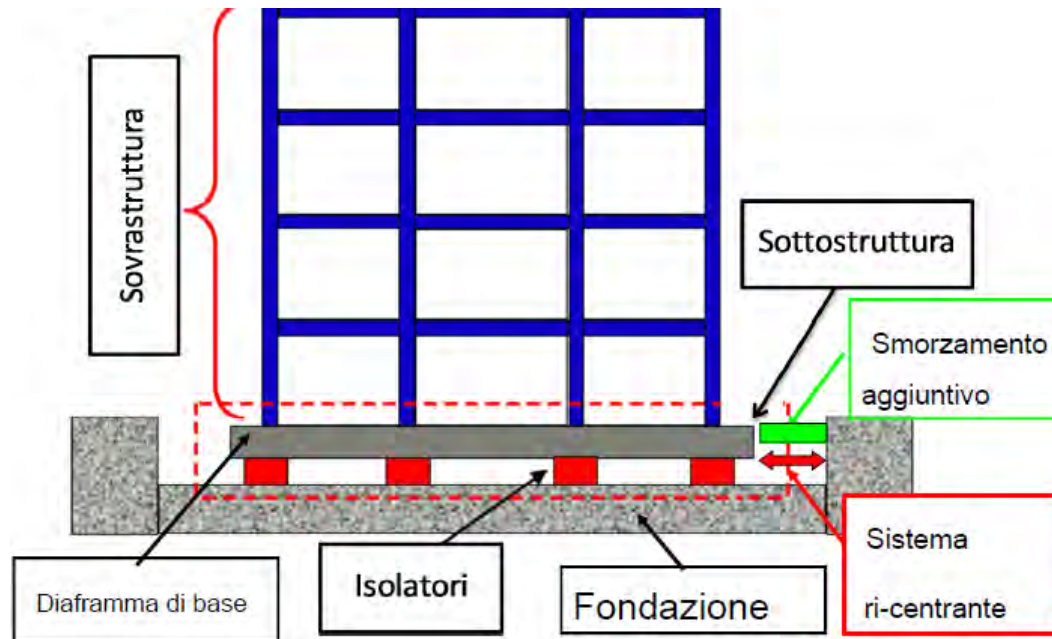
Nel caso di sistemi a più gradi di libertà quale uno strato omogeneo la funzione di trasferimento presenta massimi in corrispondenza delle frequenze naturali del terreno. Le componenti del sisma che vengono amplificate sono quelle corrispondenti a tali frequenze. **Il moto risultante del terreno è una combinazione di risposte risonanti.**

**Isolamento Sismico  
mediante  
Isolatori elastomerici**

**Aspetti progettuali**

# EDIFICIO ISOLATO SISMICAMENTE

Si introduce una **discontinuità strutturale** mediante dispositivi a **bassa rigidità a taglio** che consentono di ridurre le forze sismiche inerziali a fronte di ampi spostamenti orizzontali relativi tra la struttura ed il terreno



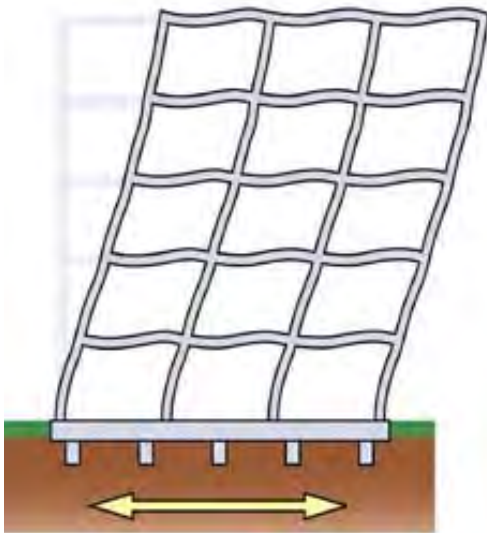
Il disaccoppiamento tra il moto della struttura e quello del terreno richiede che il sistema di isolamento abbia una rigidità orizzontale molto ridotta.



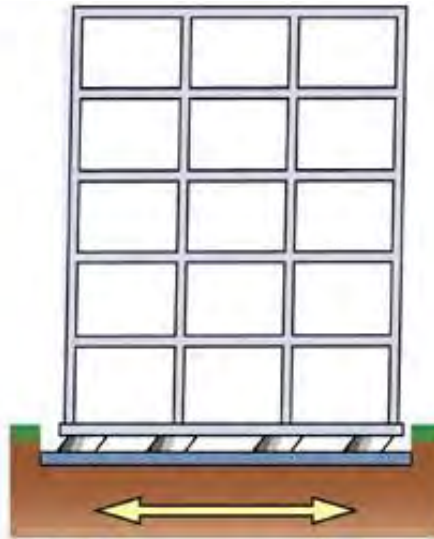
# CONFRONTO TRA DEFORMATE MODALI EDIFICIO A BASE FISSA - EDIFICIO ISOLATO

Deformate modali del modo fondamentale di vibrazione

**EDIFICIO A  
BASE FISSA**



**EDIFICIO  
ISOLATO**



## **VANTAGGI ISOLAMENTO SISMICO**

**Abbattimento delle accelerazioni agenti sulle masse strutturali**

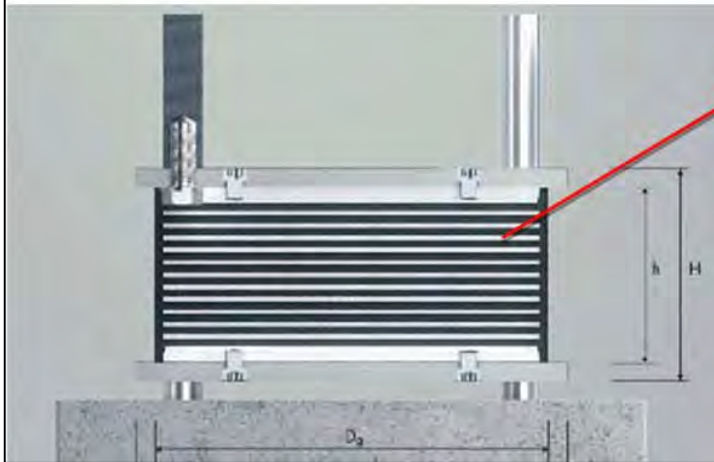
**Riduzione degli spostamenti di interpiano che permette di evitare il danneggiamento degli elementi non strutturali e gli impianti**

**Limitata interruzione temporale delle attività**

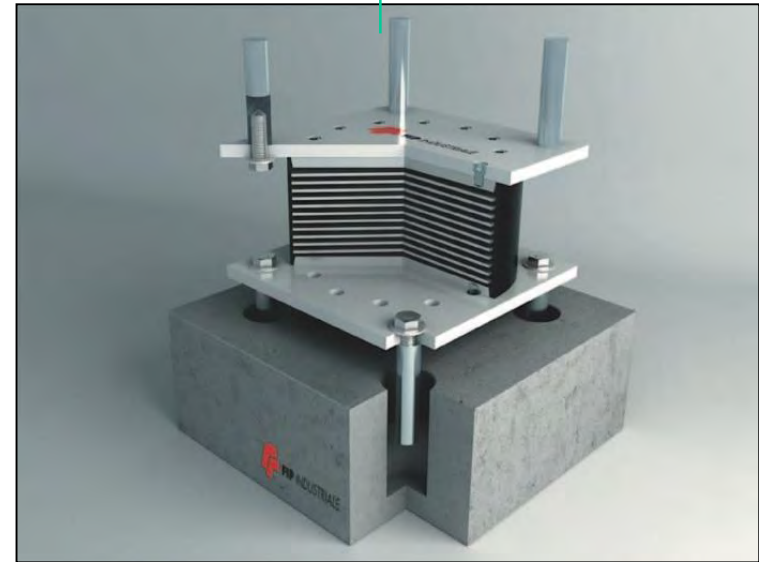
- Il primo modo di vibrare della struttura isolata è assimilabile a quello di un oscillatore elementare con le deformazioni concentrate nel sistema di isolamento

# ISOLATORI ELASTOMERICI

Gli isolatori elastomerici sono costituiti da strati alternati di elastomero e di acciaio tra loro solidarizzati mediante vulcanizzazione



## ISOLATORI ELASTOMERICI

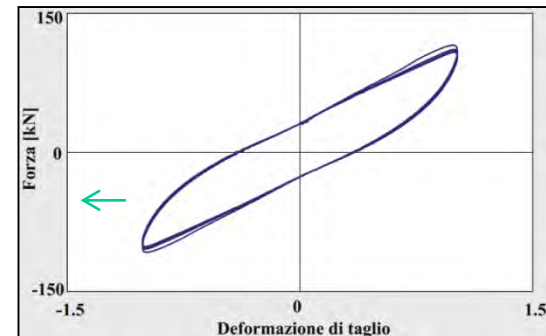


- **Bassa rigidezza orizzontale**

- **Alta rigidezza verticale**

- **Elevata capacità dissipativa**

- **Buona capacità ricentrante**

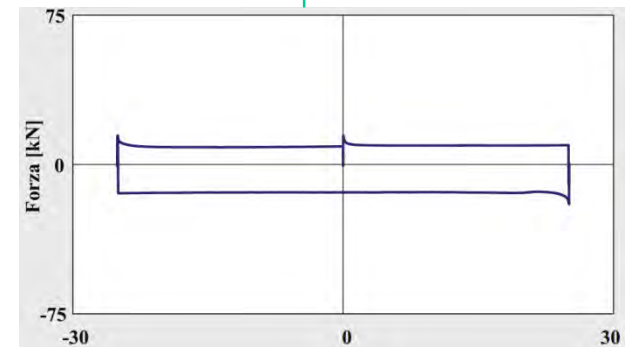


# ISOLATORI A SCORRIMENTO (SLITTE)

**APPOGGI  
MULTIDIREZIONALI A  
SUPERFICIE PIANA**

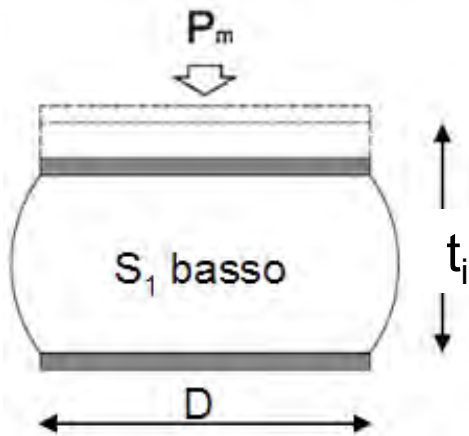
**Appoggi con superficie di  
scorrimento a basso attrito  
( $\mu = 2 \div 3\%$ )**

- non rincentrante
- trascurabile rigidità orizzontale

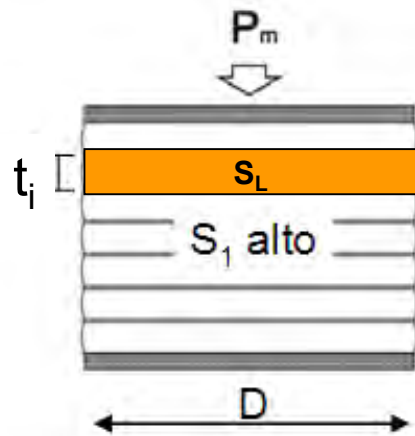


**Comportamento Rigido-plastico**

# Parametri di forma degli isolatori elastomerici



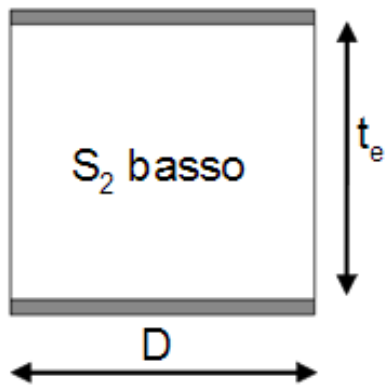
$t_i$  = spessore del singolo strato



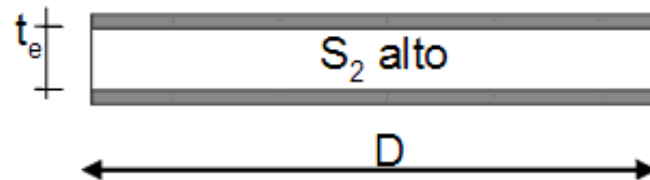
All'aumentare del parametro  $S_1$  aumenta la rigidità verticale

$$S_1 = \frac{A}{S_L} = \frac{D}{4t_i}$$

Parametro di forma primario  
( $S_1 = 15 \div 20$ )



