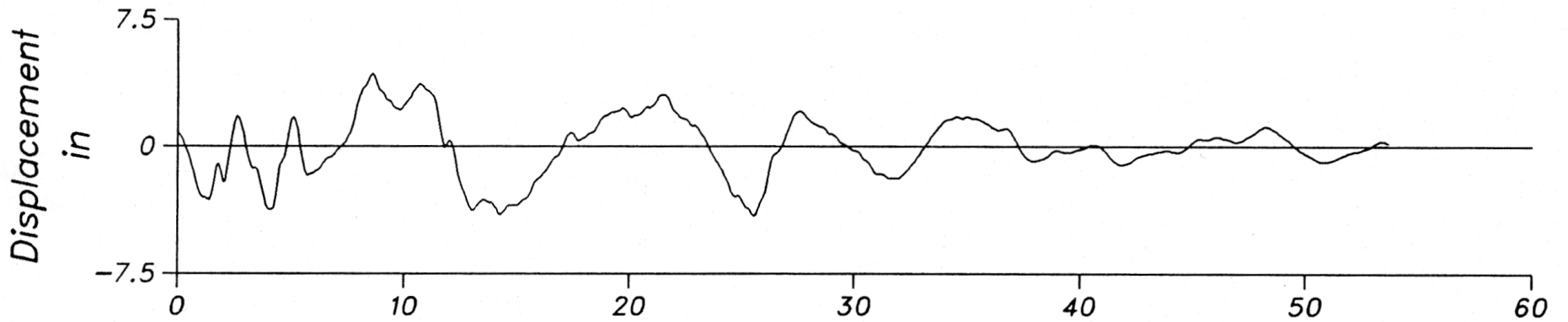
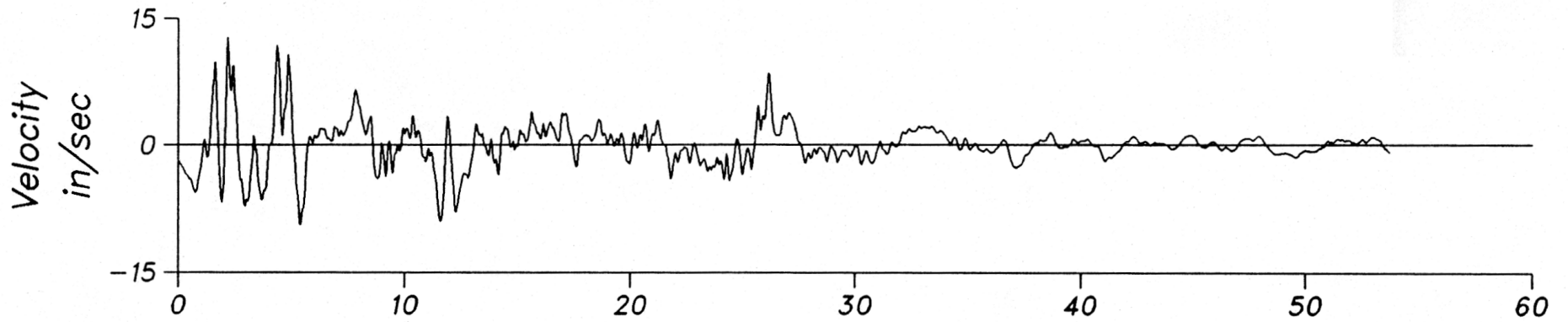
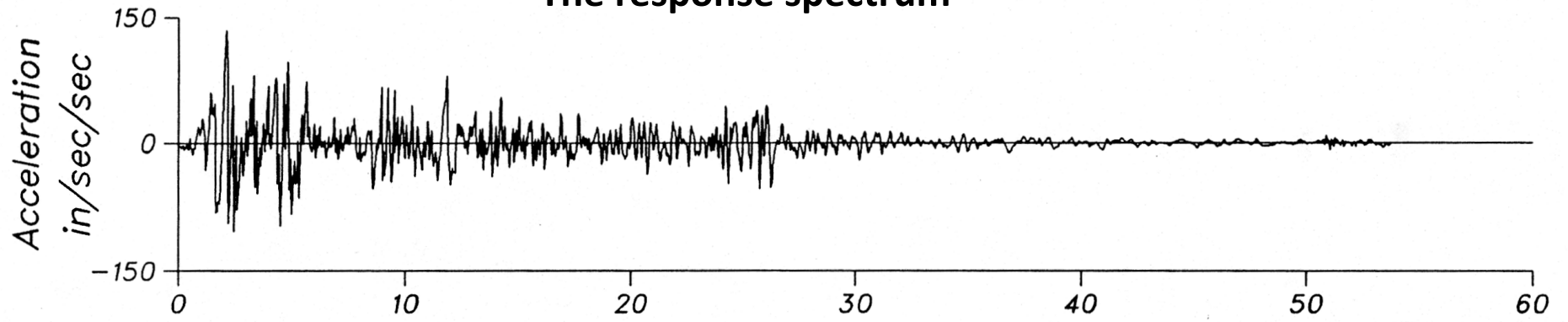


Costruzioni in zona sismica

A.A. 2019-2020

SDOF systems: the response spectrum

The response spectrum



Time, sec

In order to perform the seismic analysis and design of a structure to be built at a particular location, the actual time history record is required.

$$\ddot{u}_g(t)$$

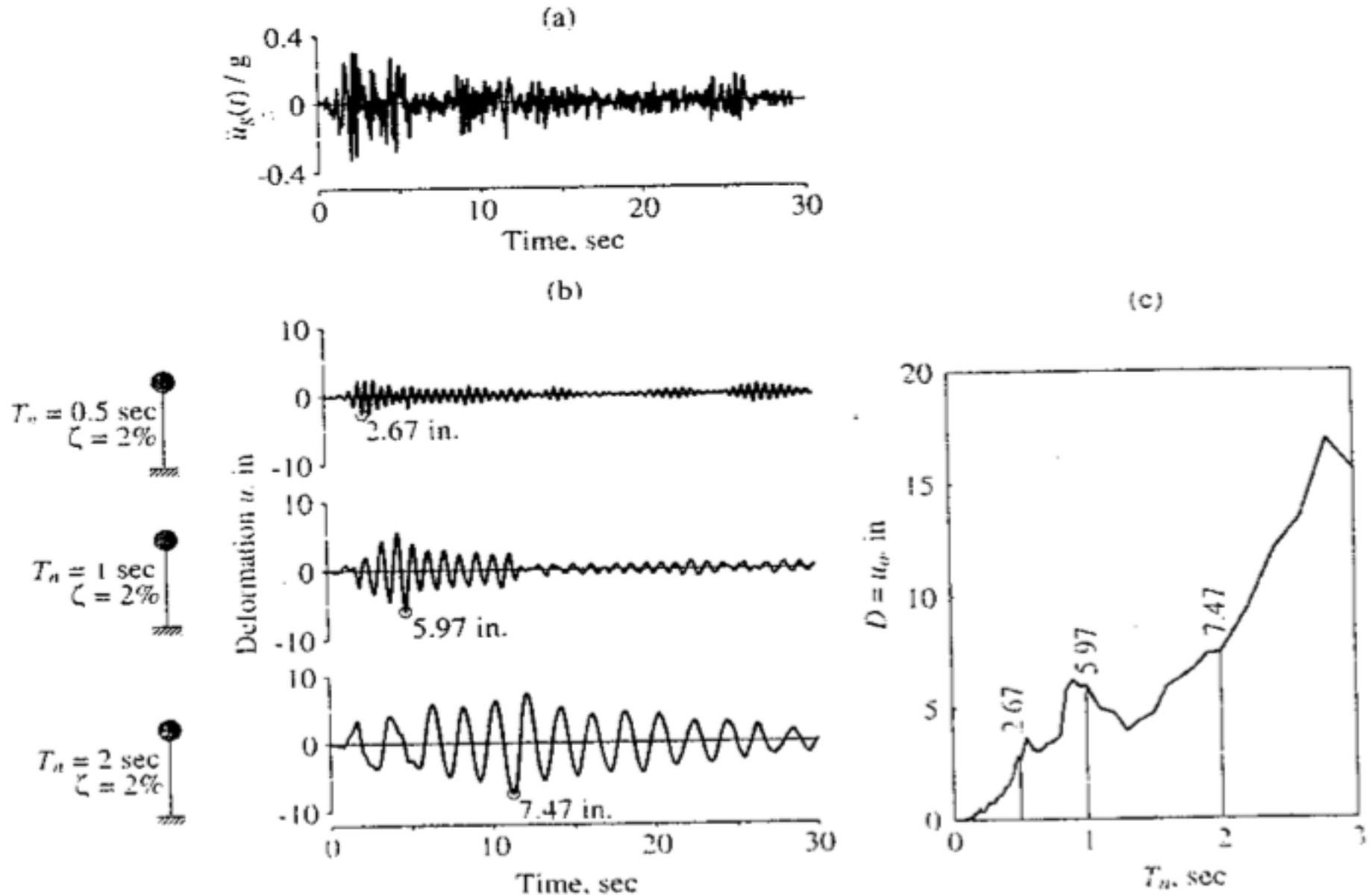
However, it is not possible to have such records at each and every location. Further, the seismic analysis of structures cannot be carried out simply based on the peak value of the ground acceleration as the response of the structure depend upon the frequency content of ground motion and its own dynamic properties.

$$u_{\max}(\ddot{u}_g(t), \xi, \omega)$$

To overcome the above difficulties, earthquake response spectrum is the most popular tool in the seismic analysis of structures.

