

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE**

**DISTART**

Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti,  
delle Acque, del Rilevamento, del Territorio

**TESI DI LAUREA**

in

**PROGETTO IN ZONA SISMICA**

**SPETTRI DI RISPOSTA PER LA PROGETTAZIONE  
SISMICA DELLE STRUTTURE, SECONDO L'APPROCCIO  
AGLI SPOSTAMENTI**

**CANDIDATO**  
**Righi Marco**

**RELATORE:**  
Prof. Ing. **Claudio Ceccoli**

**CORRELATORI:**  
Prof. Ing. **Tomaso Trombetti**  
Dr. Ing. **Stefano Silvestri**

Anno Accademico 2006/07

Sessione II

# INDICE

<b>1 INTRODUZIONE</b>	
1.1 Background.....	3
1.2 Obiettivo.....	3
1.3 Considerazioni iniziali.....	4
1.4 Organizzazione del testo.....	7
<b>2 LA PROGETTAZIONE SISMICA BASATA SULL'APPROCCIO AGLI SPOSTAMENTI</b>	
2.1 Introduzione.....	8
2.2 Displacement Based Design.....	9
2.3 Lo spettro di risposta utilizzato nel DBD.....	10
2.3 Spettro di risposta alternativo.....	12
<b>3 PARAMETRI SISMICI</b>	
3.1 Introduzione.....	14
3.2 Creazione di un database.....	14
3.3 I parametri sismici e le loro correlazioni.....	15
3.3.1 I parametri sismici.....	16
3.3.2 Le correlazioni tra i parametri.....	17
3.3.3 Considerazioni finali.....	24
3.4 I parametri nella progettazione.....	25
3.4.1 Analisi di Hazard.....	25
3.4.2 Leggi di attenuazione.....	26
3.4.3 Considerazioni finali.....	27
<b>4 GLI SPETTRI DI RISPOSTA DEGLI SPOSTAMENTI</b>	
4.1 Introduzione.....	28
4.2 Il 'tripartito'.....	28
4.2.1 Interpretazione.....	30
4.2.2 Spettro degli spostamenti dal 'tripartito'.....	33
4.2.3 Spettro delle velocità dal 'tripartito'.....	35
4.2.4 Spettro delle accelerazioni dal 'tripartito'.....	37

4.3	Una metodologia alternativa di valutazione degli 'α': regressioni lineari robuste.....	39
4.4	Elaborazioni numeriche.....	44
4.4.1	Valutazione di $\varphi_D$ .....	44
4.4.2	Valutazione di $\varphi_V$ .....	45
4.4.3	Valutazione di $\varphi_A$ .....	47
4.4.4	Valutazione di $T_d$ .....	48
4.4.5	Valutazione di $T_c$ .....	50
4.4.6	Valutazione di $S_{d,max}$ .....	52
4.4.7	Fattori di amplificazione.....	53
4.5	Lo spettro degli spostamenti.....	58
4.5.1	$\varphi_D$ .....	59
4.5.2	$T_c$ .....	61
4.5.3	$T_d$ .....	61
4.5.4	$S_{d,max}$ .....	62
4.5.5	Costruzione dello spettro.....	62
4.5.6	Applicazioni numeriche.....	63
4.5.7	Commento finale.....	66
<b>5</b>	<b>CONFRONTO TRA GLI SPETTRI DI RISPOSTA</b>	
5.1	Introduzione.....	67
5.2	Spettro degli spostamenti reale.....	67
5.2.1	Gruppo di sismi.....	67
5.2.2	Spettro degli spostamenti medio.....	69
5.3	Lo spettro degli spostamenti della normativa italiana.....	70
5.4	Spettro degli spostamenti proposto.....	72
5.5	Confronto tra gli spettri degli spostamenti.....	73
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	
6.1	Analisi condotte.....	76
6.2	Risultati ottenuti.....	76
6.3	Possibili applicazioni e problematiche.....	80
	<b>APPENDICE.....</b>	<b>82</b>

# CAPITOLO 1

## INTRODUZIONE

### 1.1 BACKGROUND

Seguendo un approccio progettuale sismico basato sugli spostamenti (*'Displacement-Based Seismic Design approach'*), come ampiamente descritto da *Calvi e Priestley* [8] [9] [10], l'input sismico è rappresentato dallo spettro di risposta degli spostamenti, già utilizzato per questa rappresentazione da *Newmark* e *Veletsos* [34] nel 1965, ma anche negli ultimi periodi da *Malhotra* [26] nel 2001, da *Lam, Wilson e Chandler* [25] nel 2001, da *Mavroedis, Dong e Papageorgiou* [22] nel 2004, *Akkar e Ozen* [2] nel 2005, da *Tothong* nel 2007.