$t_e$  = spessore totale della gomma



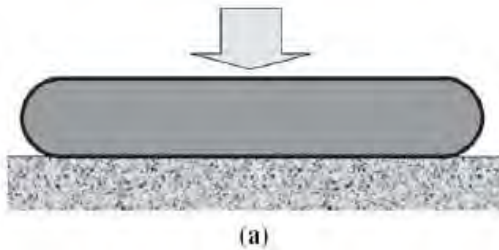
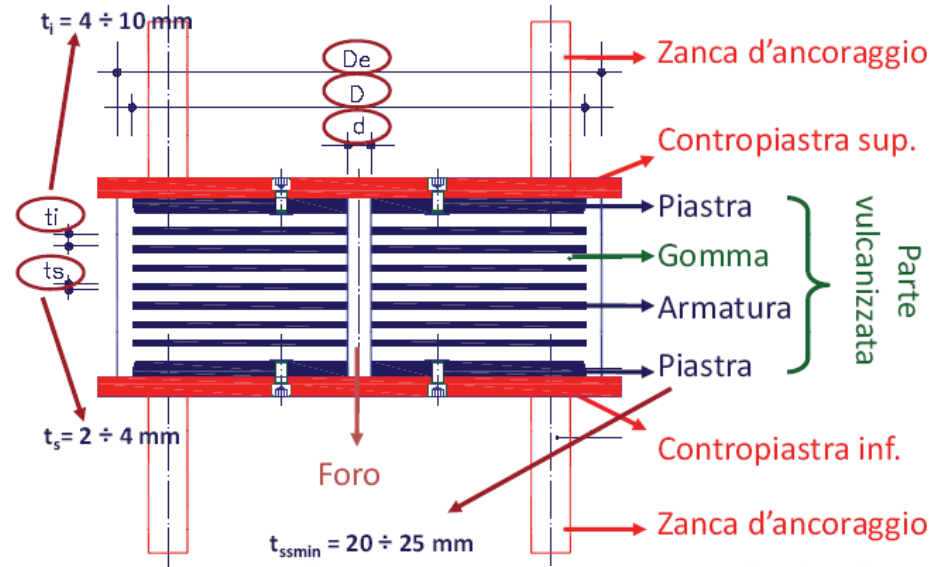
All'aumentare del parametro  $S_2$  aumenta il carico critico verticale

$$S_2 = \frac{D}{t_e}$$

Parametro di forma secondario  
( $S_2 = 3 \div 5$ )

PROPRIETÀ	MESCOLA		
	MORBIDA (SOFT - S)	NORMALE (NORMAL - N)	DURA (HARD - H)
Durezza (Shore A)	40	60	75
Modulo di elasticità tangenziale $G_{din}$ a $\gamma = 1$ (MPa) <b>G</b>	0.4	0.8	1.4
Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente $\xi$ a $\gamma = 1$ (%)	10 / 15	10 / 15	10 / 15

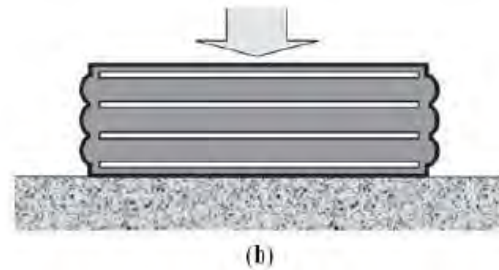
## HDRB: COMPONENTI E DIMENSIONI



Appoggio  
in neoprene

$$E = 3G$$

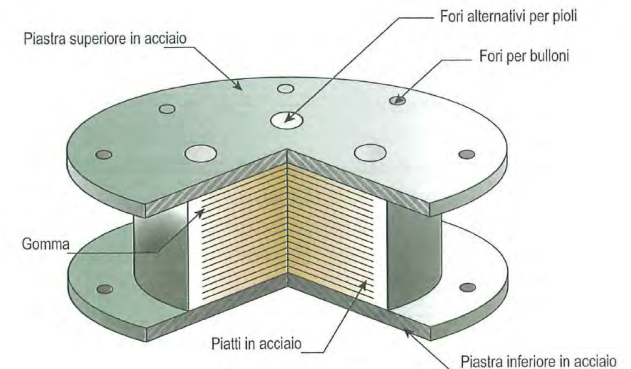
(materiale base)



Appoggio in  
neoprene armato

$$E_c = 6GS_1^2$$

(materiale confinato)



Parametri di forma

$$S_1 = \frac{D}{4t_i} \quad S_2 = \frac{D}{t_e}$$



# COMPORTAMENTO MECCANICO ISOLATORI ELASTOMERICI

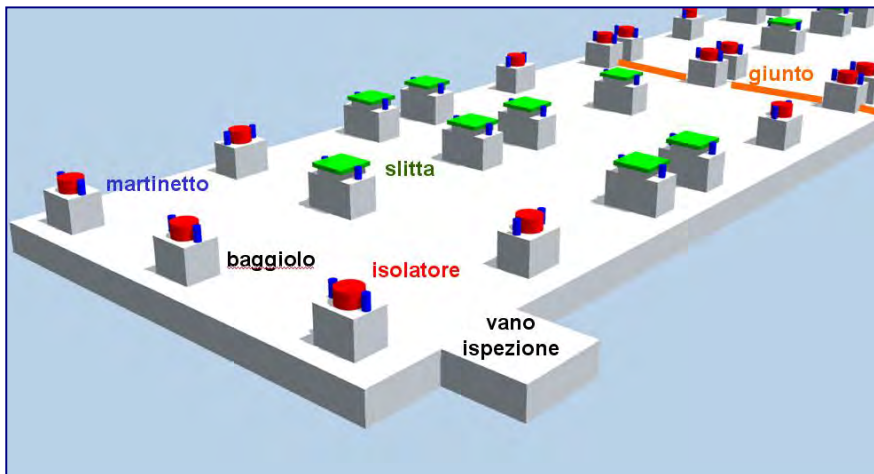


## CONFINAMENTO ELASTOMERO



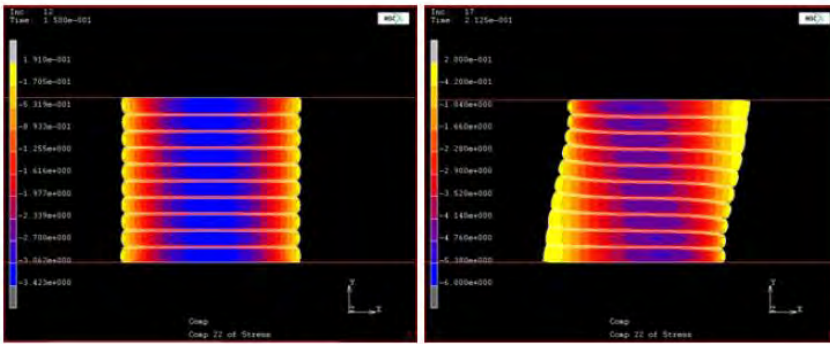
Rigidità vert.  
singolo strato

$$K_{Vi} = \frac{E_c A}{t_i}$$

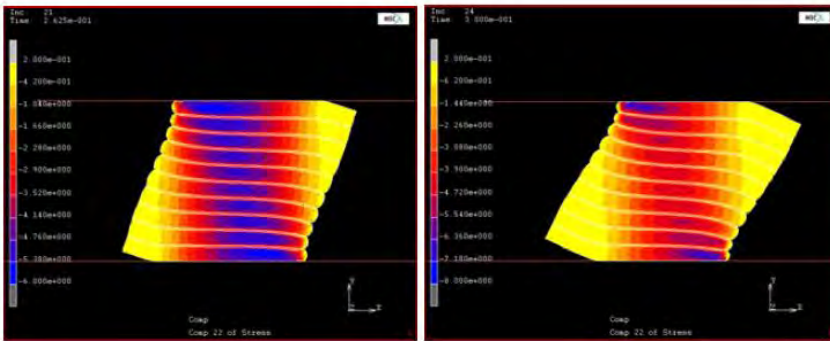


## Rigidità verticale isolatore

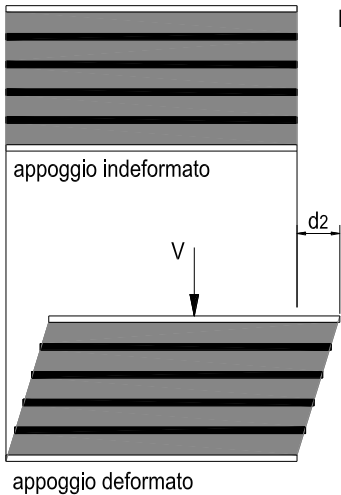
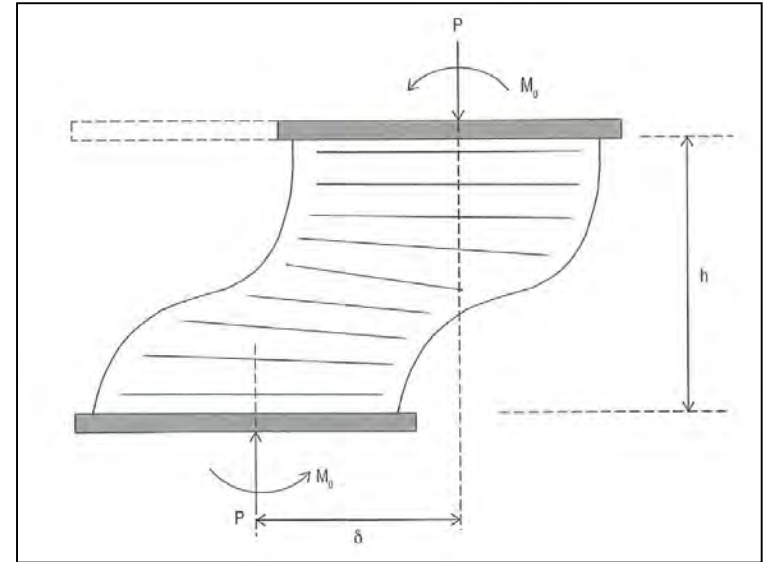
$$K_V = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{Vi}}} \quad K_V \geq 800 \cdot K_{eis}$$



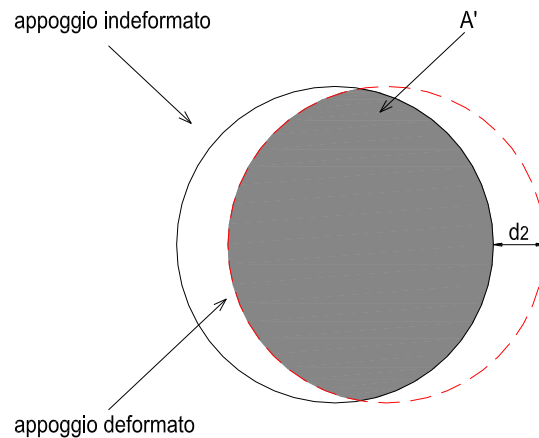
M. R. Marsico, *Seismic isolation and energy dissipation. Basis and Applications.*



## Carico critico per instabilità



D. Foti, M. Mongelli, *Isolatori sismici, D.F.*



$$P_{cr} = G \cdot A_r \cdot S_1 \cdot S_2$$

$$A_r = \text{Area ridotta}$$

$$A_r = \frac{D^2}{4} (\varphi - \sin \varphi)$$

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \left( \frac{d_2}{D} \right)$$

# VERIFICA ISOLATORI (SLC)

Il neoprene degli isolatori elastomerici è un materiale incomprimibile ( $\nu \sim 0.50$ ). Tensioni normali isotrope non producono variazioni di volume né la **rottura** della gomma, che avviene per **taglio trazione** indotti da **variazione di forma**.

## Limiti di Normativa (NTC08):

- $\sigma_s = 1.3 \times 2N_{st}/A_r \leq 275 \text{ MPa}$
- $\gamma_s \leq 2$
- $\gamma_t = \gamma_s + \gamma_\alpha + \gamma_c \leq 5$
- $N < P_{cr} / 2$