The response spectrum

Response spectra are curves plotted between maximum response of SDOF system subjected to specified earthquake ground motion and its time period (or frequency)



The response spectrum

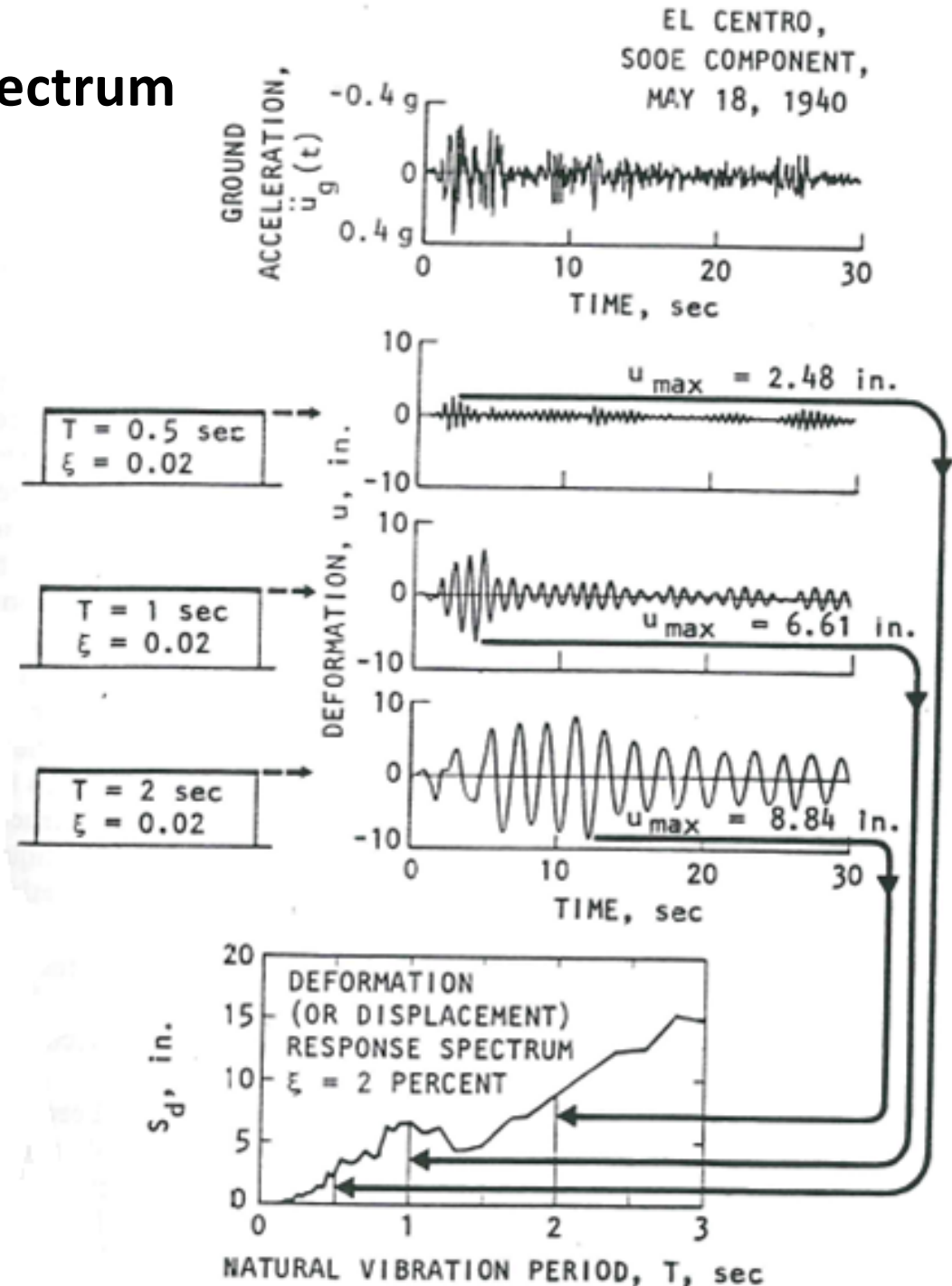
By solving the equation of motion, with oscillators having different period T

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

The solution in terms of relative displacement is obtained.

For each solution, the maximum displacement u_{\max} (in module) is recorded.

The response spectrum consists in the representation of u_{\max} as a function of the period T , or the frequency ω .



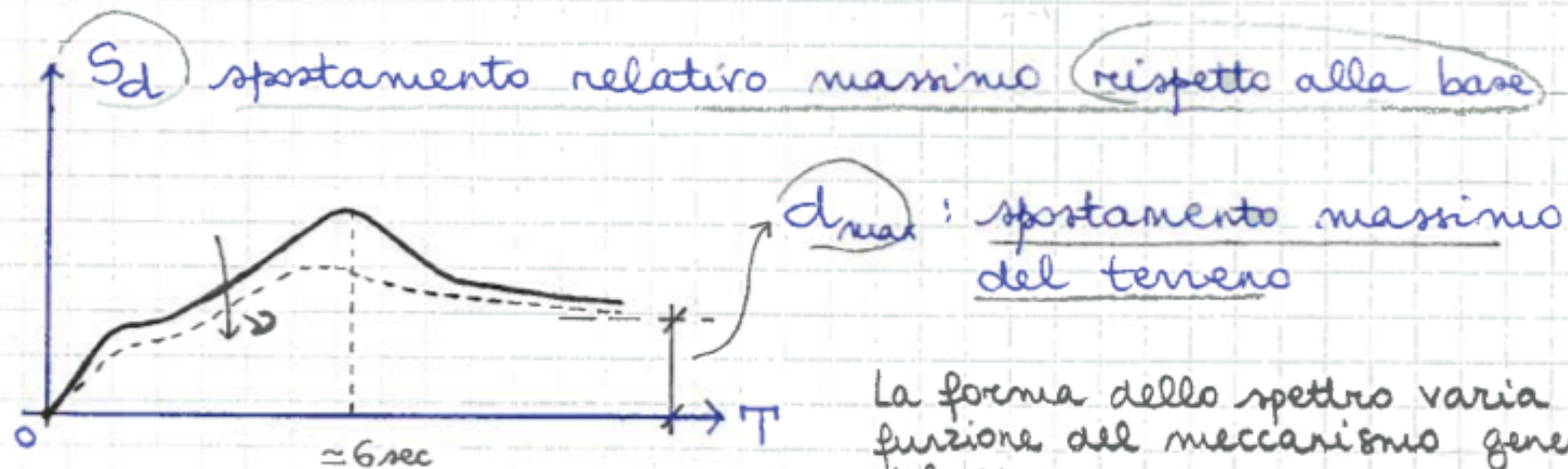
SPETTRO DI RISPOSTA IN SPOSTAMENTO

Nota l'accelerogramma (\rightarrow dato il terremoto di progetto) e' necessario conoscere la risposta massima per ogni T e per ogni ν .

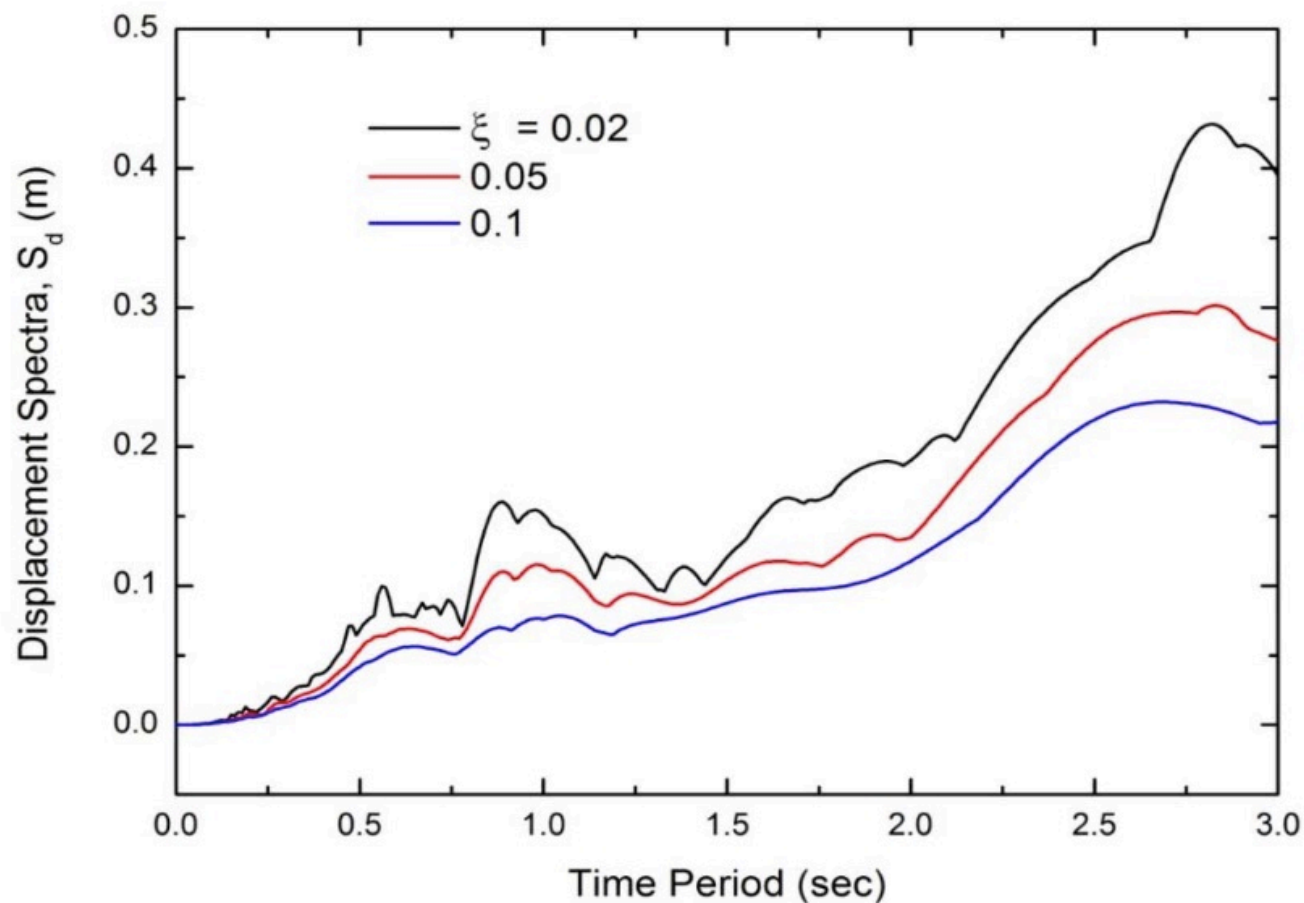
E' utile costruire un diagramma, detto "spettro di risposta in spostamento" dove in ascissa sono riportati i periodi propri T e in ordinata il valore di X_{max} . All'aumentare del rapporto di smorzamento ν la curva si abbassa.

Nota lo spostamento massimo X_{max} la sollecitazione massima e':

$$F_{max} = k \cdot X_{max}$$



La forma dello spettro varia anche in funzione del meccanismo generatore del sisma.