Attualmente questi spettri sono comunemente ricavati dai rispettivi spettri delle pseudo-accelerazioni, come affermato da *Calvi e Priestley*, largamente utilizzati nella progettazione sismica basata sulle forze (*'Force-Based Seismic Design approach'*), e di conseguenza sono affetti dalle incertezze che riguardano la schematizzazione degli spettri delle pseudo-accelerazioni. Quindi gli spettri degli spostamenti non vengono schematizzati direttamente sulla base di questi, ma vengono ricavati dalla schematizzazione delle pseudo-accelerazioni, senza avere così un controllo diretto sulla bontà della schematizzazione che ne deriva.

### 1.2 OBIETTIVO

In questo lavoro si vogliono rivisitare totalmente le relazioni tra i parametri sismici e lo spettro di risposta degli spostamenti, in modo da fornire una schematizzazione aggiornata dello spettro, che tenga coscientemente conto dei più rappresentativi parametri sismici.

In particolare si vuole giungere alla schematizzazione semplice di uno spettro di risposta degli spostamenti per un sistema elastico lineare *SDOF*, con

smorzamento del 5%, su un terreno di tipo ‘B’ (anche utilizzabile nella progettazione sismica delle strutture secondo l’approccio agli spostamenti: ‘*Displacement-Based Seismic Design approach*’).

### 1.3 CONSIDERAZIONI INIZIALI

Nella schematizzazione di tale spettro si parte dall’idea di non considerare *PGA* come unico parametro progettuale, come invece avviene nella progettazione attuale, ma di indagare l’influenza dei parametri *PGV* e *PGD* sulla forma spettrale.

L’intuizione di partenza deriva dallo studio teorico dello spettro tripartito riportato in figura 1.1 [12].

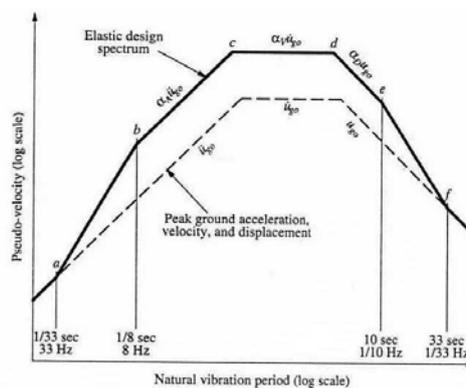


Figura 1.1: spettro tripartito [12].

Il tripartito è la rappresentazione contemporanea degli spettri degli spostamenti, delle pseudo-velocità e delle pseudo-accelerazioni. Tale spettro è caratterizzato da 12 parametri: *PGA*, *PGV*, *PGD*,  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$ ,  $\alpha_D$ ,  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$ ,  $T_d$ ,  $T_e$  e  $T_f$ . Per quanto riguarda i periodi, i valori  $T_a$  e  $T_b$  sono piccoli e quindi non influenzano significativamente la forma, i valori  $T_c$  e  $T_d$  possono essere ricavati da altre grandezze, i valori  $T_e$  e  $T_f$  sono molto grandi e non entrano in gioco nella progettazione strutturale, e infine i fattori di amplificazione  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$ ,  $\alpha_D$  assumono valori proposti in letteratura, come meglio indicato nel capitolo 4.

Per questi motivi la forma dello spettro tripartito, e quindi di tutti gli spettri, dipende dai parametri  $PGA$ ,  $PGV$  e  $PGD$ ; al variare di uno solo di questi varia in modo significativo la forma dello spettro, e cioè la risposta strutturale.

In figura 1.2 è mostrata graficamente, a titolo di esempio, l'influenza dei singoli parametri sulla forma del tripartito: viene imposta una variazione di  $PGA$  (a),  $PGV$  (b) o  $PGD$  (c), e conseguentemente viene ricavato il nuovo spettro, il cui tratto modificato è mostrato con una linea blu.