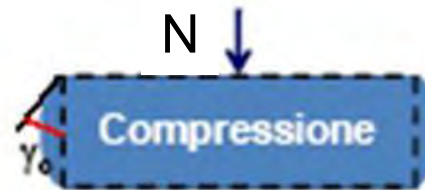
$$\gamma_s = \frac{d_E}{t_e} \leq 2$$



Scorrimento per  
taglio semplice

$\gamma_s$

$$\gamma_c = 1.5 \frac{N}{G \cdot S_1 \cdot A_r}$$



Scorrimento per  
compressione assiale

$\gamma_c$

$$\gamma_\alpha = \frac{3 \cdot \alpha \cdot D^2}{8 \cdot t_i \cdot t_e}$$



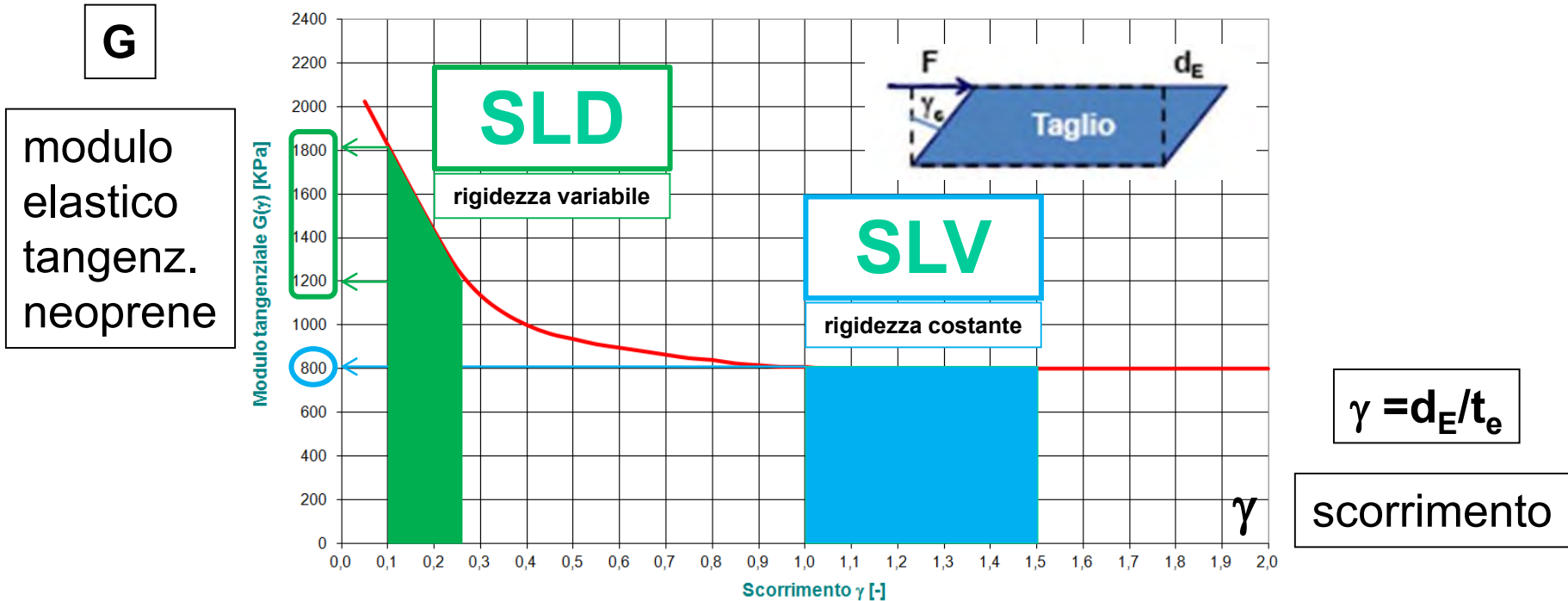
Scorrimento per  
rotazione impressa

$\gamma_\alpha$

# COMPORTAMENTO NON LINEARE ISOLATORI

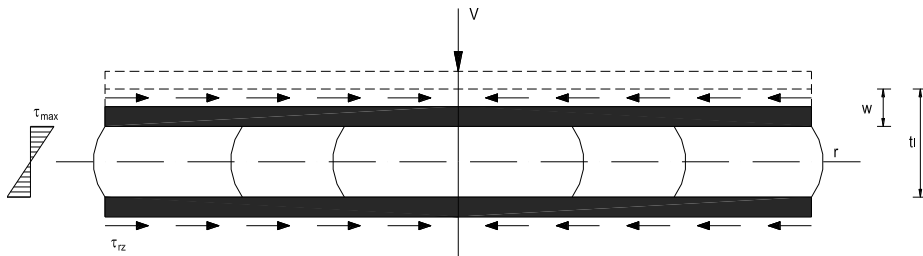
La rigidezza equivalente orizzontale del sistema di isolamento  $K_e$  dipende tramite il modulo di elasticità tagliante  $G$  dallo scorrimento  $\gamma$

DIAGRAMMA MODULO TANGENZIALE ISOLATORI ELASTOMERICI



- Nelle condizioni sismiche di progetto ( $\gamma = 100 \div 150\%$ )  $\longrightarrow$   $G = 800 \text{ kPa}$
- Per bassi livelli della deformazione di taglio ( $\gamma < < 100\%$ )  $\longrightarrow$   $G = G(\gamma)$

# Prove sugli isolatori (20% della fornitura)



Prove a carico verticale

$$N_R > N_d \quad ; \quad K_V > 800 K_h$$



A  
C  
C  
E  
T  
T  
A  
Z  
I  
O  
N  
E

Prove di taglio ciclico

$$\gamma = 100\% \quad ; \quad \gamma = 200\%$$
$$\tau = G \quad ; \quad \tau = 2G$$



Q  
U  
A  
L  
I  
F  
I  
C  
A

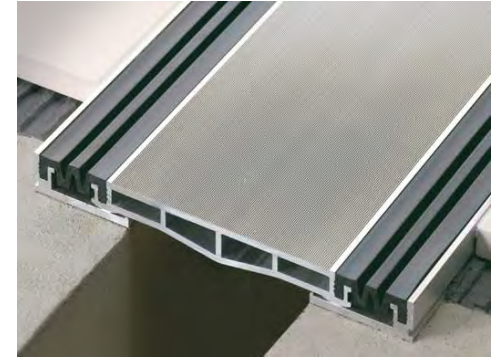
Prove di aderenza  
lamierino - elastomero

$$\gamma^* = 250\%;$$



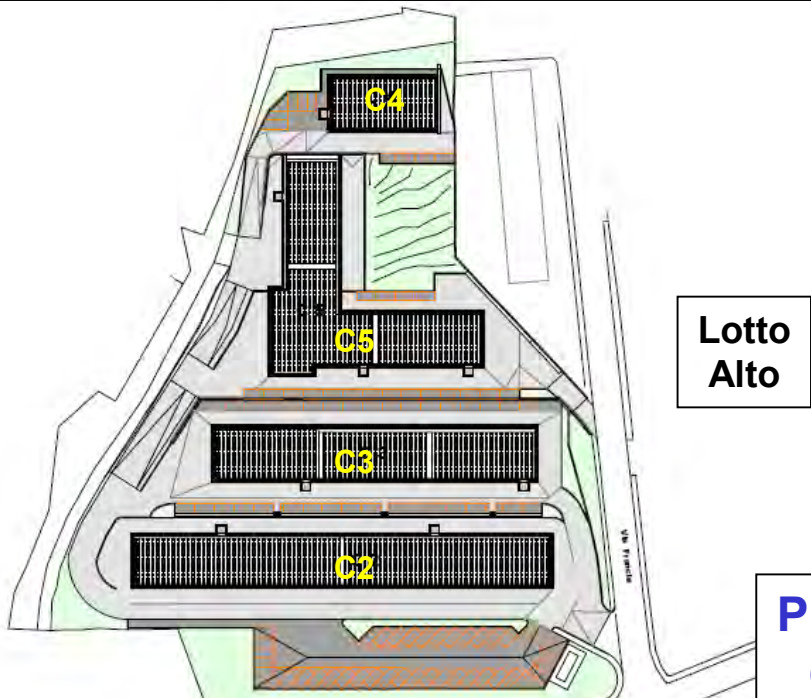
# ACCORGIMENTI COSTRUTTIVI PER LE STRUTTURE ISOLATE

- Sono necessari **giunti sismici** commisurati al valore massimo degli spostamenti di progetto dei fabbricati contigui in modo tale da evitare il **martellamento** con gli edifici adiacenti (dimensione giunti **60 – 70 cm**)
- Sia gli elementi di collegamento orizzontale (coprigiunti) sia gli elementi di collegamento verticale (**scale, rampe, ascensori**) devono essere concepiti e realizzati in modo tale da non ostacolare il moto della sovrastruttura e non creare connessioni rigide.
- Occorre adottare **giunzioni flessibili** per le **connessioni impiantistiche** che siano in grado di assorbire gli spostamenti di progetto senza interruzioni del servizio