- $T=0$: struttura infinitamente rigida \rightarrow distorsione relativa nulla per qualsiasi accelerogramma. $S_d=0$
- $T \rightarrow \infty$: struttura infinitamente flemibile \rightarrow la massa alla sommità dell'oscillatore non si muove con lo spostamento della base, rigidezza k nulla \Rightarrow forza di richiamo elastico uguale a zero \Rightarrow spostamento massimo relativo S_d uguale allo spostamento massimo del terreno d_{max} . $S_d \rightarrow d_{max}$

Displacement, velocity and acceleration spectra

$$S_d(\xi, \omega) = |\mathbf{u}(t)|_{\max}$$

$$S_v(\xi, \omega) = |\dot{\mathbf{u}}(t)|_{\max}$$

$$S_a(\xi, \omega) = |\ddot{\mathbf{u}}(t) + \ddot{\mathbf{u}}_g(t)|_{\max}$$

Pseudo-velocity and pseudo-acceleration spectra

$$S_{pv}(\xi, \omega) = \omega S_d(\xi, \omega)$$

$$S_{pa}(\xi, \omega) = \omega^2 S_d(\xi, \omega)$$

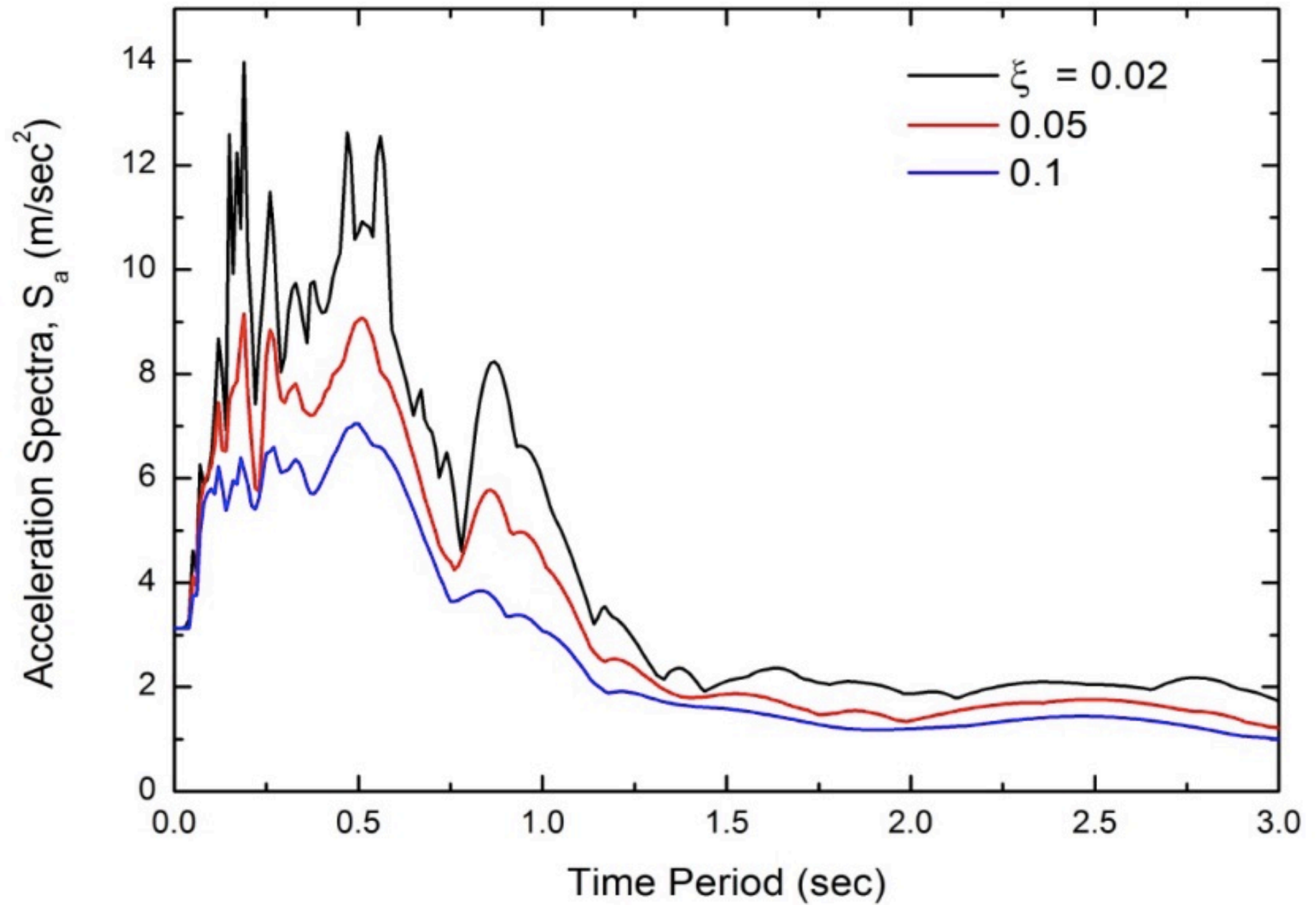
The prefix “pseudo” is used to distinguish these spectra from the absolute velocity and acceleration spectra.

Consider the case where $\xi=0$ (undamped system) i.e. the equation of motion writes:

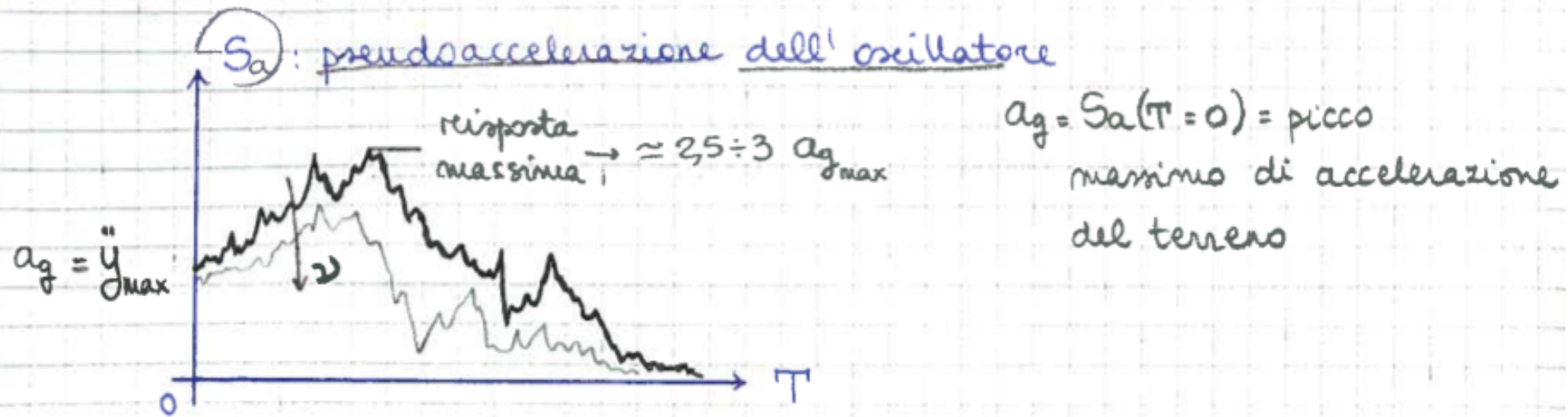
$$\ddot{u}(t) + \omega^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

$$\begin{aligned} S_a &= \left| \ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) \right|_{\max} = \left| -\omega^2 u(t) \right|_{\max} \\ &= \omega^2 \left| u(t) \right|_{\max} = \omega^2 S_d = S_{pa} \end{aligned}$$

In the absence of damping the pseudo-velocity and pseudo-acceleration spectra coincide with the velocity and acceleration spectra, respectively.



Pseudoaccelerazione: S_a non è esattamente l'accelerazione assoluta dell'oscillatore, ma quella che si avrebbe in assenza di smorzamento \rightarrow dato X_{max} produrrebbe la stessa $F_i \Rightarrow$ tutta l'En di def. si trasforma in En cinetica



All'aumentare del rapporto di smorzamento \rightarrow la curva si abbassa.

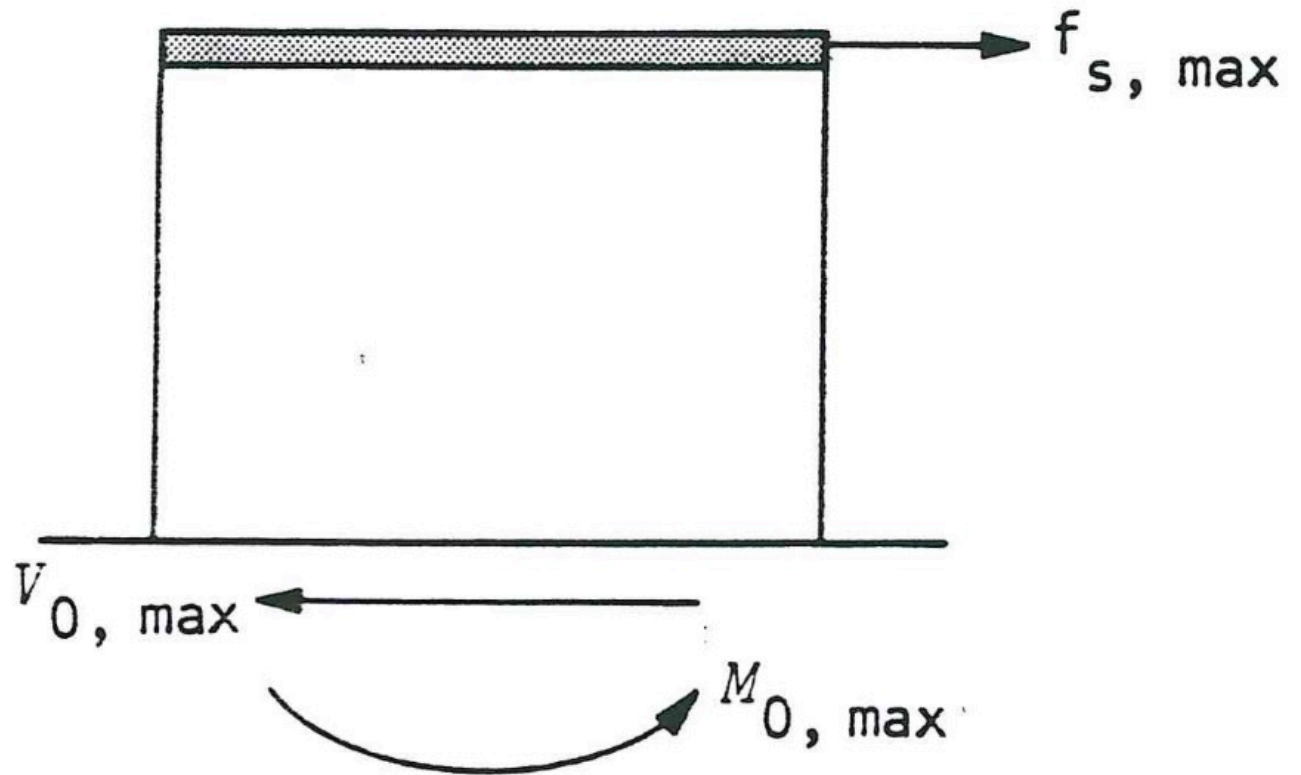
- $T=0$: $S_a = \ddot{y}_{max}$: struttura infinitamente rigida che trasla con il terreno \rightarrow la sua accelerazione assoluta coincide con l'accelerazione del terreno (il cui valore di progetto è il massimo registrato nell'accelerogramma).
- $T \rightarrow \infty$: $S_a \rightarrow 0$: struttura infinitamente flessibile \rightarrow la massa è ferma: $\ddot{z} = -\ddot{y} \rightarrow S_a = 0$