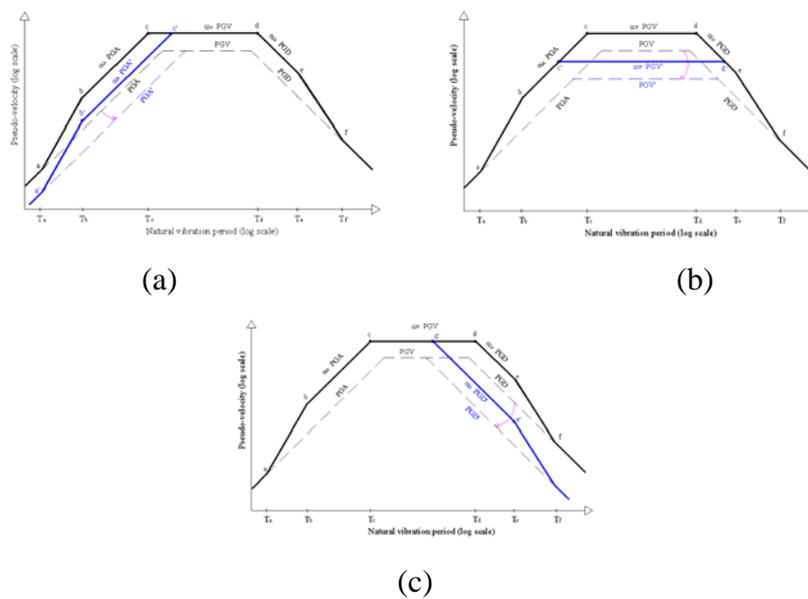


Figura 1.2: influenza sulla forma del tripartito dei parametri  $PGA$  (a),  $PGV$  (b) o  $PGD$  (c).

Il fatto che  $PGA$  non sia l'unico parametro sismico che influenzi la schematizzazione della risposta strutturale è stato intuito inizialmente anche da considerazioni pratiche, oltre che teoriche, in particolare dallo studio di sismi reali.

Considerando 842 sismi [6] [7] registrati su terreno di tipo 'B', è stato analizzato l'andamento dei parametri  $PGV$  e  $PGD$ , costruendo i relativi diagrammi delle frequenze relative, riportati rispettivamente in figura 1.3 (a) e (b). Da tali diagrammi si nota che tali parametri possono assumere una gran varietà di valori, e che quindi il loro andamento non è rappresentabile mediante  $PGA$ .

Tale concetto diventa maggiormente esplicito analizzando i diagrammi delle frequenze relative dei parametri  $T_{VA}$  ( $= PGV/PGA$ ) e  $T_{DV}$  ( $= PGD/PGV$ ), illustrati in figura 1.3 (c) e (d), in cui è ben evidente la dispersione di tali grandezze.

Infatti considerando il rapporto:

$$T_{VA} = \frac{PGV}{PGA} \quad (1.1)$$

Si ricava la seguente relazione:

$$PGV = T_{VA} \cdot PGA \quad (1.2)$$

Da cui si deduce che fissando un valore di  $PGA$  non è possibile individuare un valore preciso di  $PGV$  a causa della dispersione dei valori di  $T_{VA}$ , che nella formula (1.2) rappresenta il coefficiente di relazione tra  $PGA$  e  $PGV$ .

Analogamente, considerando il rapporto:

$$T_{DV} = \frac{PGD}{PGV} \quad (1.3)$$

Si deduce che fissando un valore di  $PGV$  non è possibile individuare un valore preciso di  $PGD$  a causa della dispersione dei valori di  $T_{DV}$ .