**ISOLAMENTO SISMICO**

**CASO DI STUDIO**

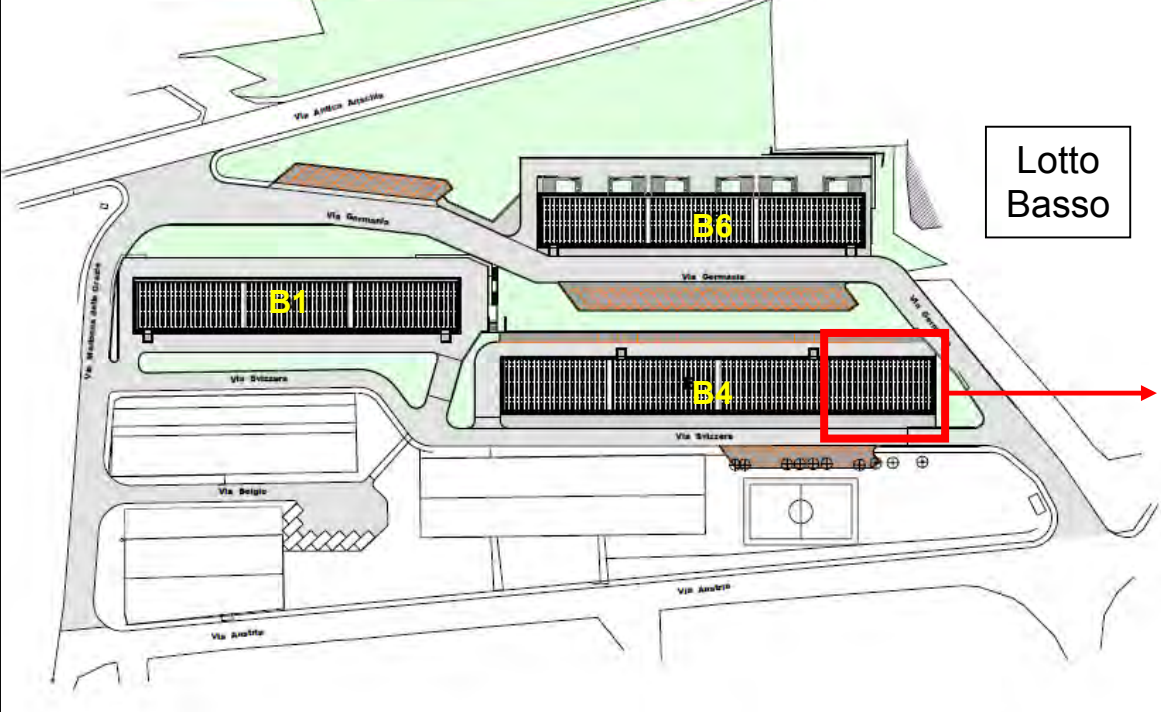


**Lotto Alto**

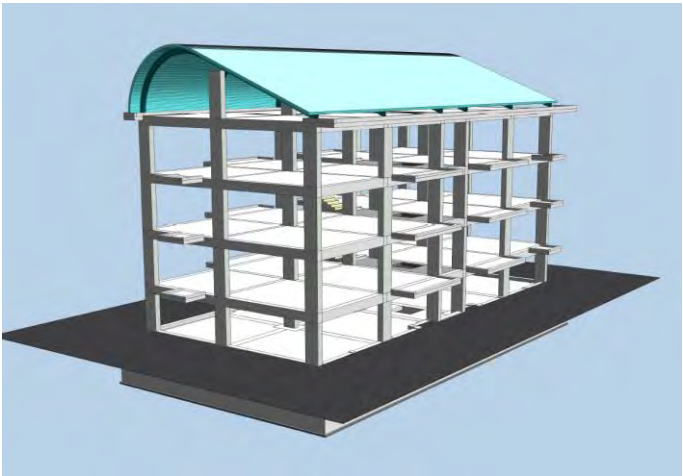
**Planimetria dell'area**



**Modulo base**

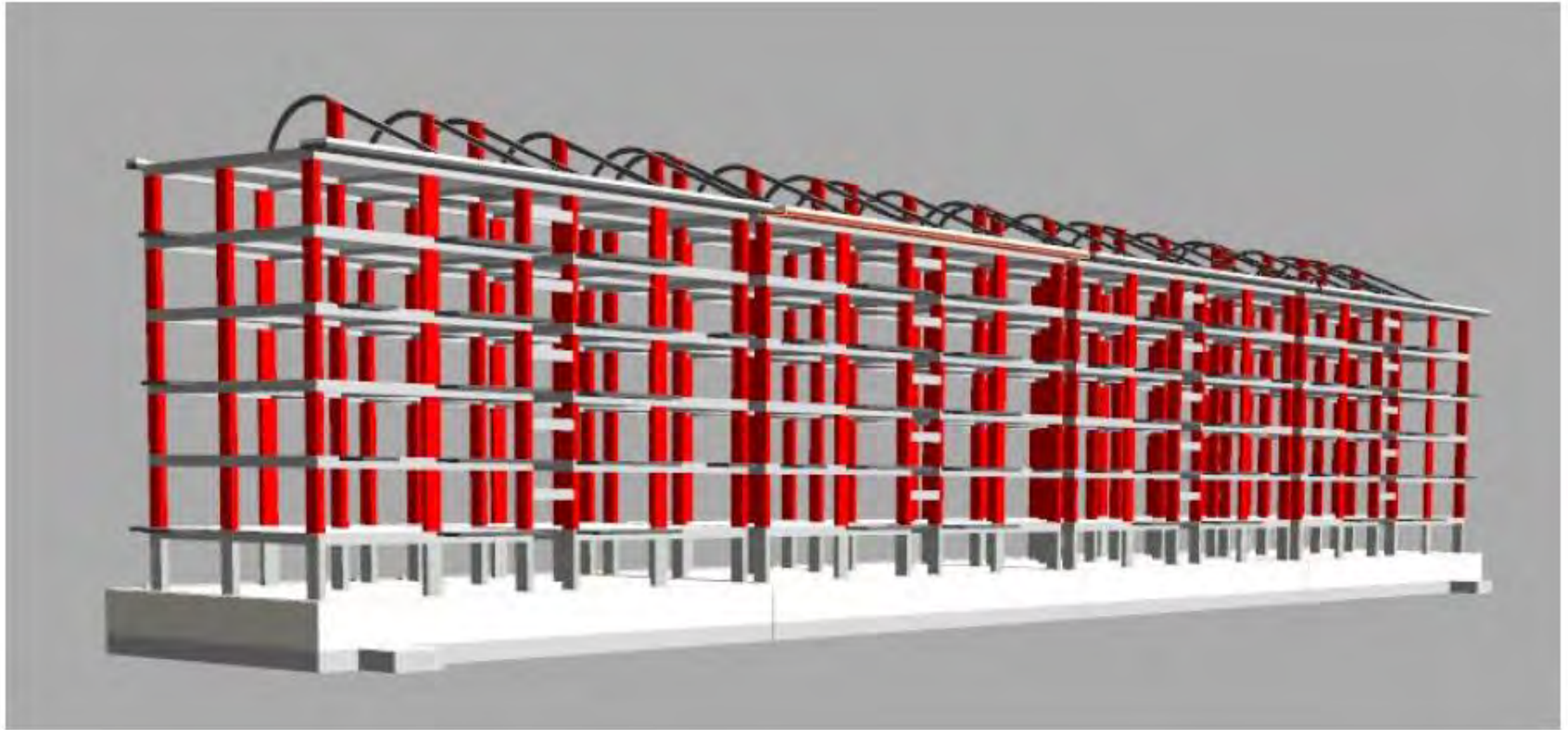


**Lotto Basso**



**Schema Strutturale**

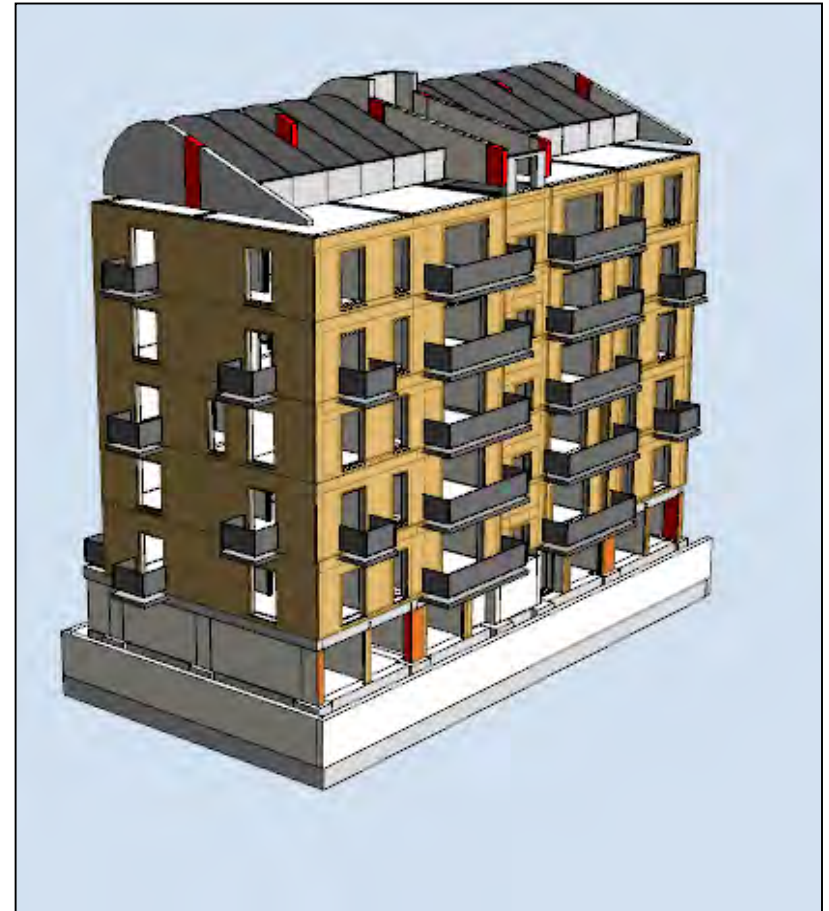
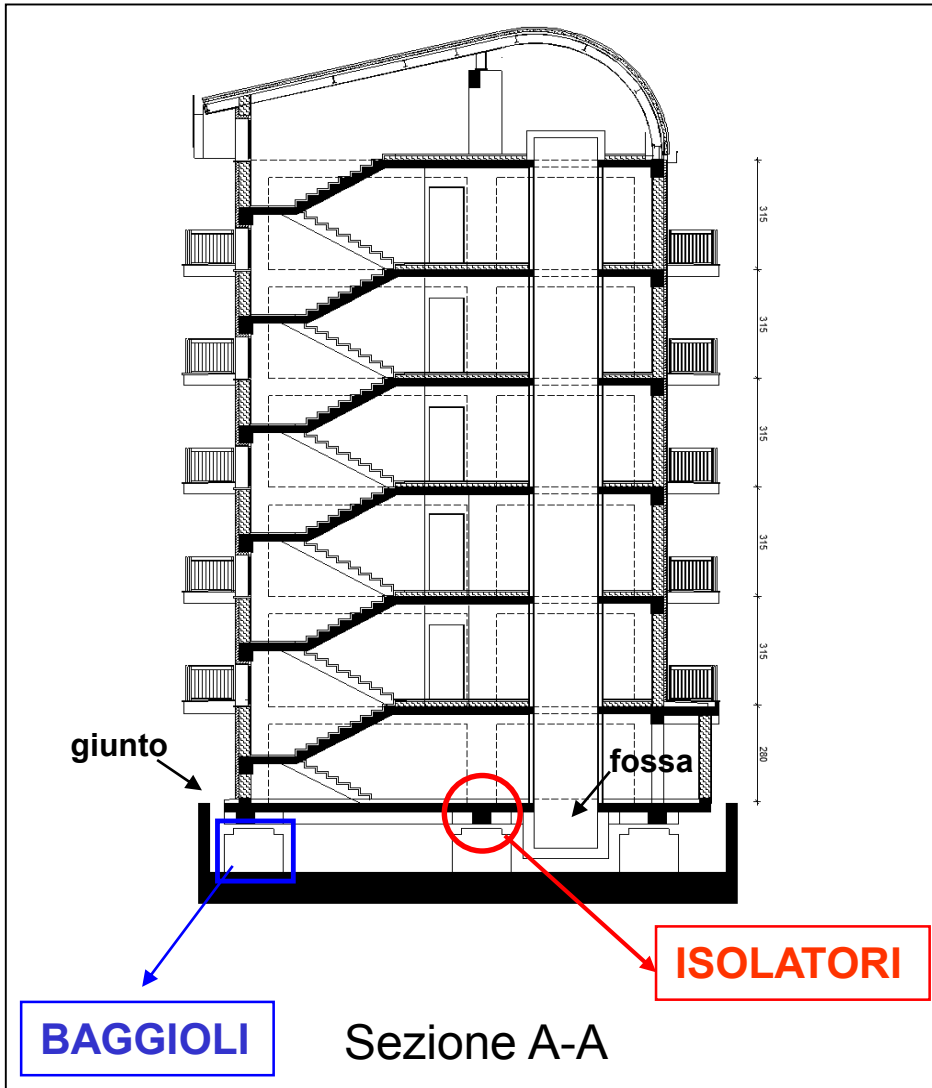
# EDIFICI MULTIPIANO ISOLATI ALLA BASE