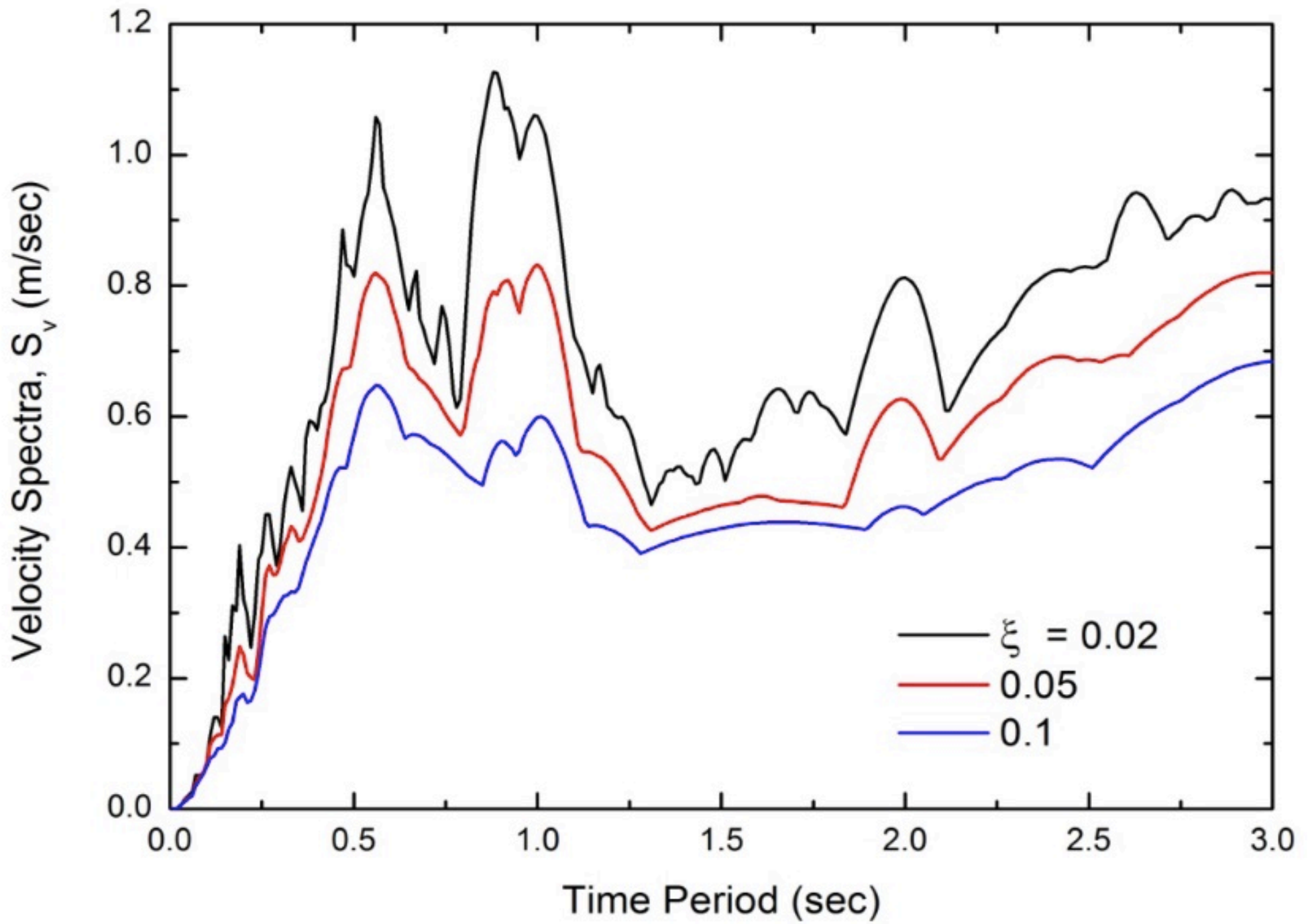
The maximum based shear V_{\max} and based moment M_{\max}

$$V_{\max} = k S_d = m \omega^2 S_d = m S_{pa} = \frac{S_{pa}}{g} w$$

$$M_{\max} = h V_{\max} = \frac{S_{pa}}{g} h w$$

where w is the weight of the system and g is the acceleration of gravity





SPETTRO DI RISPOSTA IN VELOCITA'

Meno utilizzato degli spettri in spostamento ed in accelerazione. Esprime per un dato accelerogramma e per un dato valore del rapporto di smorzamento il legame fra il periodo proprio della struttura e la sua massima risposta in termini di pseudovelocità → come per la pseudoaccelerazione il diagramma è ottenuto mediante una stima, sulla base degli spostamenti $S_d(T)$, valida sempre, tranne che nell'intorno di zero (il caso $T=0$ è solo teorico).

La pseudovelocità non è quindi esattamente la velocità dell'oscillatore, ma quella che si avrebbe in assenza di smorzamento, se cioè tutta l'energia di deformazione elastica si trasformasse in energia cinetica:

$$\frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} k x^2 \rightarrow$$

$$S_d = \frac{1}{\omega} S_v \rightarrow S_a = \omega \cdot S_v$$

In the absence of damping, the maximum strain energy E_{\max} stored in the structure during earthquake is equal to the maximum kinetic energy $V_{\max} = \frac{1}{2} m S_{pv}^2$ of the system:

$$E_{\max} = \frac{1}{2} k S_d^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 S_d^2 = \frac{1}{2} m S_{pv}^2 = V_{\max}$$

As limiting case consider a rigid system

$$\omega \rightarrow \infty \quad \text{or} \quad T \rightarrow 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S_d \rightarrow 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S_{pv} \rightarrow 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S_{pa} \rightarrow \left| \ddot{u}_g(t) \right|_{\max} = \text{PGA}$$

As limiting case consider a deformable system

$$\omega \rightarrow 0 \quad \text{or} \quad T \rightarrow \infty$$

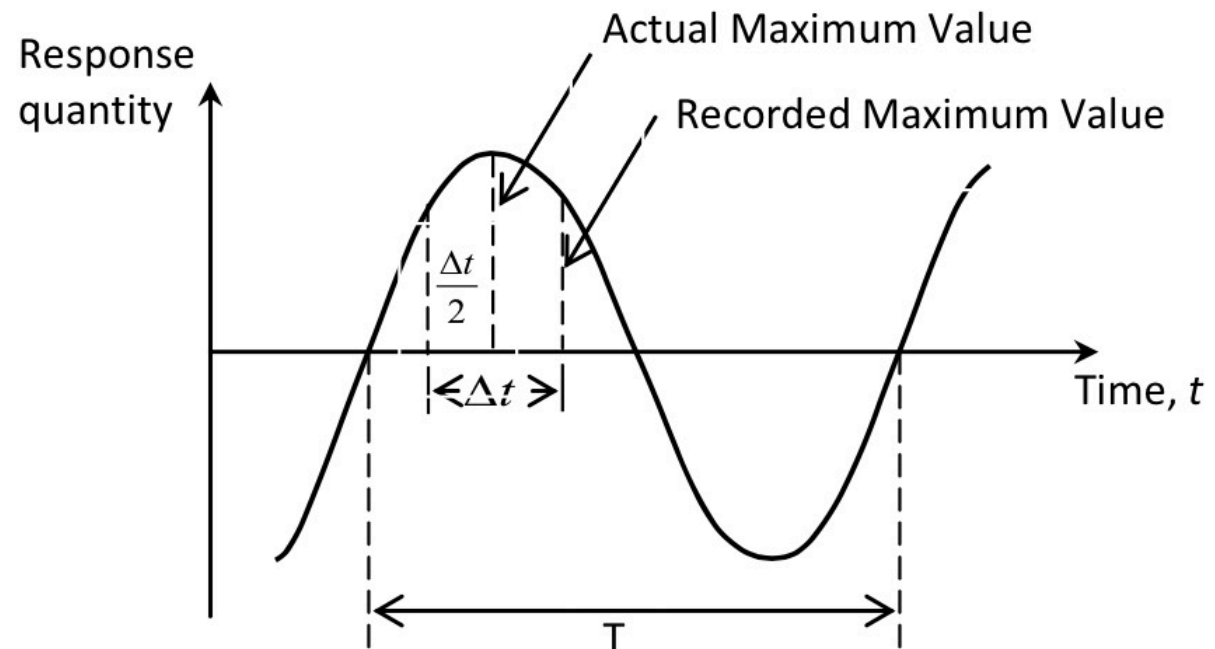
$$\lim_{\omega \rightarrow 0} S_d \rightarrow \left| \mathbf{u}_g(t) \right|_{\max} = \text{PGD}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} S_{pv} \rightarrow \left| \dot{\mathbf{u}}_g(t) \right|_{\max} = \text{PGV}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} S_{pa} \rightarrow 0$$

Errors in Evaluation of Response Spectrum

1. Straight line approximation. In the digital computation of spectra, the actual earthquake record is replaced by linear segments between the points of digitization.
2. Truncation Error. In general, a truncation error exists in numerical methods for integrating differential equations.
3. Error Due to Rounding the Time Record.
4. Error Due to Discretization. In any numerical method of computing the spectra, the response is obtained at a set of discrete points.