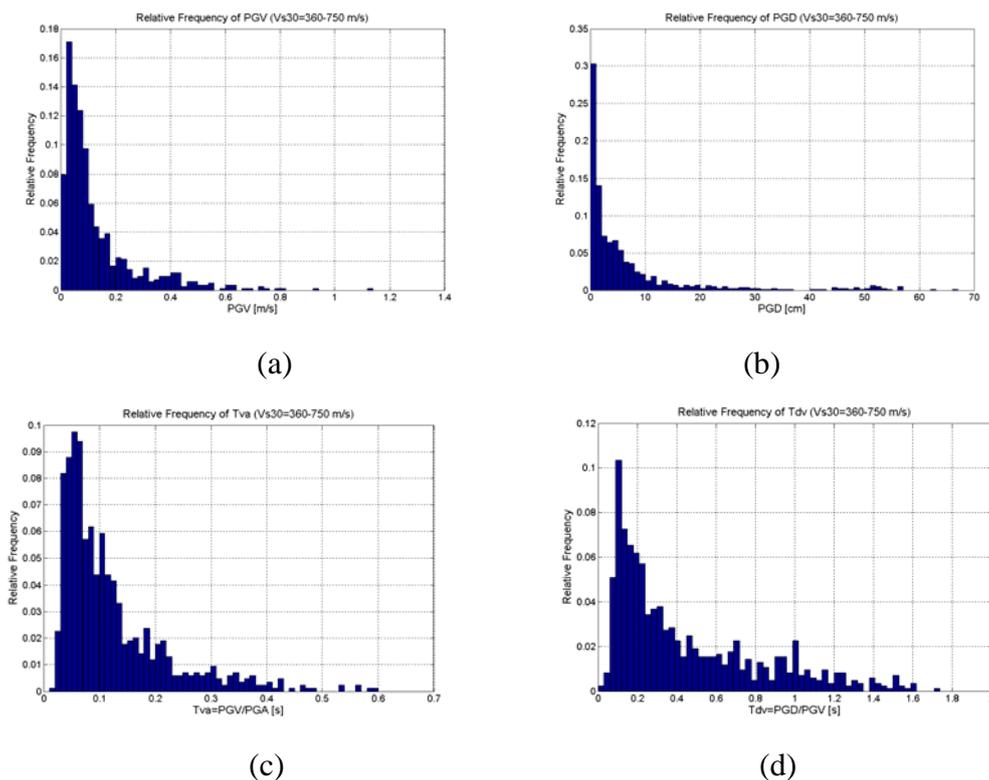


Figura 1.3: diagrammi delle frequenze relative per  $PGV$  (a),  $PGD$  (b),  $T_{VA}$  (c) e  $T_{DV}$  (d).

Quindi da queste considerazioni si deduce che il parametro  $PGA$  non è sufficiente in fase di progettazione, poiché non può cogliere l'andamento dei parametri  $PGV$

e *PGD*, i quali influenzano la forma del tripartito e quindi dello spettro degli spostamenti.

Tali considerazioni saranno analizzate sperimentalmente all'interno di questo lavoro.

## 1.4 ORGANIZZAZIONE DEL TESTO

Il presente lavoro è composto da sei capitoli, e questa introduzione ne rappresenta il primo.

Il capitolo due introduce il concetto di progettazione sismica secondo l'approccio agli spostamenti (*'Displacement Based Design'*), descrivendo il tipo di spettro utilizzato e le incertezze in esso presenti, e proponendo un metodo più diretto per ricavarlo.

Nel capitolo tre vengono effettuate analisi di correlazione tra i parametri sismici, per ottenere informazioni sulla loro necessità nella caratterizzazione dell'input sismico.

Nel capitolo quattro viene proposta la schematizzazione dello spettro di risposta degli spostamenti a partire dai parametri sismici *PGA*, *PGV* e *PGD*. Vengono cioè proposte delle formule, ricavate in modo sperimentale, che permettono di costruire tale spettro. Partendo da considerazioni teoriche sul tripartito, si arriva quindi a spiegare le operazioni svolte sui vari spettri, necessarie ad ottenere le formule proposte.

Nel capitolo cinque viene eseguito un confronto tra uno spettro degli spostamenti ricavato da sismi reali, quello ricavato con le formule proposte nel capitolo quattro, e quello proposto dalla normativa italiana.

Il capitolo sei rappresenta le conclusioni del lavoro, in cui vengono riportate le analisi svolte, riassunti i risultati ottenuti e individuate le loro possibili applicazioni nella pratica progettuale.