**Fabbricati ad uso civile abitazione**



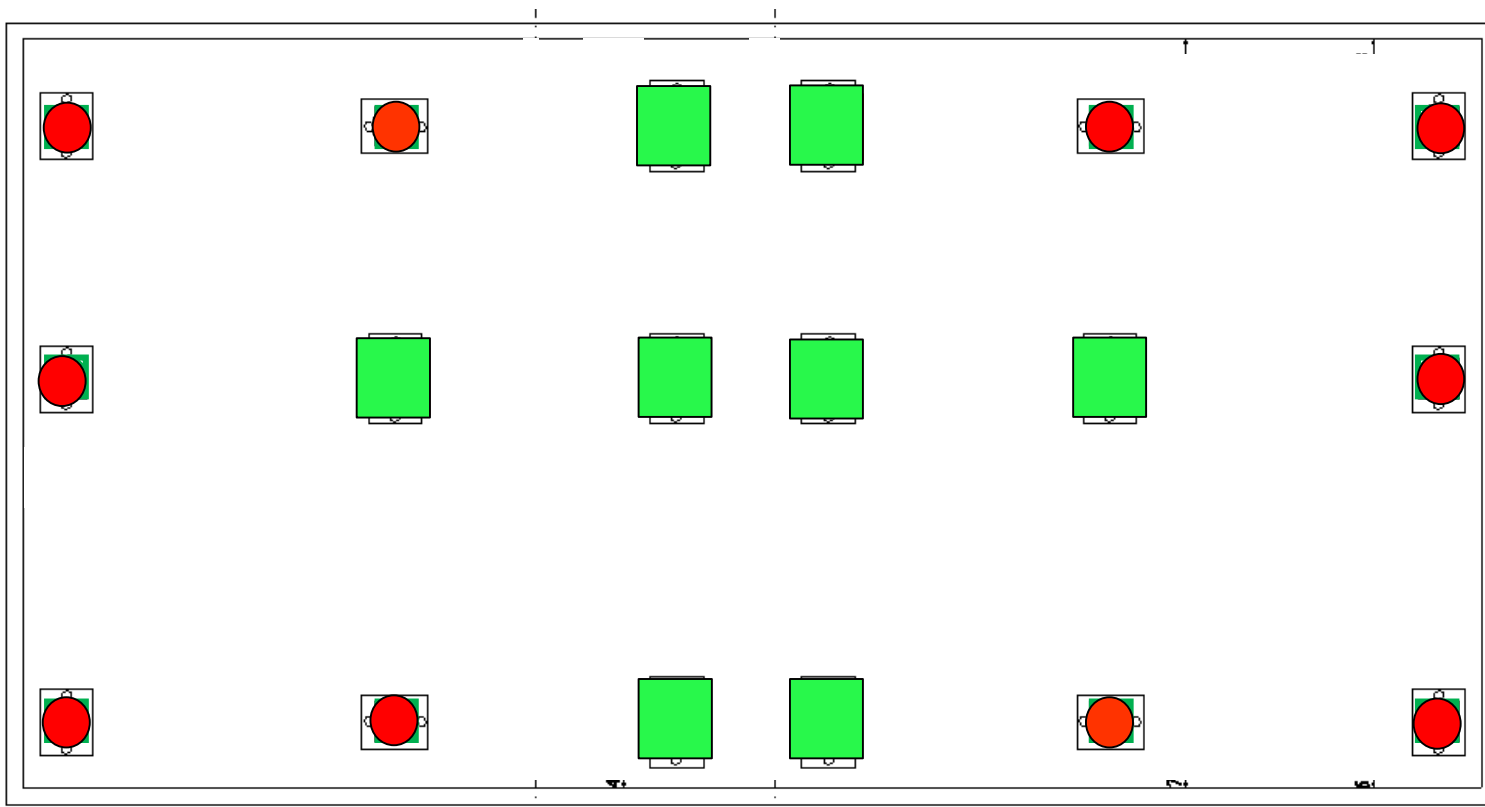
# Sezione Verticale e Modello



**Modello All Plan 3D**



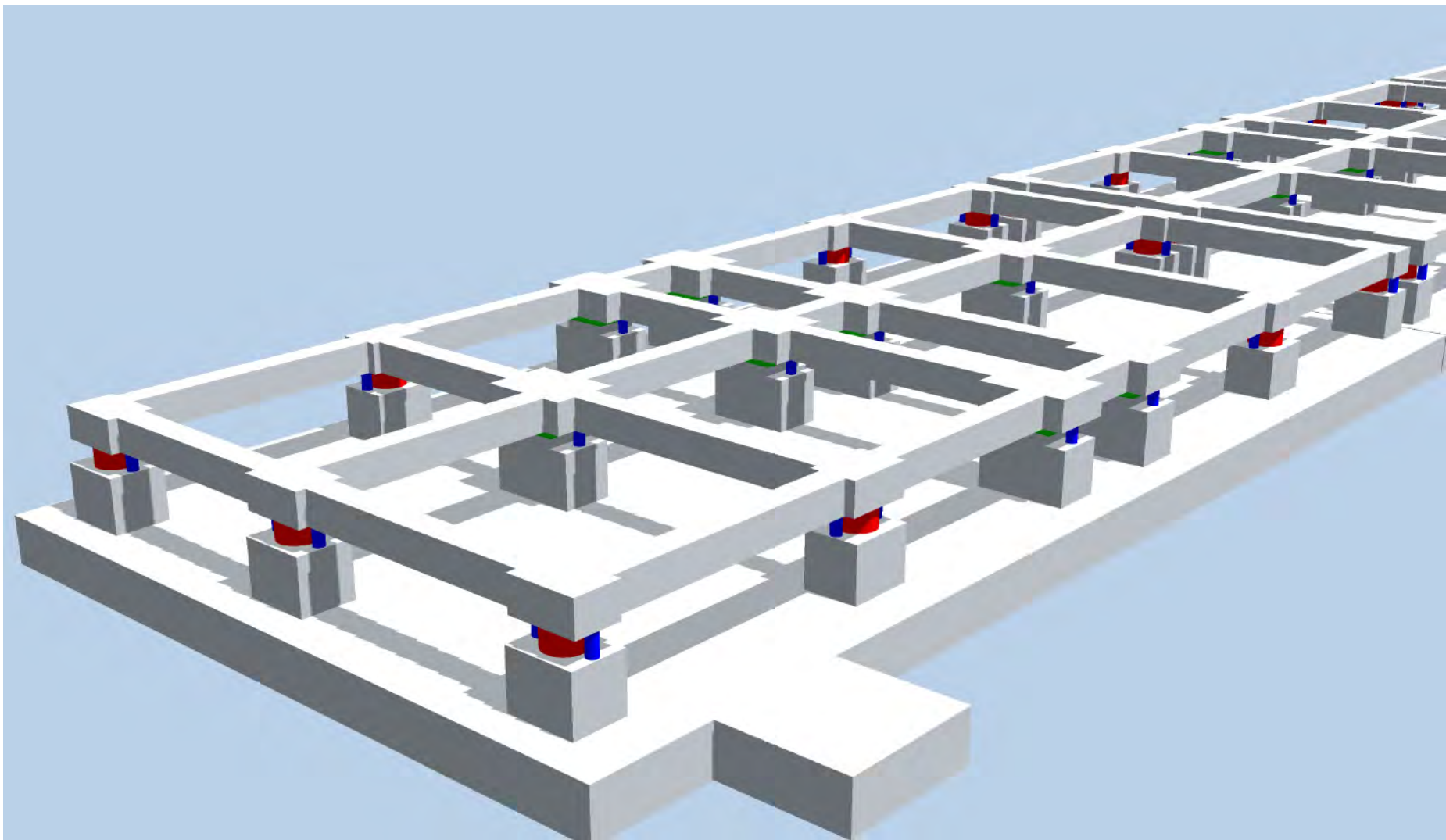
# PIANTA DEGLI ISOLATORI



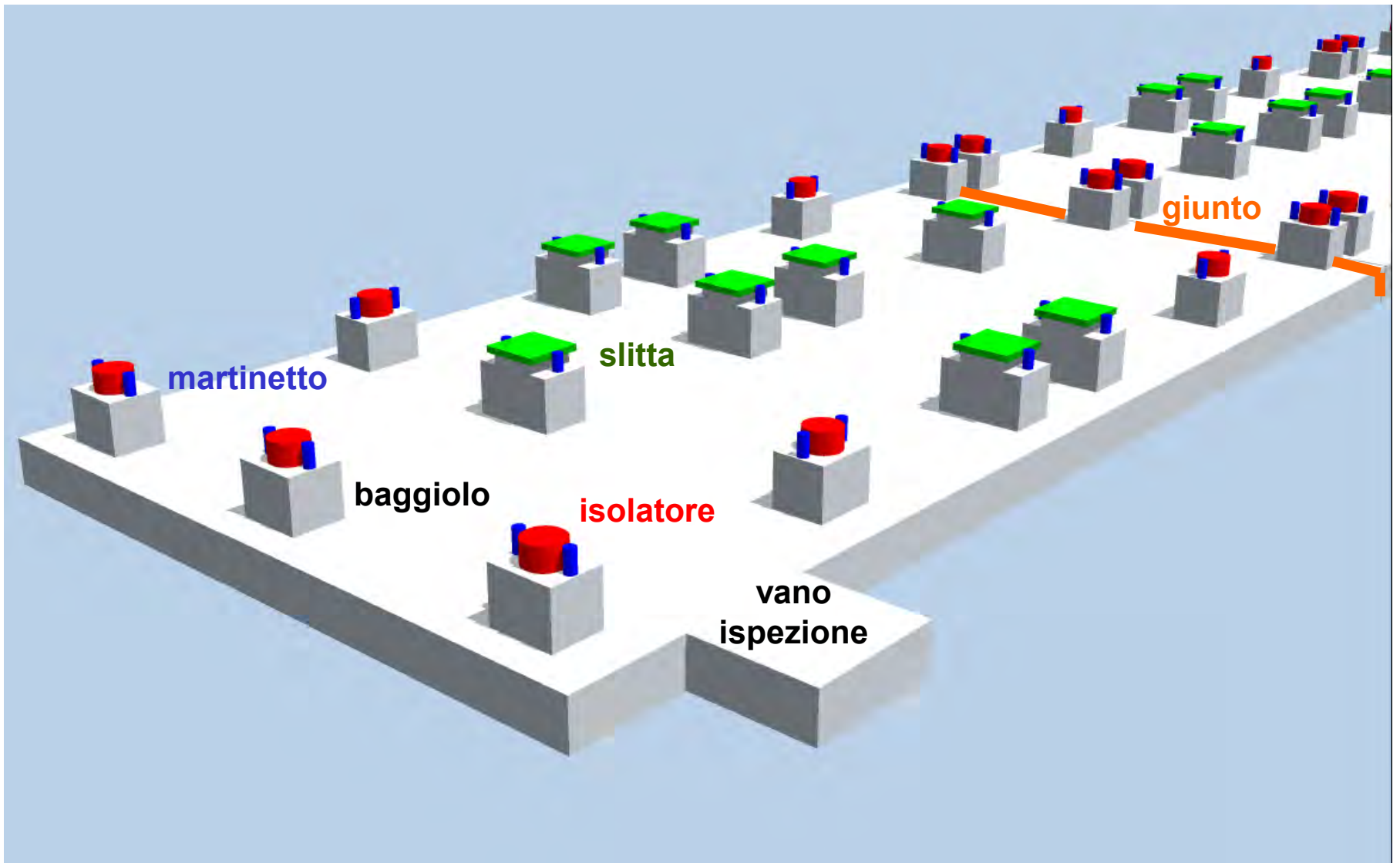
 **ISOLATORI**

 **BAGGIOLI**

 **SLITTE**



**VISTA D'INSIEME DEL PIANO INTERRATO**



**Baggioli, isolatori , slitte e e posizione martinetti per sostituzione**

# Criteri di dimensionamento degli isolatori

1) Si fissa il periodo di oscillazione della struttura isolata in genere nel range  $2.0 < T_{is} < 3.0$  sec ( $T_{is} > 3T_{bf}$ )

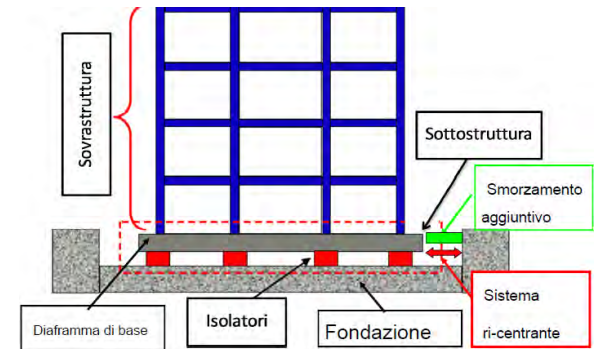
2) Si determina la rigidezza elastica complessiva del sistema di isolamento sismico con la relazione:

$$T_{is} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{e,is}}}$$



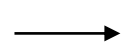
$$K_{eis} = \left(\frac{2\pi}{T_{is}}\right)^2 M$$

essendo **M** la massa totale dell'edificio

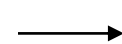


3) Si determina la rigidezza del singolo isolatore:

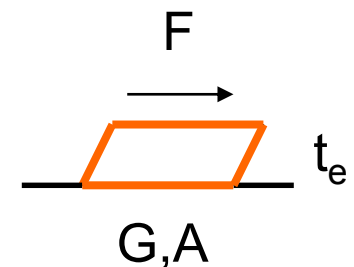
$$K_e = K_{e,is}/n$$



(da catalogo)



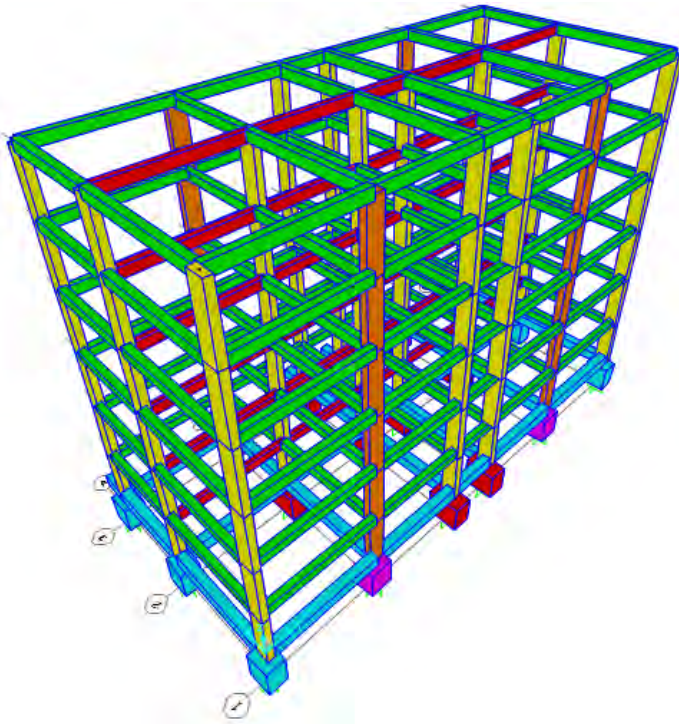
$$K_e = \frac{GA}{t_e}$$



essendo **n** il numero di isolatori.

# DIMENSIONAMENTO SISTEMA ISOLAMENTO

$$W = 26600 \text{ KN}$$



$$M = 2660 \text{ KNs}^2/\text{m}$$

## PRESCRIZIONI NORMATIVE:

Il periodo proprio della struttura isolata deve rispettare la seguente condizione:

$$3 T_{bf} \leq T_{is} \leq 3,0 \text{ s}$$

## PERIODI PROPRI EDIFICIO:

$$T_{bf} = 0,835 \text{ s}$$

Edificio a base fissa



$$T_{is} \geq 2,55 \text{ s}$$

Edificio isolato

## RIGIDEZZA ISOLATORI

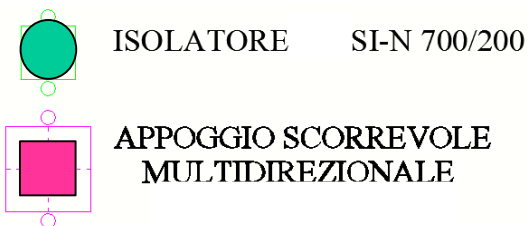
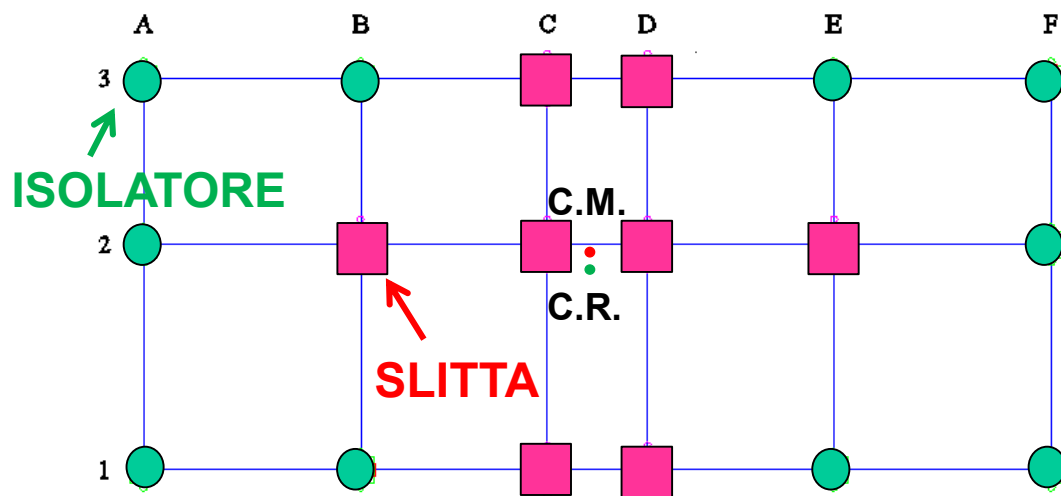
$$K_{eis} = \left(\frac{2\pi}{T_{is}}\right)^2 M \leq 16500 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Il posizionamento degli isolatori deve ridurre al minimo l'eccentricità tra il baricentro delle masse e il baricentro delle rigidezze del sistema di isolamento