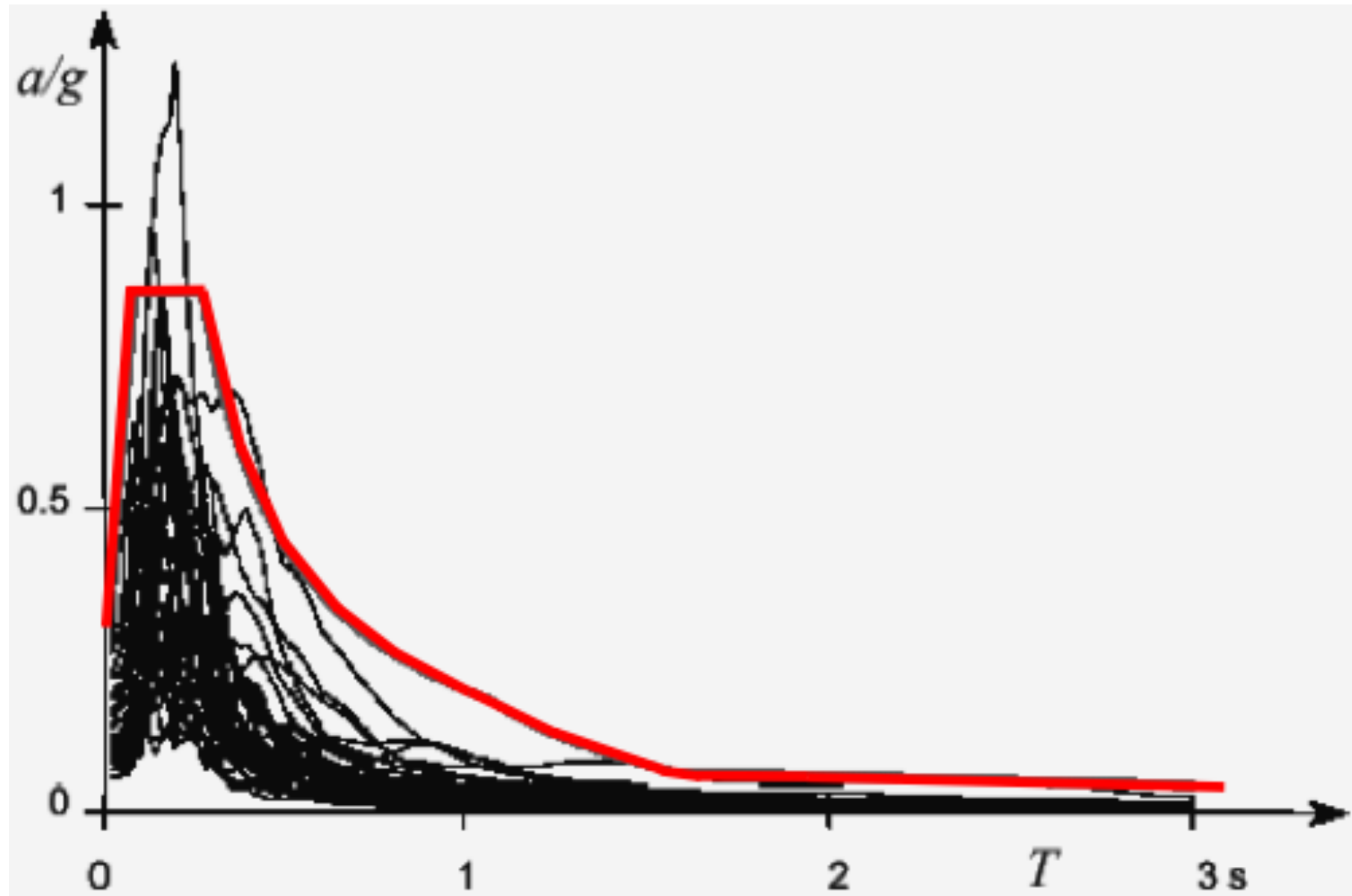


Factor Influencing Response Spectra

The response spectral values depends upon the following parameters:

- I) Energy release mechanism
- II) Richter magnitude
- III) Focal depth
- IV) Epicentral distance
- V) Soil condition
- VI) Damping in the system
- VII) Time period of the system

The elastic response spectrum: towards a tool for design



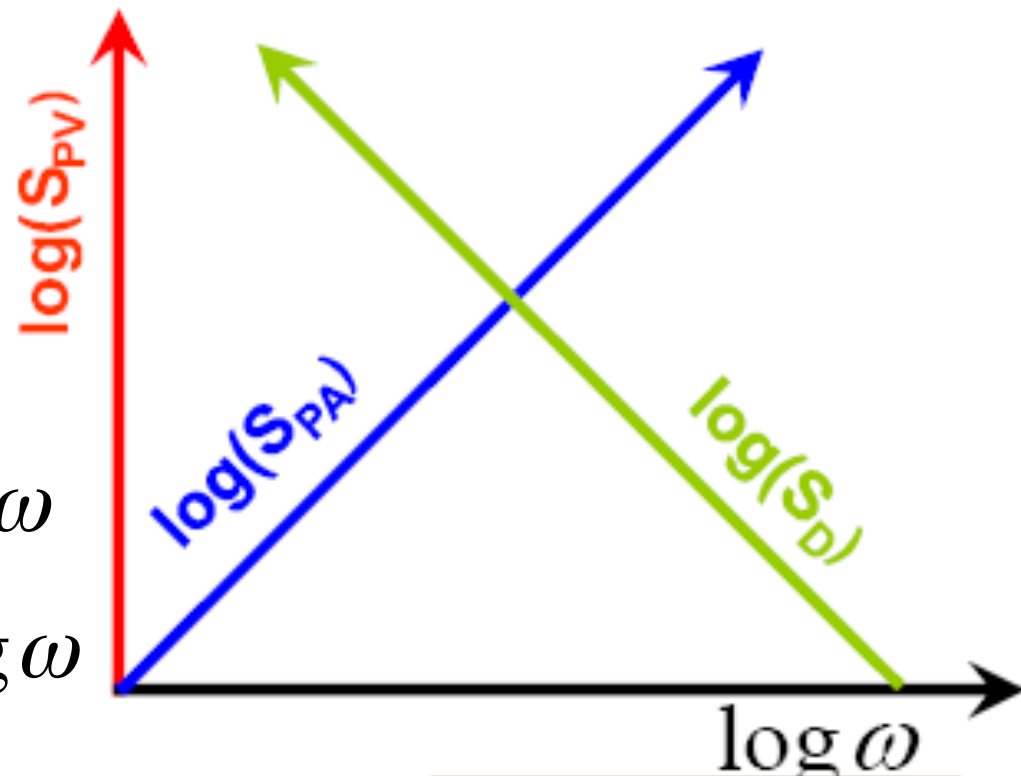
Any one of these spectra can be obtained from one of the other two and each one of the three spectra contains the same information, no more no less. The three spectra are simply different ways of presenting the same information on structural response. A combined plot on logarithmic scale is shown:

$$S_{pv} = \omega S_d$$

$$S_{pv} = \frac{1}{\omega} S_{pa}$$

$$\log S_{pv} = \log S_d + \log \omega$$

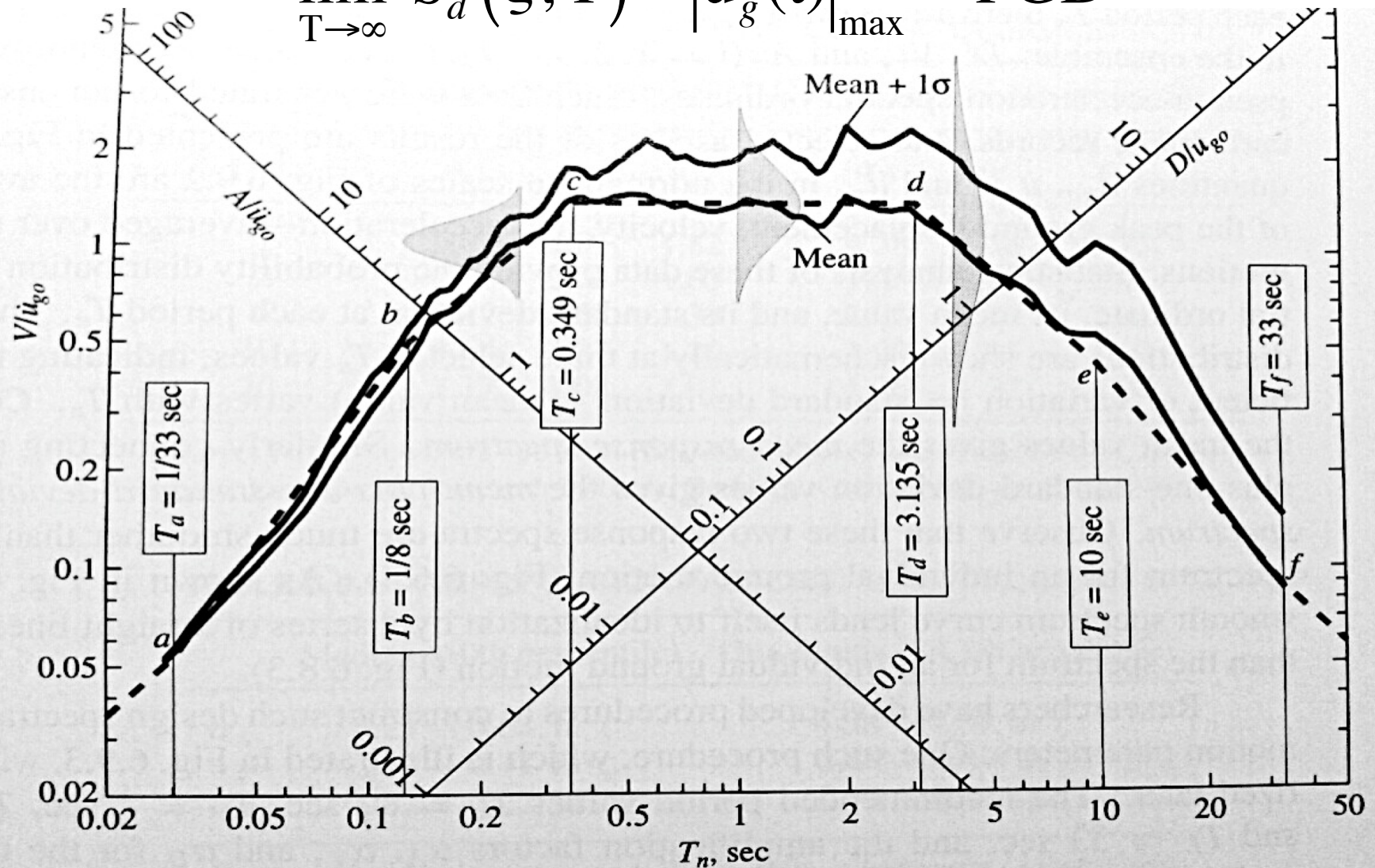
$$\log S_{pv} = \log S_{pa} - \log \omega$$