## CAPITOLO 2

# LA PROGETTAZIONE SISMICA BASATA SULL'APPROCCIO AGLI SPOSTAMENTI

### 2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo viene introdotto il concetto di progettazione sismica delle strutture secondo l'approccio agli spostamenti, ovvero di *Displacement Based Design*; si analizzano le caratteristiche di tale tipo di progettazione, evidenziandone alcuni difetti, e infine si propone un modo alternativo per ricavare gli spettri di risposta degli spostamenti, che sono alla base di questo tipo di progettazione.

La progettazione di tipo statico è un tipo di progettazione basata sulle forze, infatti si progetta in modo da non superare la forza di snervamento  $F_y$ , quindi non sono consentite plasticizzazioni, cioè deve essere  $\delta < \delta_y$ , linea verde in figura 2.1.

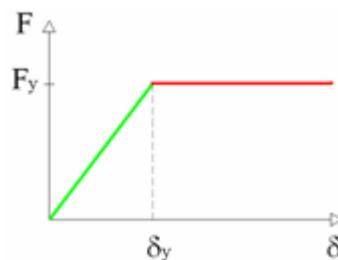


Figura 2.1: diagramma forza – spostamento per progettazione statica.

Il coefficiente di sicurezza in tale tipo di progettazione è dato dalla formula 2.1:

$$\text{coeff. sicurezza} = \frac{F_y}{F_{\text{progetto}}} \quad (2.1)$$

Al contrario, in una progettazione di tipo sismico sono consentite plasticizzazioni, per cui può essere  $\delta > \delta_y$ , ma non può essere superata la capacità ( $\delta_u$ ) della struttura, come mostrato in figura 2.2.

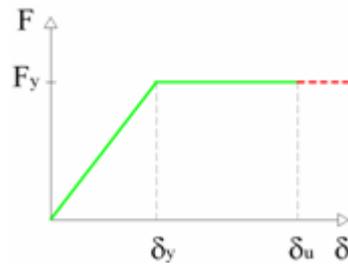


Figura 2.2: diagramma forza – spostamento per progettazione sismica.

Inizialmente è stata seguita una progettazione sismica basata sulle forze (*FBD: Force-Based Design*), perché anche la progettazione di tipo statico è basata sulle forze. In questo caso il coefficiente di sicurezza (2.2) non è adatto, poiché per  $\delta > \delta_y$  tale coefficiente assume valore unitario, e non è quindi in grado di cogliere la condizione di sicurezza della struttura.

$$\text{coeff. sicurezza} = \frac{F_y}{F_{\text{progetto}}} \quad (2.2)$$

E' stato quindi introdotto il concetto di progettazione sismica basata sugli spostamenti (*DBD*), in cui il coefficiente di sicurezza (2.3) è in grado di cogliere la condizione di sicurezza in cui si trova la struttura soggetta ad un certo input sismico.

$$\text{coeff. sicurezza} = \frac{\delta_u}{\delta_{\text{progetto}}} \quad (2.3)$$

## 2.2 DISPLACEMENT BASED DESIGN

Il *Displacement Based Design*, o più brevemente *DBD*, chiamato anche *Direct Displacement Based Design*, *DDBD*, è un tipo di progettazione basato sugli spostamenti. E' quindi un metodo progettuale alternativo alla progettazione convenzionale basata sulle forze (*'force-based design'*) [8].

La differenza fondamentale dal metodo convenzionale consiste nel fatto che questo caratterizza le strutture in modo che vengano schematizzate come un sistema lineare ad un grado di libertà, *SDOF*, in modo da cogliere le prestazioni al raggiungimento dello spostamento massimo [8]. La struttura è quindi schematizzata come in figura 2.3.

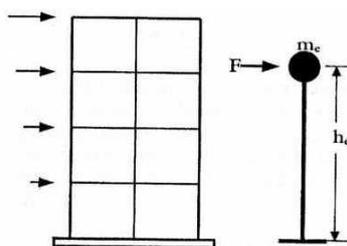


Figura 2.3: schematizzazione della struttura [9].

L'approccio progettuale mira alla progettazione di una struttura che possa raggiungere un determinato stato limite prestazionale, sotto una data intensità sismica, cioè si progetta mediante un rischio strutturale, compatibile con il rischio sismico presente nella maggior parte dei codici progettuali. La procedura di progettazione determina la resistenza richiesta, a posizioni indicate della cerniera plastica, per realizzare gli obiettivi di progetto in termini di valori definiti di spostamenti [8].