# DIMENSIONAMENTO SISTEMA ISOLAMENTO

10 isolatori elastomerici + 8 appoggi scorrevoli

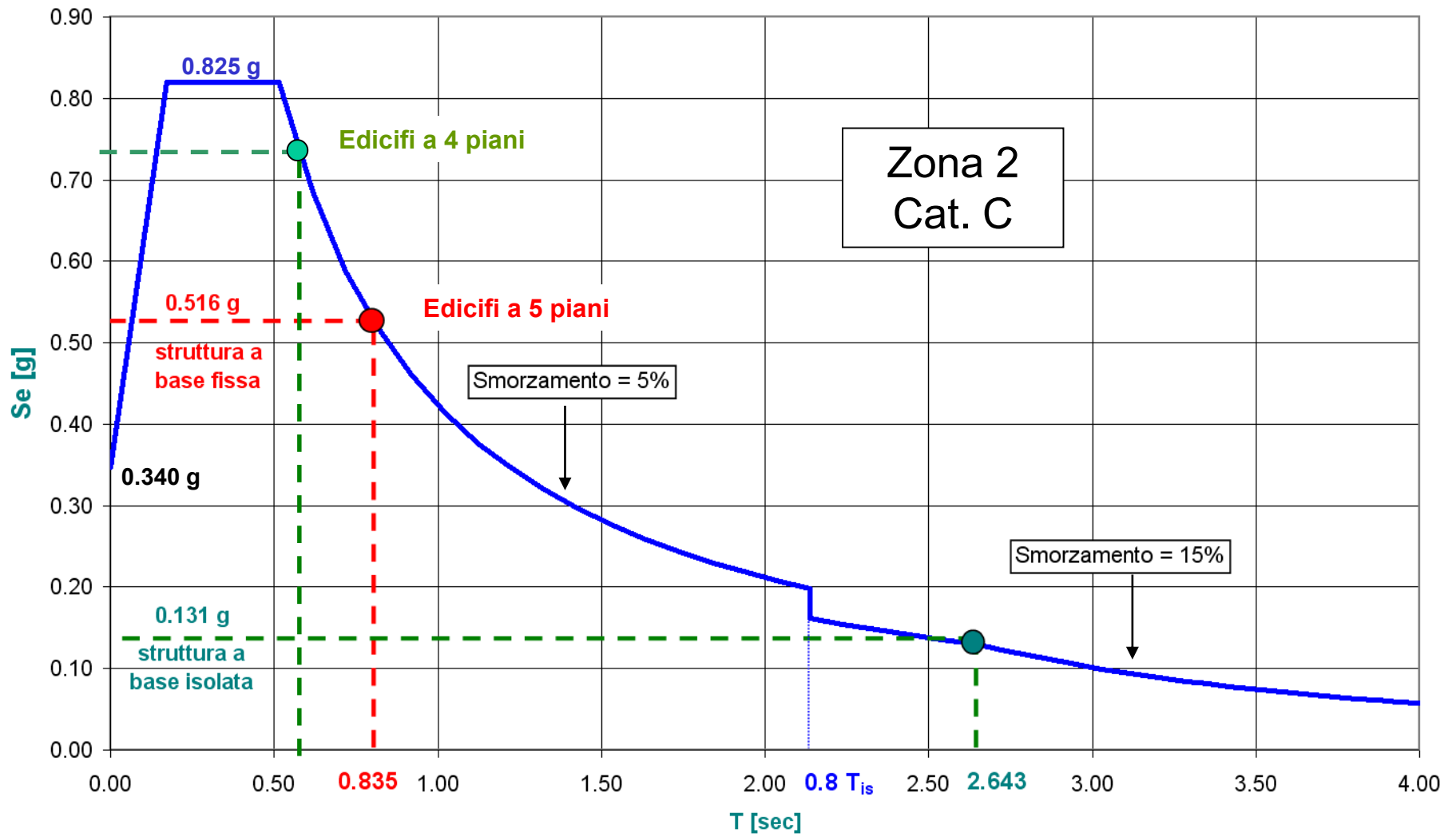


**RIGIDEZZA ISOLATORI**

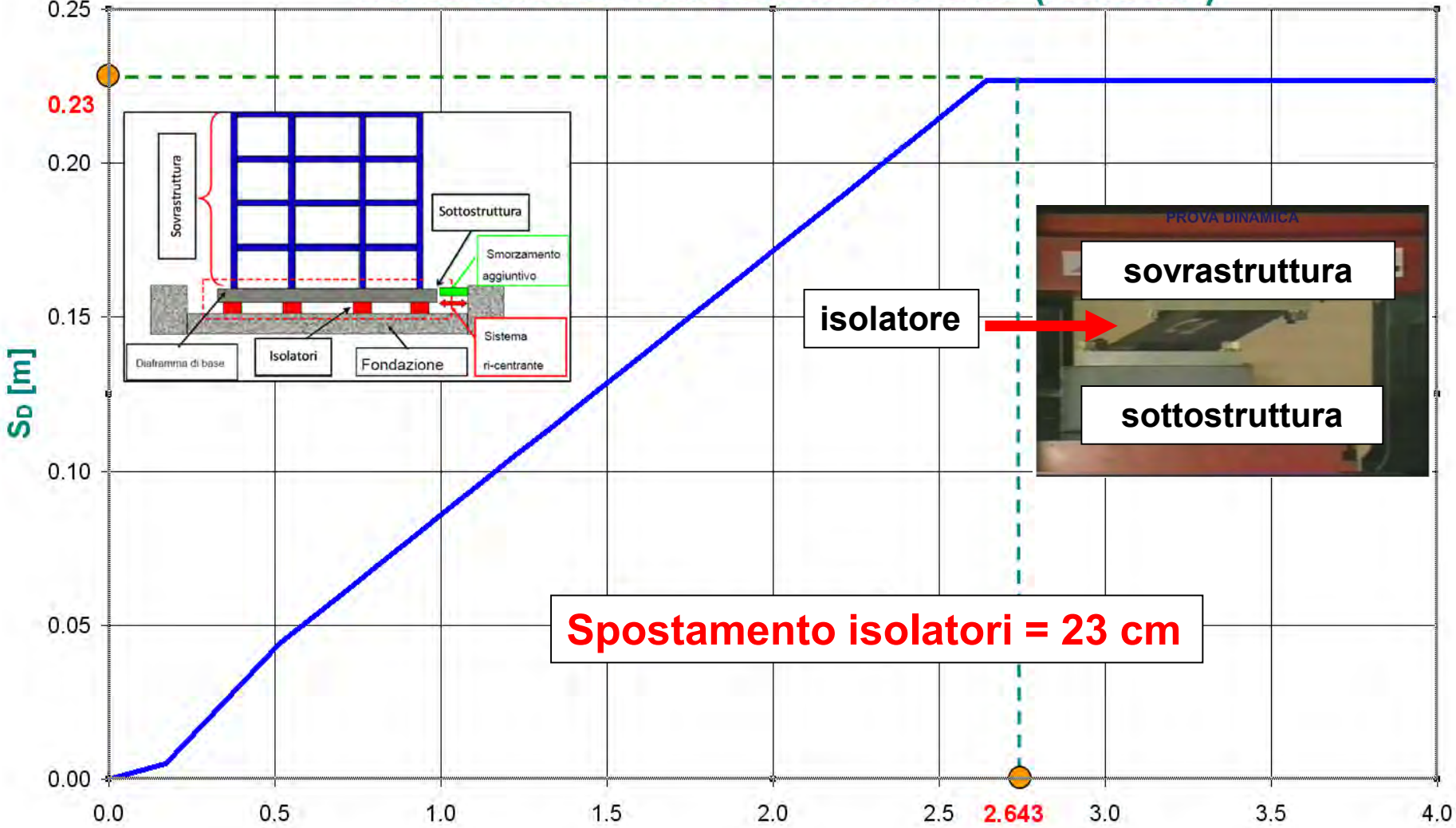
$$K_{eis} = 10 \cdot 1540 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 15400 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

SI-N	V kN	F <sub>zd</sub> kN	K <sub>e</sub> kN/mm	K <sub>v</sub> kN/mm	D <sub>g</sub> mm	t <sub>e</sub> mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-N 450/204	45	2490	0.62	541	450	204	343	393	500	300
SI-N 500/204	270	3890	0.77	747	500	204	343	393	550	369
SI-N 550/203	610	5790	0.94	871	550	203	327	377	600	419
SI-N 600/200	1090	6360	1.13	1016	600	200	312	362	650	471
SI-N 650/207	1650	7620	1.28	1118	650	207	313	363	700	540
SI-N 700/200	2490	9650	1.54	1309	700	200	307	367	750	669
SI-N 800/200	5470	14990	2.01	1967	800	200	307	367	850	871
SI-N 900/204	7980	21220	2.50	2317	900	204	318	378	950	1136
SI-N 1000/210	10780	22590	2.99	2667	1000	210	326	406	1050	1590
SI-N 1100/210	14930	27460	3.62	3556	1100	210	326	406	1150	1919
SI-N 1200/208	16670	28700	4.35	4109	1200	208	316	396	1250	2207

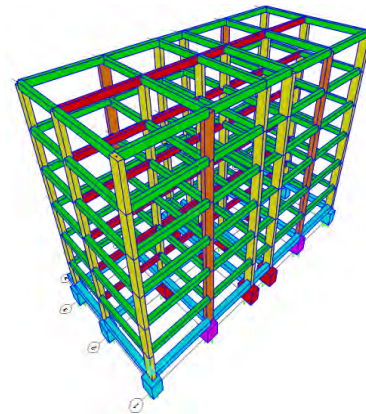
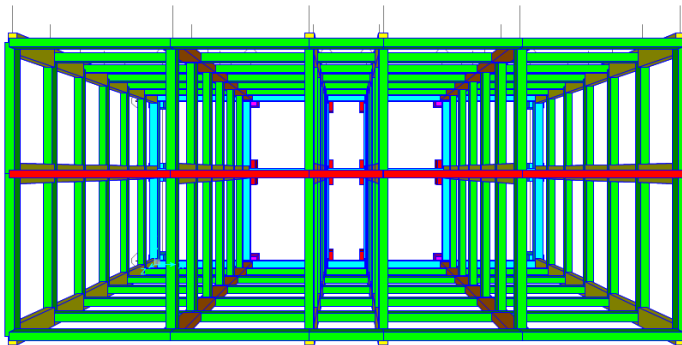
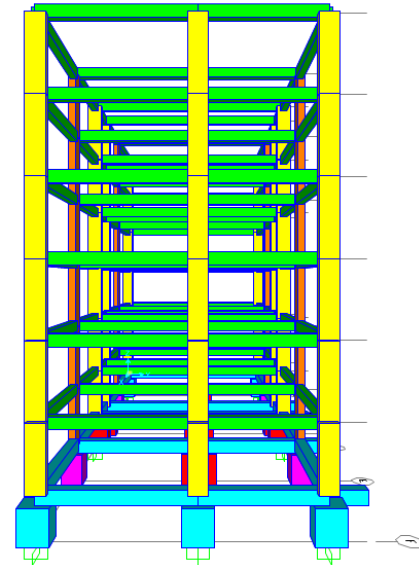
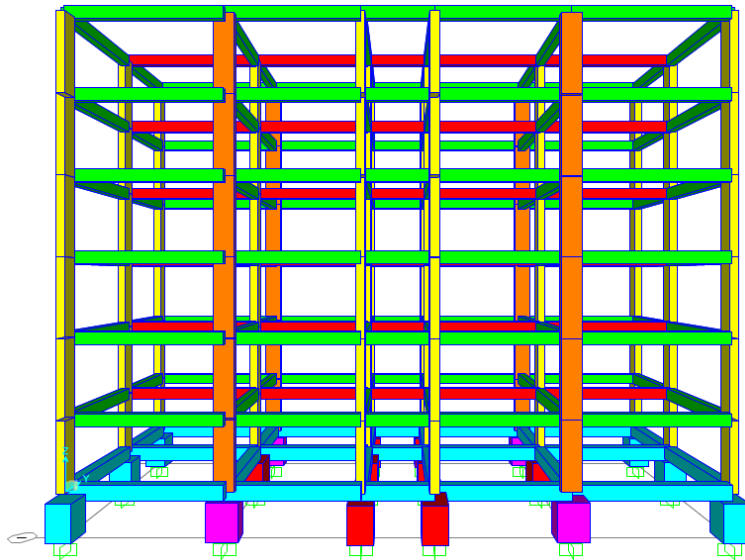
# SPETTRO ELASTICO - SLV



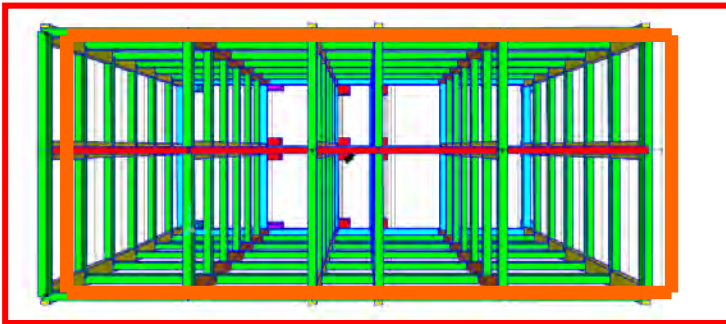
# Spettro di Risposta - Spostamento Relativo tra Sovrastruttura e Sottostruttura (Isolatori)