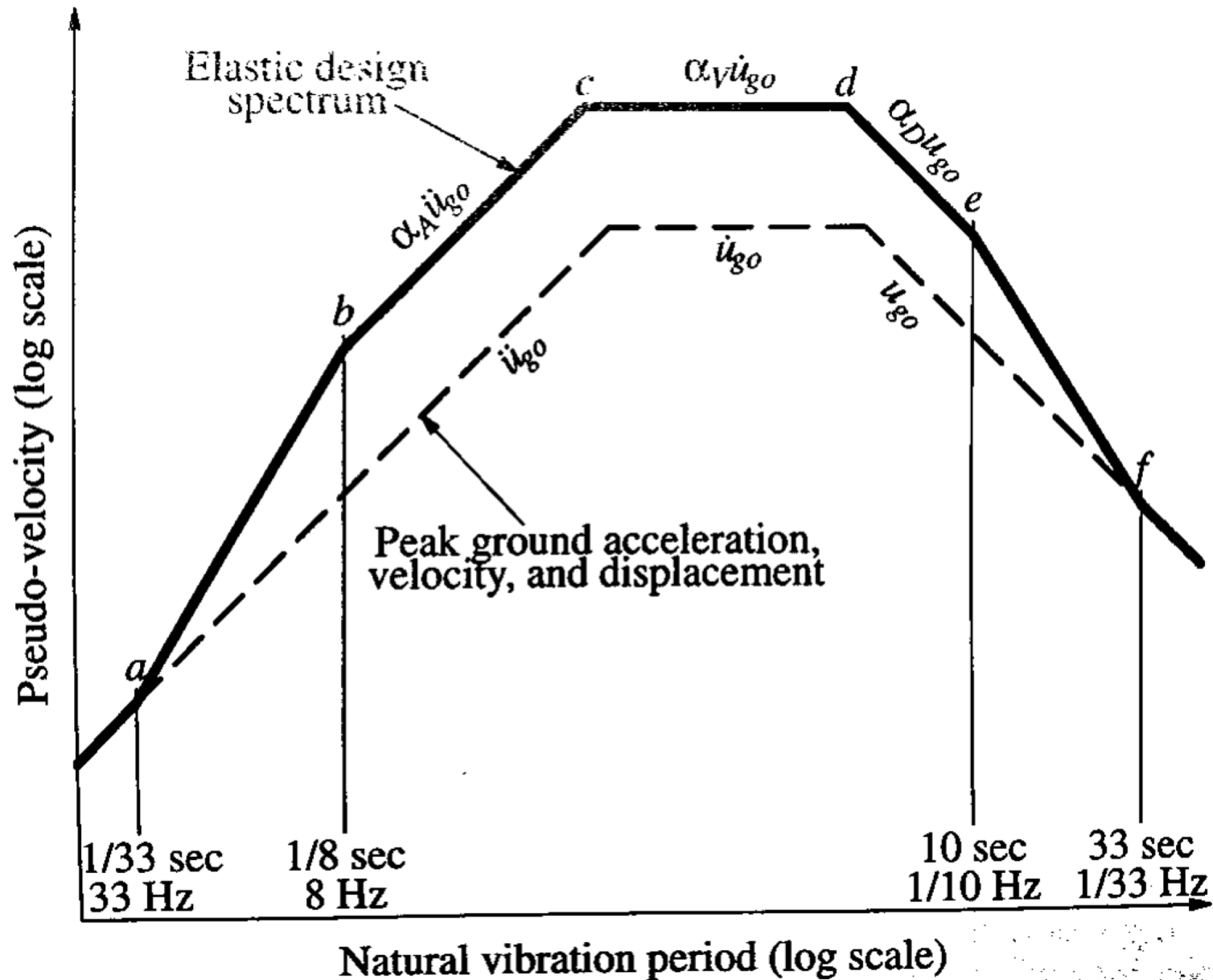
The elastic response spectrum in the logarithmic plane

$$\lim_{T \rightarrow 0} S_{pa}(\xi, T) = |\ddot{u}_g(t)|_{\max} = \text{PGA}$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} S_d(\xi, T) = |u_g(t)|_{\max} = \text{PGD}$$