I livelli prestazionali sono i seguenti [9]:

1. *Livello 1. Totalmente operativa*: la funzione della struttura continua con danni trascurabili;
2. *Livello 2. Operativa*: la funzione della struttura continua con danno minore ed interruzione secondaria nei servizi non indispensabili;
3. *Livello 3. 'Life Safe'*: non c'è pericolo di vita, i danni sono da moderati a estesi;
4. *Livello 4. Vicino al collasso*: la vita è a rischio, i danni sono ingenti ma il collasso strutturale è evitato.

### 2.3 LO SPETTRO DI RISPOSTA UTILIZZATO NEL DBD

Nella progettazione sismica delle strutture secondo l'approccio agli spostamenti, attualmente viene utilizzato lo spettro di risposta degli spostamenti ricavato dallo spettro di risposta delle pseudo-accelerazioni proposto dall'*EC8* (paragrafo 3.2.2.2) [14], riportato qui di seguito dalle formule (2.4), (2.5), (2.6) e (2.7):

$$0 \leq T \leq T_b \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_b} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad (2.4)$$

$$T_b \leq T \leq T_c \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad (2.5)$$

$$T_c \leq T \leq T_d \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left( \frac{T_c}{T} \right) \quad (2.6)$$

$$T_d \leq T \leq 4s \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left( \frac{T_c \cdot T_d}{T^2} \right) \quad (2.7)$$

Dove:

$S_e(T)$  è l'accelerazione spettrale;

$T$  è il periodo di vibrazione di un sistema lineare *SDOF*;

$a_g$  è l'accelerazione di picco del terreno (=PGA);

$S$  è un fattore che tiene conto della categoria del suolo di fondazione;

$\eta$  è un fattore che altera lo spettro elastico per smorzamenti viscosi convenzionali  $\xi$  diversi dal 5%;

$T_b$  è il valore inferiore del periodo del tratto spettrale di accelerazione costante;

$T_c$  è il valore superiore del periodo del tratto spettrale di accelerazione costante;

$T_d$  è il valore del periodo in cui inizia il tratto spettrale di spostamento costante.

L'*Eurocodice 8* fornisce i seguenti valori per  $S$ ,  $T_b$ ,  $T_c$  e  $T_d$ , riportati in tabella 2.1, a seconda del tipo di terreno.

Ground type	$S$	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Tabella 2.1 [14]

Lo spettro degli spostamenti  $S_{De}$  viene ricavato direttamente da quello delle pseudo-accelerazioni  $S_e$  mediante la formula (2.8):

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (2.8)$$

Tale spettro viene però modificato: viene imposto l'utilizzo del valore  $T_d=4$  secondi, anziché 2 secondi, di conseguenza viene alzato e spostato verso destra il

punto di massimo spostamento (*'Corner Period'*), perché dalle registrazioni sismiche sono stati osservati picchi degli spostamenti tra 1,5 e 4 secondi, quindi il valore  $T_d=2$  secondi non è considerato conservativo [8].

Lo spettro di risposta degli spostamenti utilizzato ha la forma seguente (figura 2.4):

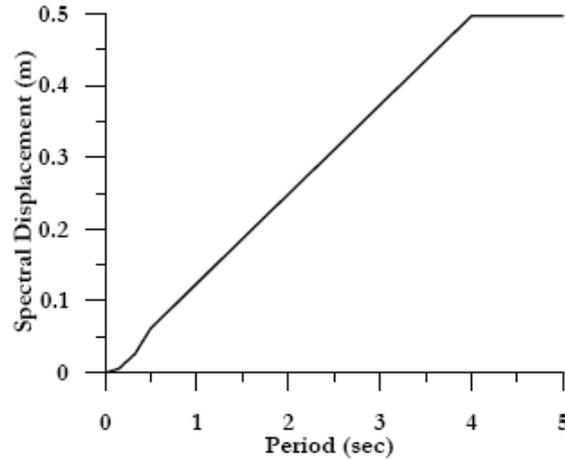


Figura 2.4: spettro di risposta degli spostamenti utilizzato nel *DBD* [10]