# MODELLO EDIFICIO – ANALISI MODALE



# ANALISI MODALE

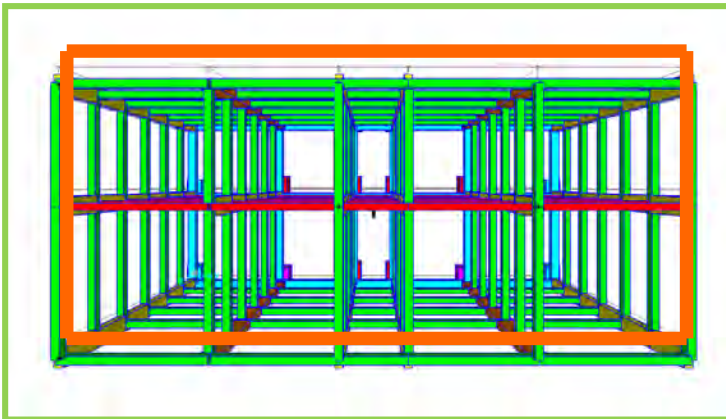


→  
trasl. X

## 1° MODO DI VIBRARE

$$T_1 = 2,703 \text{ s}$$

$$U_x = 98\% \quad U_y = 0\% \quad R_z = 11,8\%$$

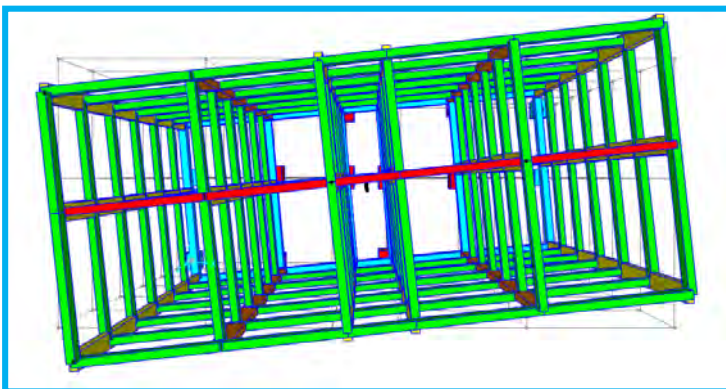


↑  
trasl. Y

## 2° MODO DI VIBRARE

$$T_2 = 2,643 \text{ s}$$

$$U_x = 0\% \quad U_y = 98\% \quad R_z = 57,3\%$$



rot. Z

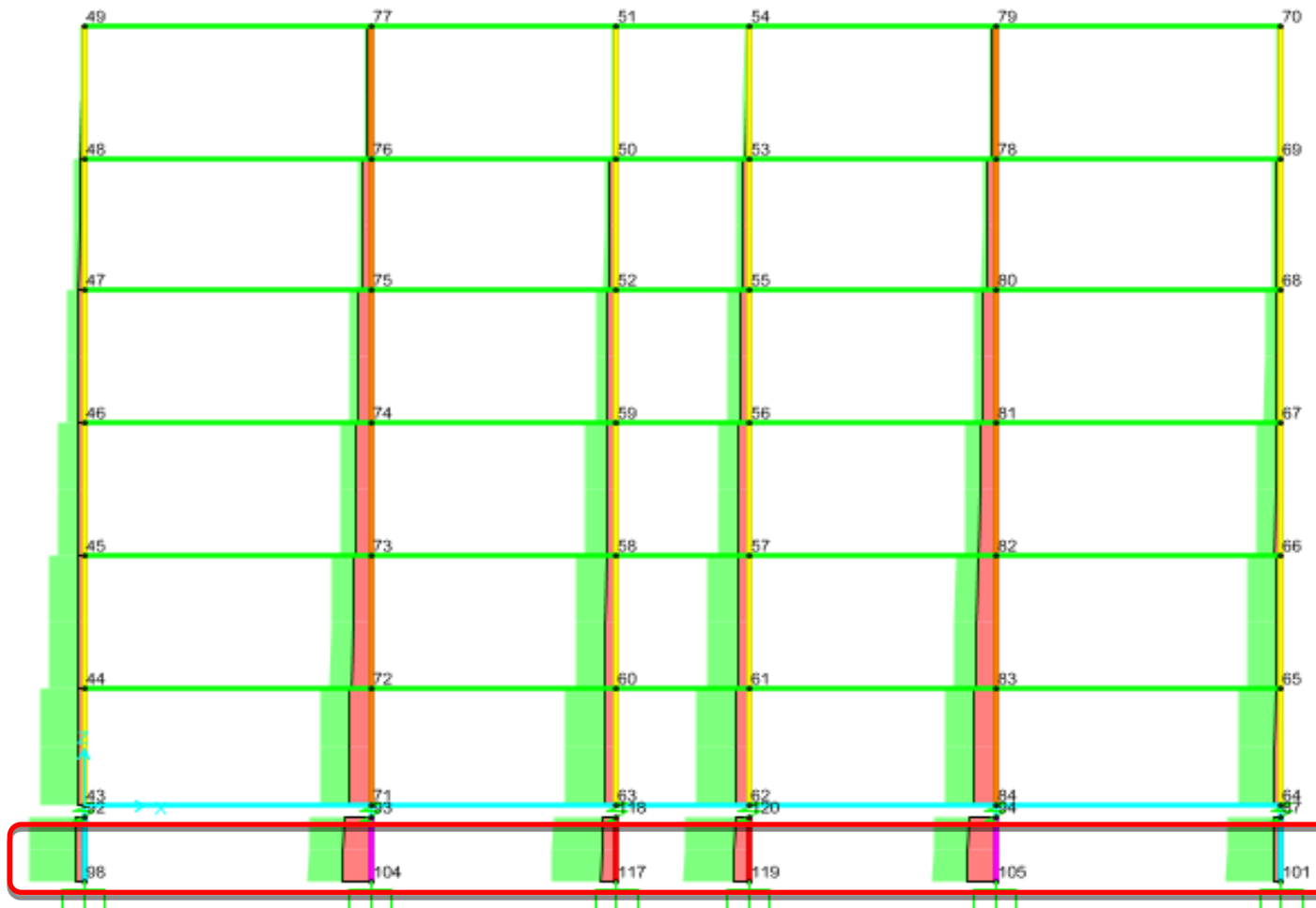
## 3° MODO DI VIBRARE

$$T_3 = 2,190 \text{ s}$$

$$U_x = 0\% \quad U_y = 0\% \quad R_z = 28,8\%$$

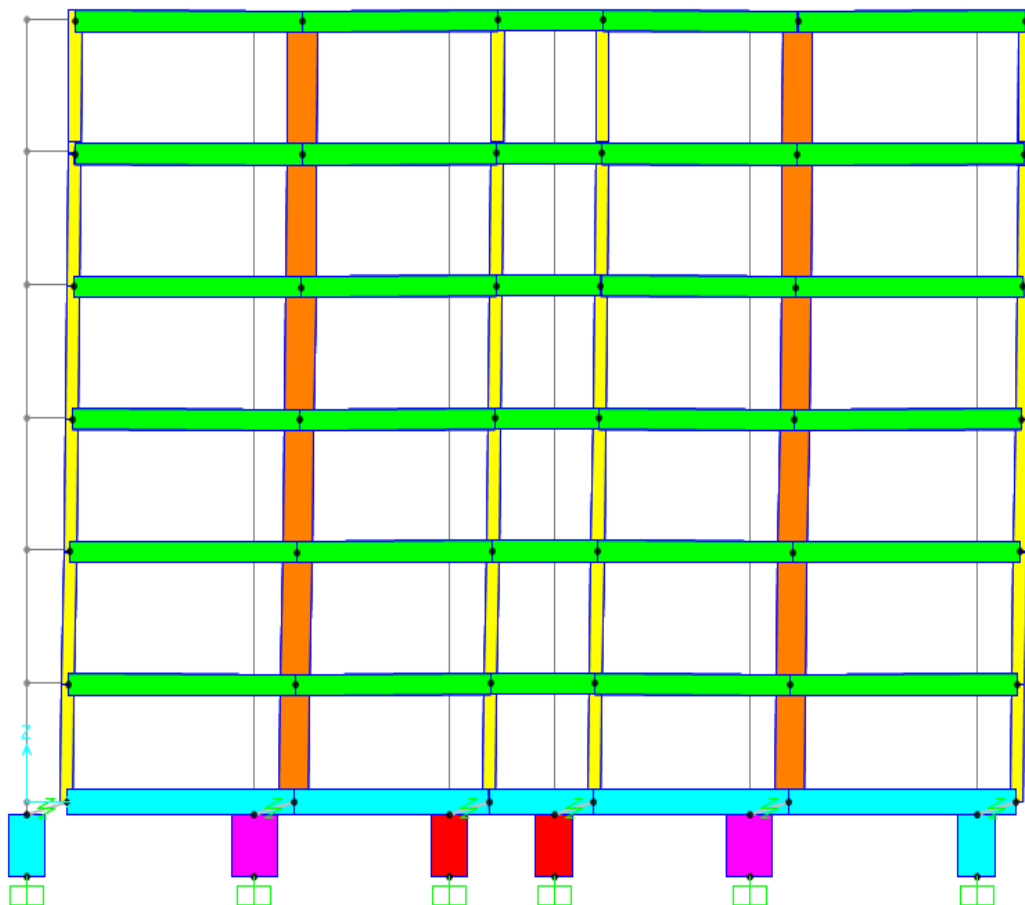


# DISTRIBUZIONE DEGLI SFORZI ASSIALI



**SFORZI ASSIALI ISOLATORI TUTTI DI COMPRESSIONE**

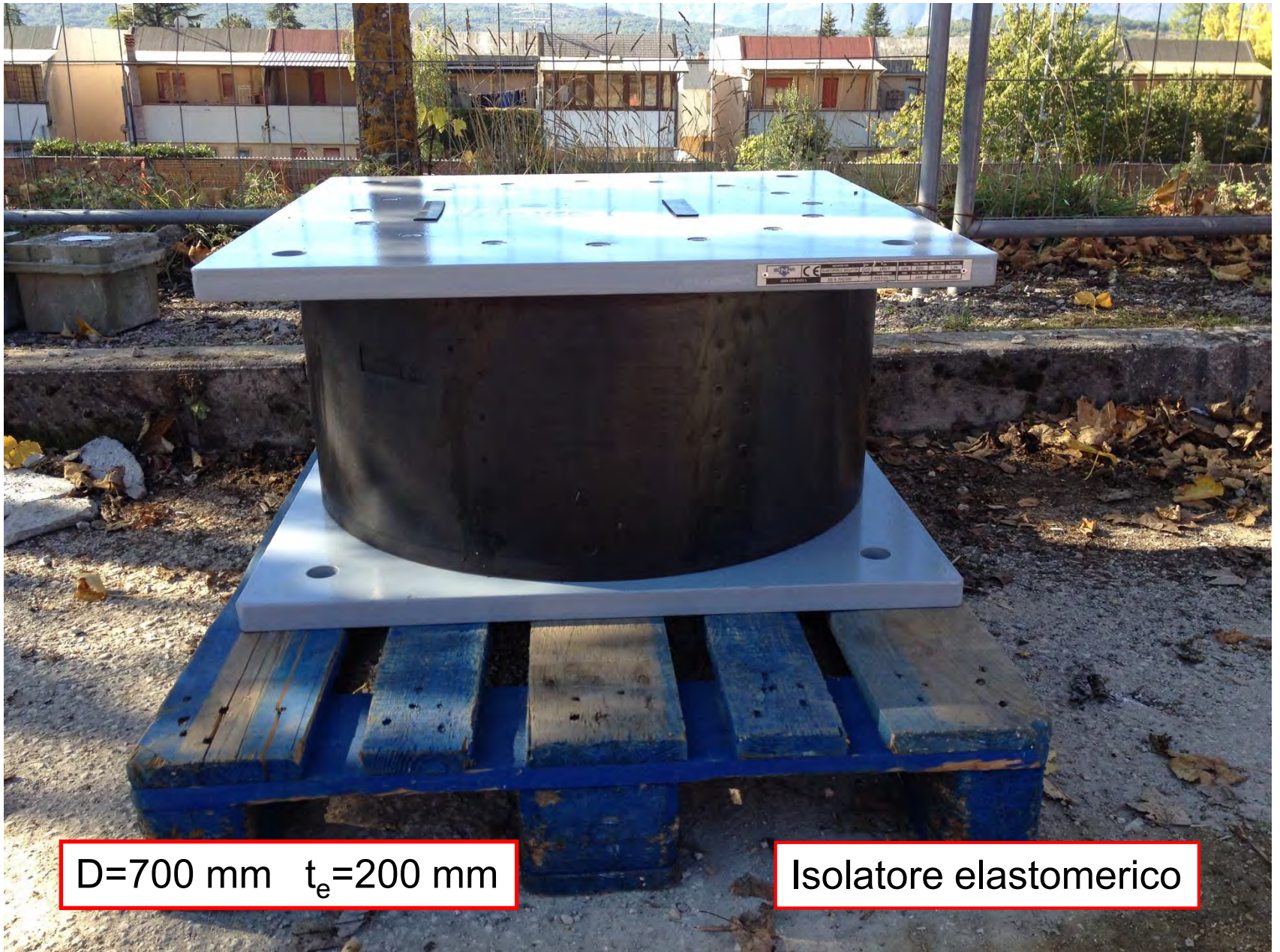
## SPOSTAMENTI DI INTERPIANO - SLD



$$d_r < \frac{2}{3} (0,005 \cdot h)$$

$$d_r = 3 \text{ mm} < 10.5 \text{ mm}$$

Gli spostamenti di interpiano sono modesti confermando l'ipotesi che la massa isolata si muove di moto rigido



$D=700 \text{ mm}$     $t_e=200 \text{ mm}$

Isolatore elastomerico





Slitta – Appoggio scorrevole





Baggioli degli isolatori





posa  
isolatore





**isolatore**

**slitta**





**Vista d'insieme di un modulo base**





Vista degli isolatori elastomerici (posizione corrente e sul giunto) e del dettaglio di una isolatore a scorrimento (slitta).