The elastic design response spectrum



Spectral regions in the logarithmic plane

Nella piano tetralogarithmico si individuano 7 REGIONI SPETTRALI

T_A : separa zona 1 da zona 2

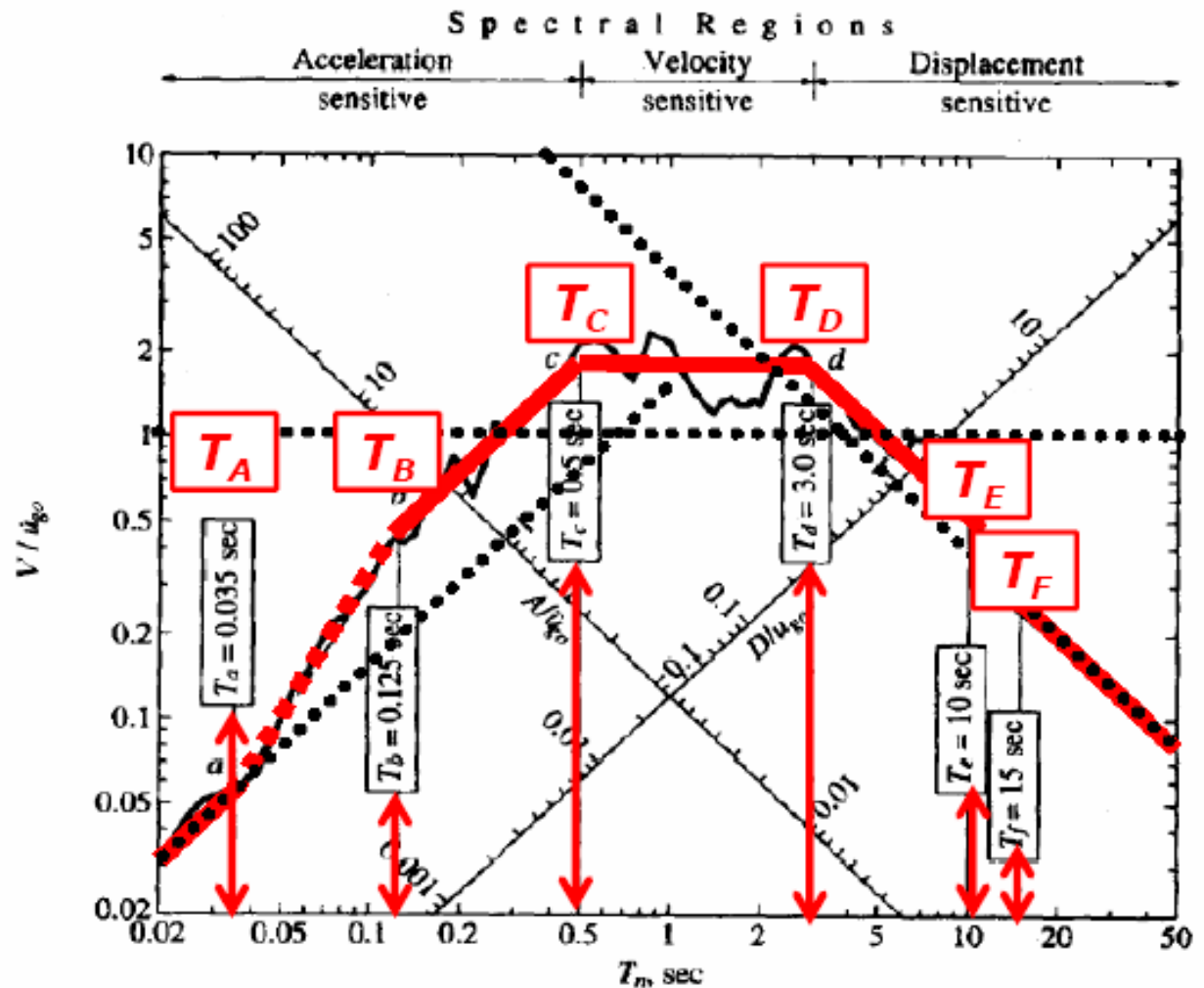
T_B : separa zona 2 da zona 3

T_C : separa zona 3 da zona 4

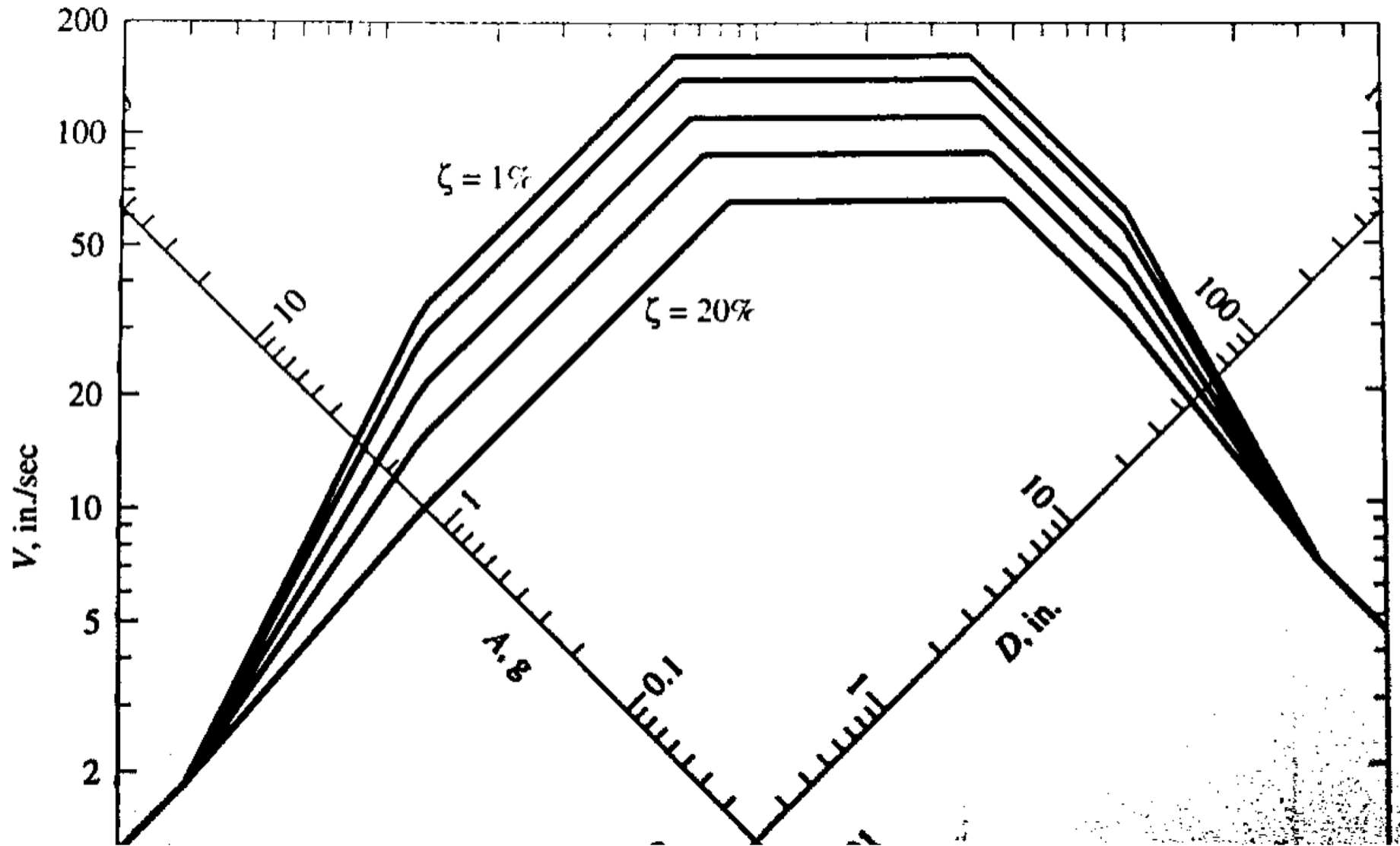
T_D : separa zona 4 da zona 5

T_E : separa zona 5 da zona 6

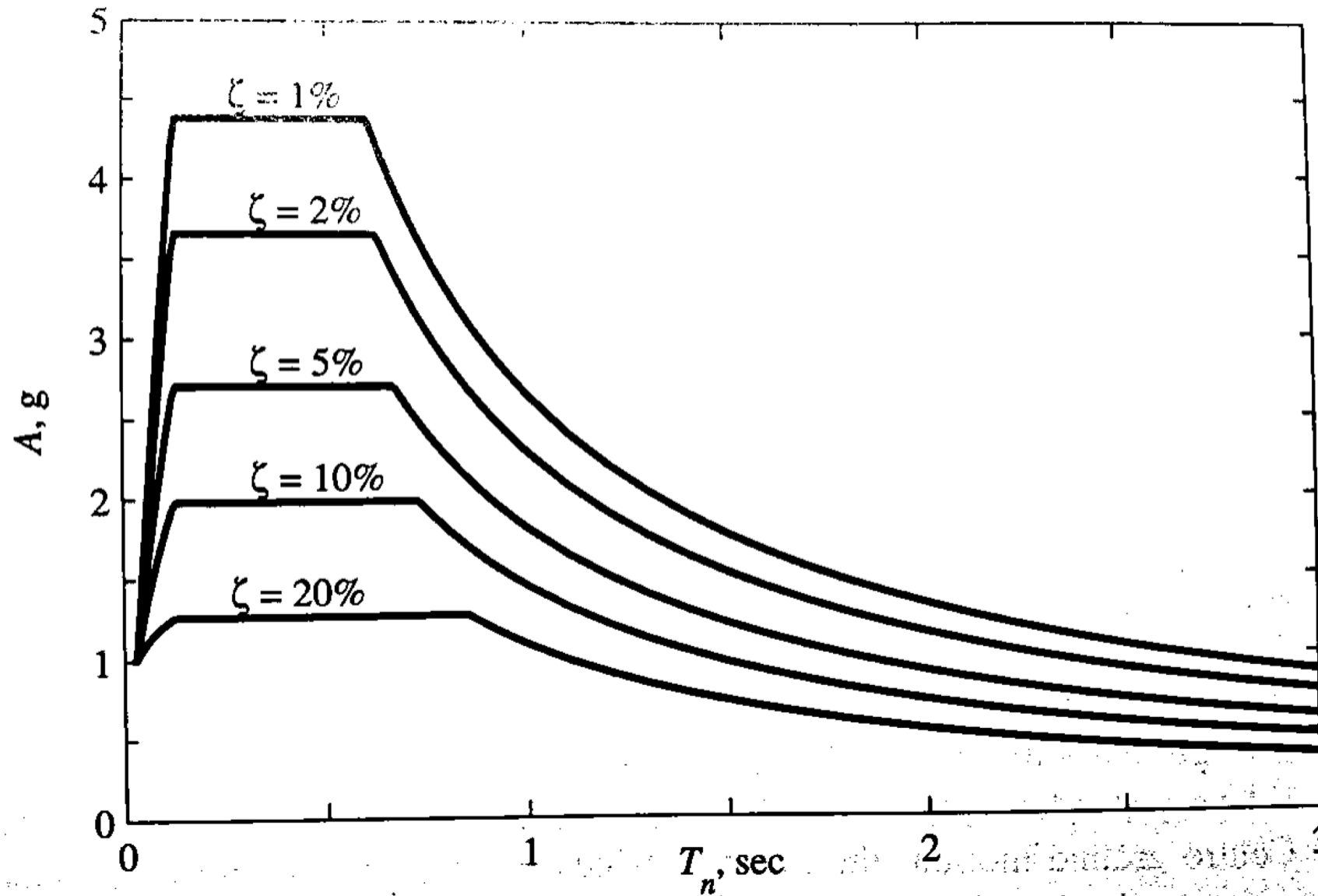
T_F : separa zona 6 da zona 7



The effect of damping on the elastic spectrum



The effect of damping on the elastic spectrum



3.2 AZIONE SISMICA

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

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria **A** quale definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{V_R} , come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento V_R , come definito nel § 2.4. In alternativa è ammesso l’uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla *pericolosità sismica* del sito.

Ai fini della presente normativa le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g accelerazione orizzontale massima al sito;

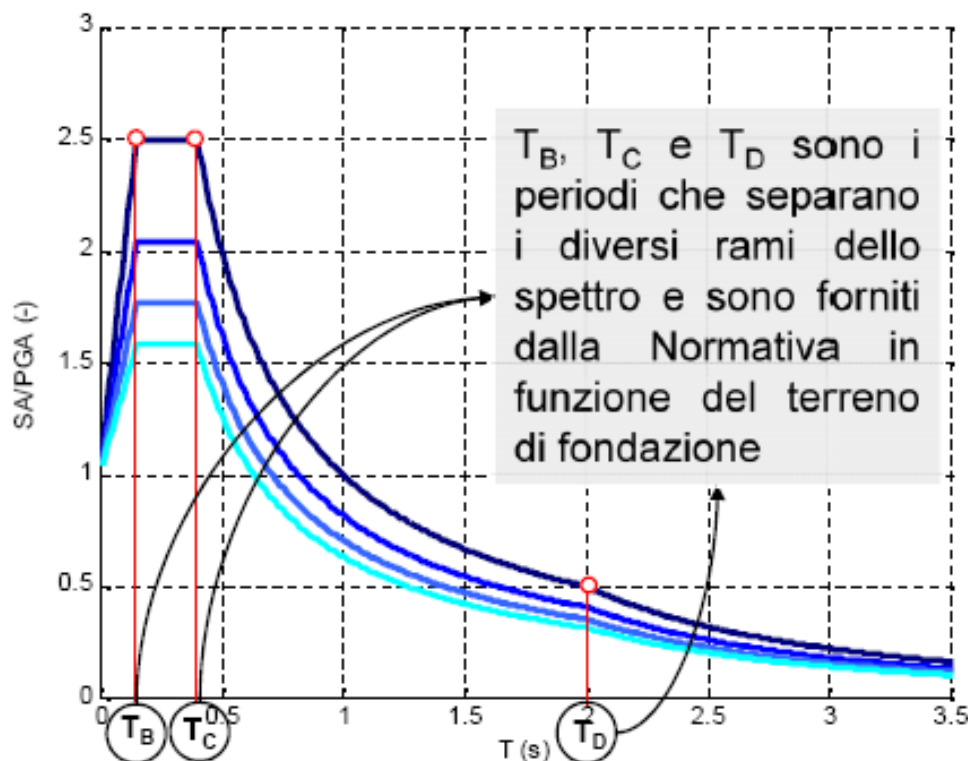
F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.

T_C^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

In allegato alla presente norma, per tutti i siti considerati, sono forniti i valori di a_g , F_0 e T_C^* necessari per la determinazione delle azioni sismiche.

3.2.3.2 Spettro di risposta elastico in accelerazione

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione è espresso da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicata per il valore della accelerazione orizzontale massima a_g su sito di riferimento rigido orizzontale. Sia la forma spettrale che il valore di a_g variano al variare della probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} (v. § 2.4 e § 3.2.1).



$$0 \leq T < T_B$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \frac{T_C}{T}$$

$$T_D \leq T$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2}$$

S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione seguente

$$S = S_S \cdot S_T , \quad (3.2.5)$$

essendo S_S il coefficiente di amplificazione stratigrafica (vedi Tab. 3.2.V) e S_T il coefficiente di amplificazione topografica (vedi Tab. 3.2.VI);

η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%, mediante la relazione

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 , \quad (3.2.6)$$

dove ξ (espresso in percentuale) è valutato sulla base di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione;

F_0 è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore minimo pari a 2,2;

T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, dato da

$$T_C = C_C \cdot T_C^* , \quad (3.2.7)$$

dove T_C^* è definito al § 3.2 e C_C è un coefficiente funzione della categoria di sottosuolo (vedi Tab. 3.2.V);

T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante,

$$T_B = T_C / 3 , \quad (3.2.8)$$

T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi mediante la relazione:

$$T_D = 4,0 \cdot \frac{a_g}{g} + 1,6 . \quad (3.2.9)$$

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Deposit</i> di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Deposit</i> di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Tabella 3.2.IV – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tabella 3.2.V – Espressioni di S_S e di C_C

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_{sg}}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_{sg}}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_{sg}}{g} \leq 1,80 \cdot$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_{sg}}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Tabella 3.2.VI – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

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

Spettri di risposta ver. 1.0.3

Il documento Excel SPETTRI-NTC fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale.

La definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in 3 fasi, ciascuna delle quali prevede la scelta dei valori di alcuni parametri da parte dell'utente:

FASE 1. Individuazione della pericolosità del sito (sulla base dei risultati del progetto S1 - INGV);

FASE 2. Scelta della strategia di progettazione;

FASE 3. Determinazione dell'azione di progetto.