## 2.4 SPETTRO DI RISPOSTA ALTERNATIVO

I passaggi per ricavare lo spettro degli spostamenti, usato in fase progettuale nel *DBD*, sono i seguenti:

- calcolo dello spettro degli spostamenti  $S_d$ , per un certo numero di sismi;
- calcolo dello spettro delle pseudo-accelerazioni  $S_A$  mediante la formula  $S_A = \omega^2 \cdot S_d$ , per ogni sisma;
- schematizzazione dello spettro delle pseudo-accelerazioni (fornita dall'*EC8*);
- calcolo dello spettro schematizzato degli spostamenti dalla schematizzazione dello spettro delle pseudo-accelerazioni, mediante la formula  $S_d = S_A / \omega^2$ .

All'interno dello spettro degli spostamenti così ottenuto possono essere presenti varie incertezze. Infatti, oltre all'incertezza della schematizzazione dello spettro delle pseudo-accelerazioni, non si ha il controllo sul fatto che le approssimazioni

fatte in tale schematizzazione siano corrette se riportate (come attualmente avviene nel passaggio a ritroso) sullo spettro degli spostamenti.

Per ridurre le incertezze e gli errori all'interno dello spettro degli spostamenti si può pensare di schematizzare direttamente tale spettro, senza doverlo ricavare a ritroso da quello della pseudo-accelerazioni, cioè di seguire i seguenti passaggi:

- calcolo dello spettro degli spostamenti  $S_d$ , per un certo numero di sismi con determinate caratteristiche;
- schematizzazione dello spettro trovato;

e di utilizzare tale schematizzazione per la progettazione agli spostamenti.

# CAPITOLO 3

## PARAMETRI SISMICI

### 3.1 INTRODUZIONE

Prima di iniziare la costruzione di uno spettro degli spostamenti come indicato nel paragrafo 2.3, è necessario capire se le informazioni fornite dalle normative per la costruzione di tali spettri sono sufficienti alla loro completa caratterizzazione, o se invece sono necessarie altre informazioni.

Lo scopo di questo capitolo è quindi di analizzare i parametri sismici, in modo da capire quali sono quei parametri necessari per descrivere in maniera precisa una registrazione sismica. Per fare questo è necessario partire da registrazioni reali, creando un database, analizzare quelle grandezze che caratterizzano le registrazioni e calcolare le varie correlazioni tra queste.

L'ultima parte del capitolo è dedicata alla considerazione dei parametri che sono attualmente disponibili e che quindi possono essere utilizzati nella progettazione strutturale.

### 3.2 CREAZIONE DI UN DATABASE

Per avere informazioni attendibili sulle relazioni tra parametri sismici è necessario creare un gruppo di sismi, cioè un database, il più ampio possibile.

Si è deciso di considerare esclusivamente sismi registrati su un terreno di tipo 'B', caratterizzato da  $360 < V_{S30} < 750 \text{ m/s}$ , dove  $V_{S30}$  è la velocità media delle onde di taglio per una profondità di 30 m.

Il database, riportato nell'Appendice, è stato creato scaricando le informazioni dal sito del *PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)* [6] [7], che contiene a sua volta un database formato da una gran moltitudine di sismi avvenuti in passato in varie zone del mondo, e in particolare sono state scaricate:

- *PGA*;
- *PGV*;
- *PGD*;
- *d* (distanza epicentrale);
- *M* (Magnitudo);
- *accelerogramma delle componenti orizzontali del sisma*;

per entrambe le componenti orizzontali del sisma.

In seguito sono stati ricavati i valori:

- $T_{VA} = PGV/PGA$ ;
- $T_{DV} = PGD/PGV$ .

### 3.3 I PARAMETRI E LE LORO CORRELAZIONI

In questo paragrafo si vogliono mostrare le relazioni tra i parametri sismici *PGA*, *PGV* e *PGD*, per dimostrare che tra questi non esiste una correlazione diretta, cioè che un solo parametro non è sufficiente per caratterizzare una registrazione, e di conseguenza per cogliere il comportamento esatto di una struttura per effetto di una scossa sismica.