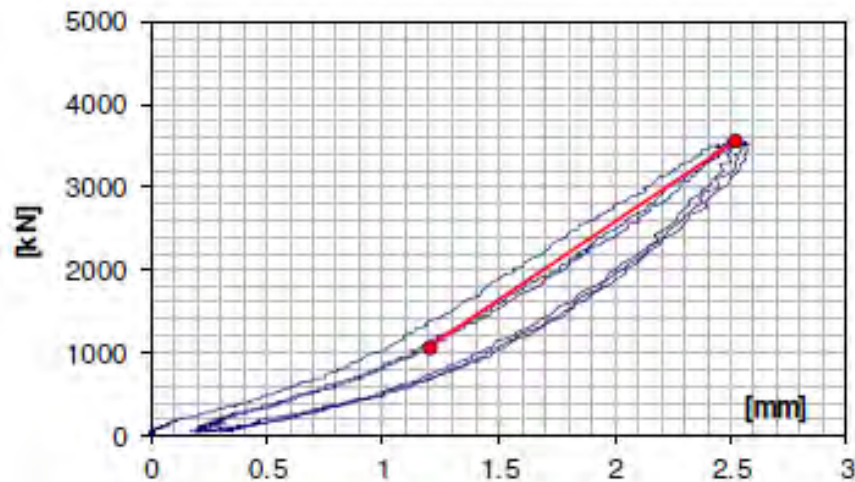




# Prova di compressione assiale

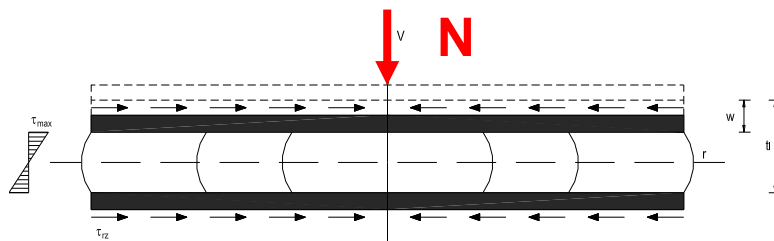
( $N=3565 \text{ KN}$ ,  $w_{\max}=2.5 \text{ mm}$ )

Risultati: dispositivo SN 01 / Test results: device SN 01



Data / Date	06/10/2015
ID	Test 1
N [kN]	3568
[N/mm]	1892.1
N. cicli / N. cycles	3

Figura 1: Legame carico verticale-abbassamento / Figure 1: Compression Stiffness.

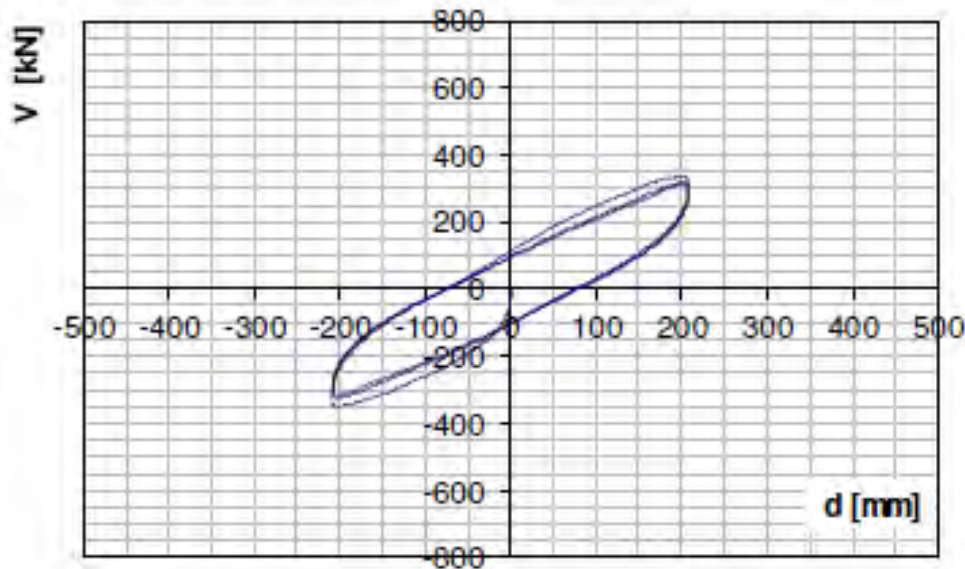


Isolatore  
elastomerico

$K_v = 1892 \text{ KN/mm}$

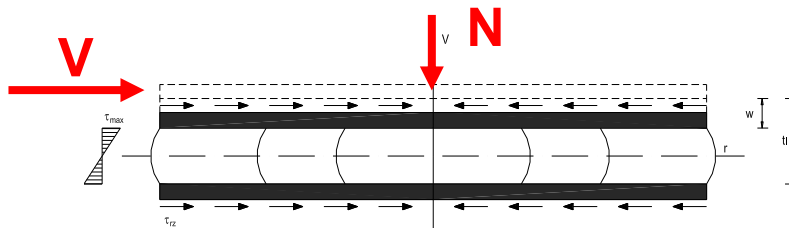


# Prova a taglio ciclico con uno spostamento impresso di 200 mm ( $N = 3678$ KN    $V = 306$ KN)



Data / Date	06/10/2015
ID	Test 2
N [kN]	3678
$d_{\max}$ 3°CICLE [mm]	208.27
$d_{\min}$ 3°CICLE [mm]	-208.19
$V_{\max}$ 3°CICLE [kN]	301.96
$V_{\min}$ 3°CICLE [kN]	-306.65
$f$ 3°CICLE [Hz]	0.500
N. cicli / N. cycles	3
$K_{\text{eff}}$ 3°CICLE [kN/mm]	1.461
$\xi$ 3°CICLE [%]	16.9%

Figura 2 : Legame spostamento orizzontale vs forza di taglio. / Figure 2: Horizontal vs Shear Strain.



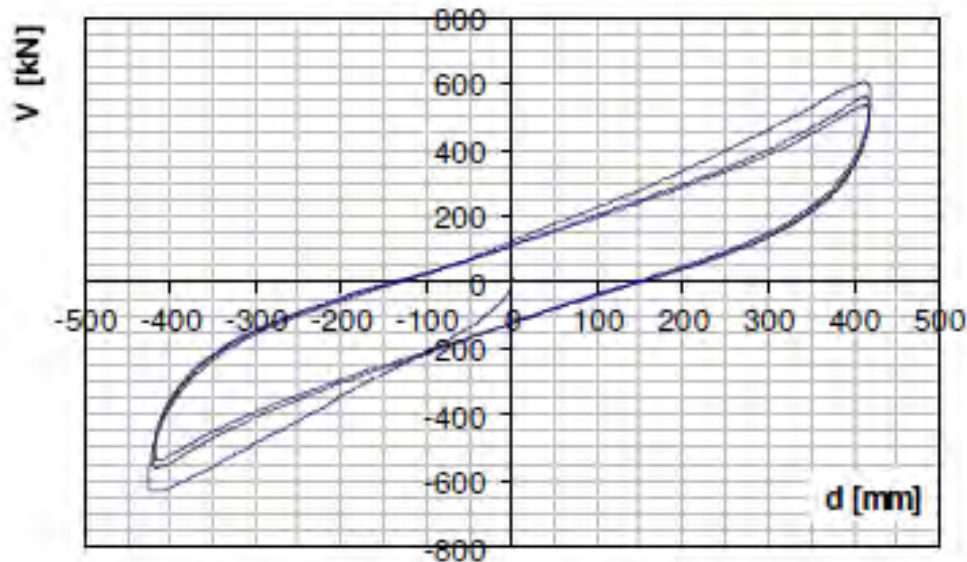
Modalità di prova



isolatore

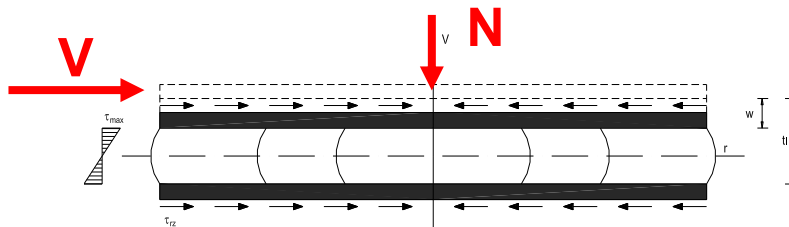


# Prova a taglio ciclico con uno spostamento impresso di 400 mm ( $N = 3684$ KN    $V = 630$ KN)



Data / Date	06/10/2015
ID	Test 3
N [kN]	3684
$d_{\max}$ 3°CICLE [mm]	420.50
$d_{\min}$ 3°CICLE [mm]	-425.40
$V_{\max}$ 3°CICLE [kN]	606.65
$V_{\min}$ 3°CICLE [kN]	-630.81
$f$ 3°CICLE [Hz]	0.500
N. cicli / N. cycles	5
$K_{\text{eff}}$ 3°CICLE [kN/mm]	1.256
$\xi$ 3°CICLE [%]	13.6%

Figura 3: Legame spostamento orizzontale vs forza di taglio. / Figure 3: Horizontal vs Shear Strain.



Modalità di prova



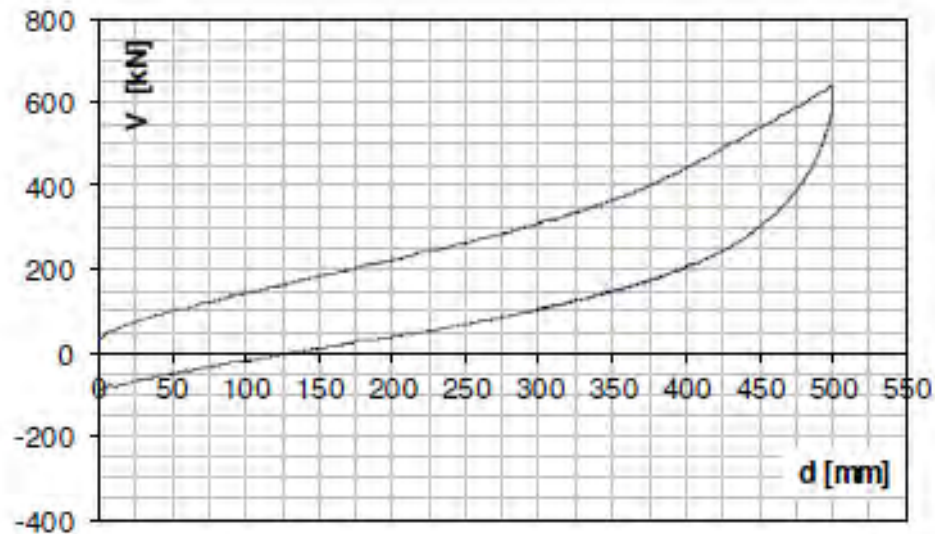
isolatore



# Prova di Accettazione Isolatori Elastomerici

Prova di aderenza tra  
elastomero e lamierino

Risultati: dispositivo SN 01 / Test results: device SN 01



Data / Date	06/10/2015
ID	Test 1
N [kN]	3682
$d_{max}$ [mm]	500.29
$d_{min}$ [mm]	-0.31
$V_{max}$ [kN]	641.55
$V_{min}$ [kN]	-85.89
$v$ [mm/sec]	1.000
N. cicli / N. cycles	1
$K_{eff}$ [kN/mm]	1.282
$\epsilon$ [%]	9.0%

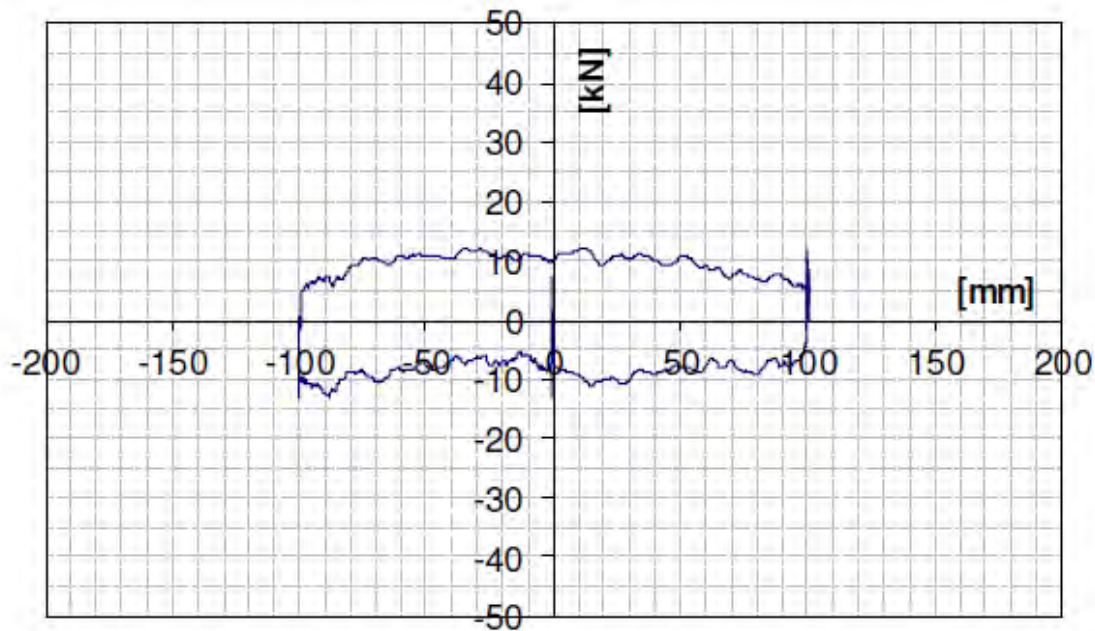
Figura 1: Legame spostamento orizzontale vs forza di taglio. / Figure 1: Horizontal vs Shear Strain.

**Prova a taglio crescente monotonicamente con spostamento  
massimo impresso di 500 mm (N= 3682 KN V=642 KN)**



# ISOLATORI A SCORRIMENTO

Prova a taglio ciclico con uno  
spostamento impresso di 100 mm  
(N = 2515 KN    V = 11.9 KN)



Data / Date	02/11/2015
ID	Test 1
N [kN]	2515
d <sub>max_1° CICLE</sub> [mm]	100.33
d <sub>min_1° CICLE</sub> [mm]	100.33
V <sub>max_1° CICLE</sub> [kN]	11.89
V <sub>min_1° CICLE</sub> [kN]	-13.05
f [Hz]	0.500
N. cicli / N. cycles	1
μ [%]	0.35%

Figura 1: Legame spostamento orizzontale vs forza di attrito. / Figure 2: Horizontal displacement vs frictional resistance.

**Grazie per l'Attenzione**