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

Programma ottimizzato per una visualizzazione schermo 1024 x 768

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

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

Se non si sono convertite le coordinate di Google da WGS84 a ED50 (datum INGV) per ridurre in parte l'errore si sceglie il metodo della superficie rigata e non la media pesata (da utilizzare in caso di conversione)

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

Ricerca per comune

LONGITUDINE	LATITUDINE
<input type="text" value="11,12610"/>	<input type="text" value="43,64600"/>

REGIONE	PROVINCIA	COMUNE
<input type="text" value="Toscana"/>	<input type="text" value="Firenze"/>	<input type="text" value="Montespertoli"/>

Elaborazioni grafiche

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche


Tabella parametri

Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

Interpolazione



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

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

Nodi del reticolo intorno al sito



km 7,5

7,5 km

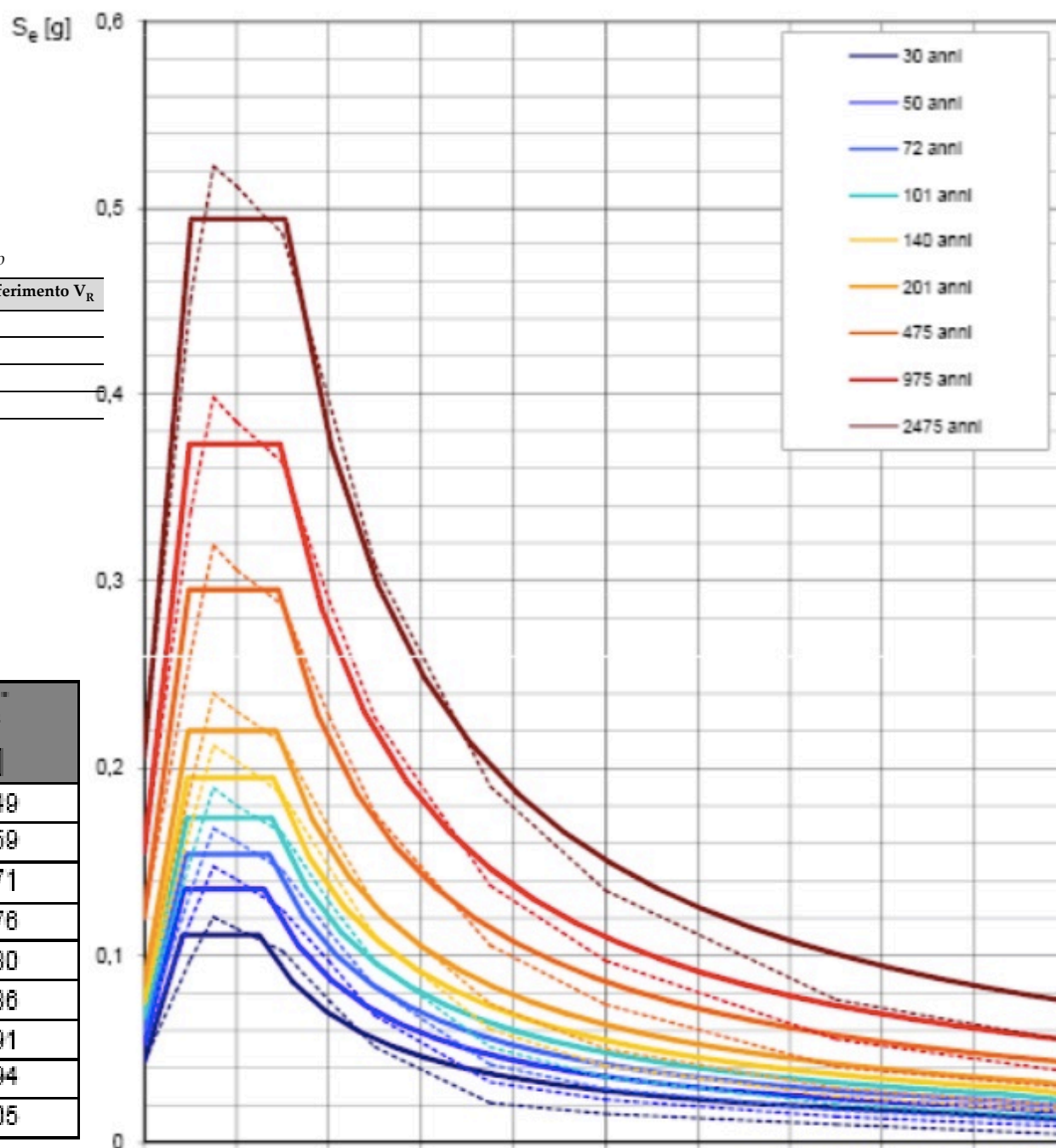
7,5

7,5

Tab. 3.2.I – Probabilità di superamento P_{V_R} in funzione dello stato limite considerato

Stati Limite	P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c^* [s]
30	0,043	2,576	0,249
50	0,052	2,594	0,259
72	0,059	2,619	0,271
101	0,067	2,608	0,276
140	0,074	2,614	0,280
201	0,085	2,602	0,286
475	0,120	2,457	0,291
975	0,155	2,411	0,294
2475	0,206	2,402	0,305



FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (In anni) - V_M Info

Coefficiente d'uso della costruzione - c_U Info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (In anni) - V_R Info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (In anni) - T_R Info

Stati limite di esercizio - SLE	SLO - $P_{VR} = 81\%$	<input type="text" value="45"/>
	SLD - $P_{VR} = 63\%$	<input type="text" value="75"/>
Stati limite ultimi - SLU	SLV - $P_{VR} = 10\%$	<input type="text" value="712"/>
	SLC - $P_{VR} = 5\%$	<input type="text" value="1462"/>

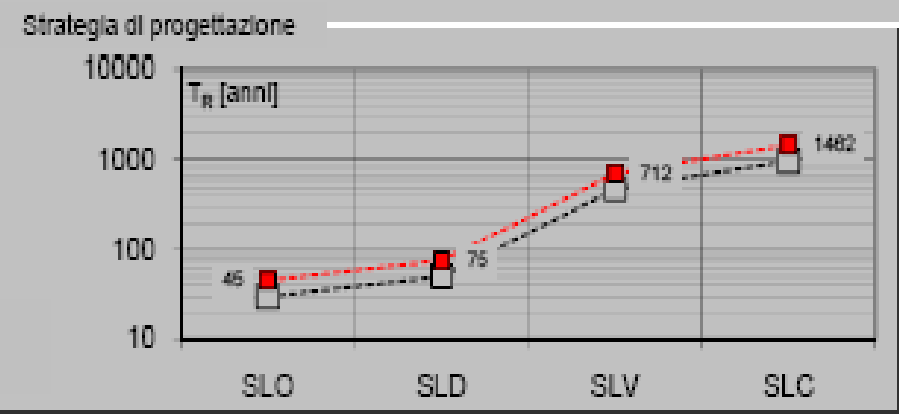
Classe
d'uso
III
 $C_u = 1,5$

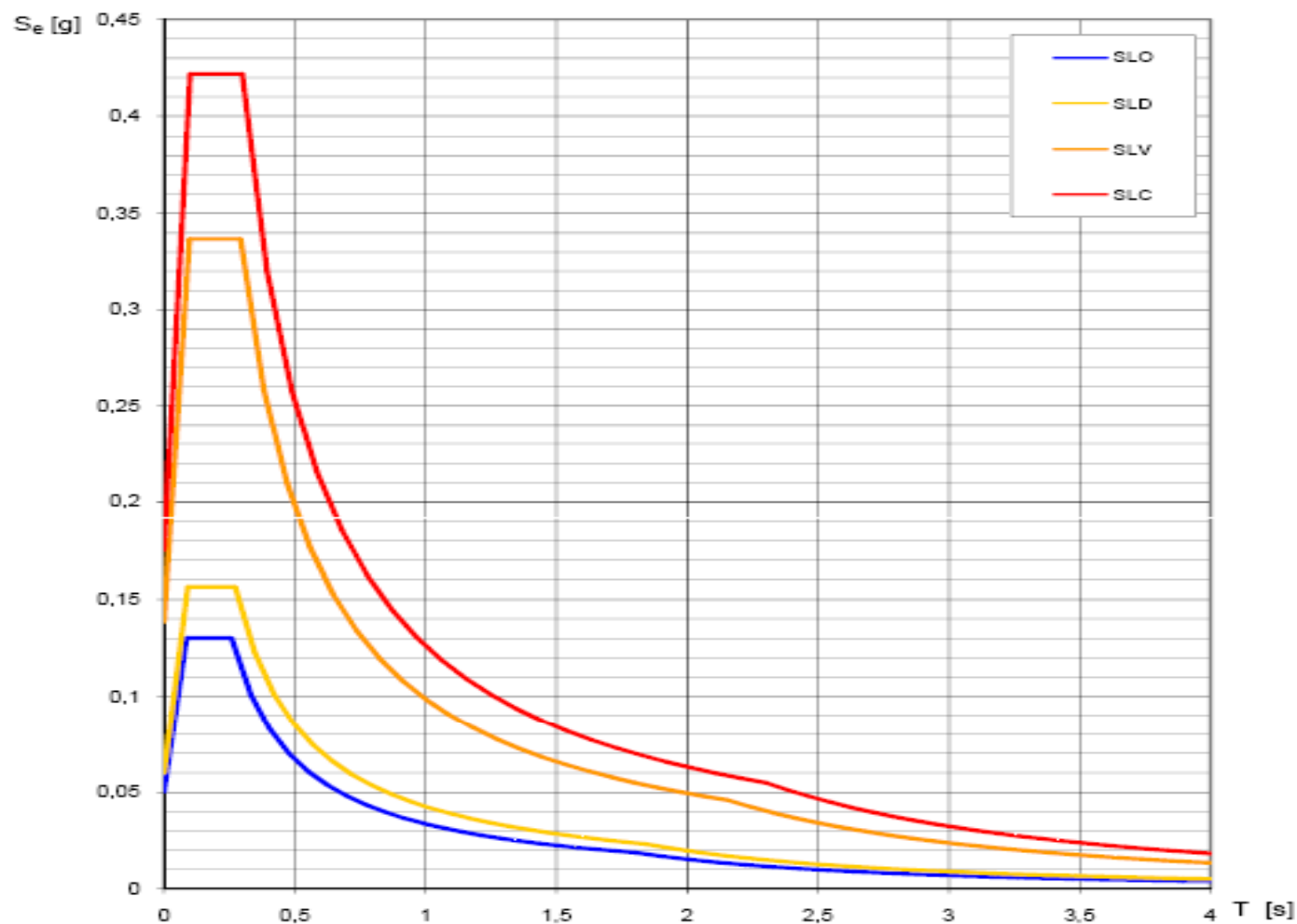
- Elaborazioni
- Grafici parametri azione
 - Grafici spettri di risposta
 - Tabella parametri azione

LEGENDA GRAFICO

---□--- Strategia per costruzioni ordinarie

---■--- Strategia scelta





Valori dei parametri a_g , F_o , T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno SL

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	45	0,050	2,590	0,257
SLD	75	0,080	2,618	0,271
SLV	712	0,139	2,431	0,293
SLC	1462	0,175	2,407	0,299