Queste tre grandezze non hanno lo stesso grado di precisione, infatti il valore *PGA* è il valore massimo dell'accelerogramma registrato, ed è quindi calcolato in modo diretto; per ricavare *PGV*, deve essere derivato rispetto al tempo l'accelerogramma registrato, ottenendo così l'andamento delle velocità nel tempo, e quindi *PGV* rappresenta il picco delle velocità trovate; per ricavare *PGD*, deve essere derivato due volte rispetto al tempo l'accelerogramma registrato, ottenendo così l'andamento degli spostamenti nel tempo, e quindi *PGD* rappresenta il picco degli spostamenti trovati. Ma nelle operazioni di derivazione si introducono delle incertezze, che influenzano così la bontà dei risultati ottenuti. Per questo motivo i valori di *PGV*, ma soprattutto di *PGD*, sono meno precisi di quelli di *PGA*, ricavati direttamente dalle registrazioni.

Vengono inoltre ricavati, mediante analisi, altri parametri sismici, e le loro correlazioni con *PGA*, *PGV* e *PGD*, in modo da conoscere in modo più preciso le informazioni contenute in queste ultime grandezze.

### 3.3.1 I PARAMETRI SISMICI

I parametri sismici, oltre a  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $T_{VA}$ ,  $T_{DV}$ ,  $d$  e  $M$ , che caratterizzano una registrazione sismica, sono i seguenti [11]:

1. Durata del sisma :  $T_d$  [s]

La durata di un sisma può avere una forte influenza sul danno strutturale, in quanto aumentando la durata di uno stesso sisma i danni saranno maggiori.

2. Intensità totale del sisma :  $I_o = \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt$  [g<sup>2</sup> s] (3.1)

E' una grandezza che rappresenta il contenuto in frequenza di un sisma.

3. Accelerazione rms :  $a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt}$  [g] (3.2)

Include sia gli effetti dell'ampiezza sia del contenuto in frequenza di una registrazione di un forte movimento di terreno.

4. Intensità di Arias :  $I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt$  [g s] (3.3)

E' un parametro che ha una relazione stretta con  $a_{rms}$ , quindi fa riferimento all'ampiezza e al contenuto in frequenza, in più è correlato con la durata del sisma.

5. Intensità caratteristica :  $I_c = a_{rms}^{1.5} T_d^{0.5}$  [g<sup>1.5</sup> s<sup>0.5</sup>] (3.4)

Questo parametro è correlato direttamente con l'indice di danno strutturale, dovuto alle deformazioni e all'energia isteretica assorbita.

6. Cumulative Absolute Velocity :  $CAV = \int_0^{T_d} |a(t)| dt$  [g s] (3.5)

Rappresenta l'area sottesa dall'accelerogramma, ed è ben correlato con il potenziale danno strutturale.

7. Response Spectrum Intensity (o coefficiente di Housner) :

$$SI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi, T) dT \quad [m] \quad (3.6)$$

Dove  $PSV$  è lo spettro di risposta delle pseudo-velocità (*Pseudo-velocity spectrum*). Questo include gli effetti dell'ampiezza e del contenuto in frequenza di una registrazione.

8. Acceleration Spectrum Intensity:  $ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 0.05, T) dT \quad [g \cdot s] \quad (3.7)$

Dove  $S_a$  è lo spettro di risposta delle pseudo-accelerazioni. Anche questo parametro include gli effetti dell'ampiezza e del contenuto in frequenza.

Questi parametri possono essere ricavati tutti da operazioni svolte sugli accelerogrammi.

### 3.3.2 LE CORRELAZIONI TRA I PARAMETRI

Ricavati tutti i parametri appena illustrati, questi possono essere messi in relazione tra loro, in particolare possono essere ricavati i coefficienti di correlazione, calcolati mediante la formula (3.8) [13]:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (3.8)$$

Dove:

$\rho_{xy}$  è il coefficiente di correlazione tra le grandezze  $x$  e  $y$

$\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$  sono le varianze di  $x$  e  $y$ , date dalle (3.9) e (3.10) [13]:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_1(x))^2 \quad (3.9)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m_1(y))^2 \quad (3.10)$$

$\sigma_{xy}$  è la covarianza, data dalla (3.11) [13]:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - m_1(x)) \cdot (y - m_1(y)) \quad (3.11)$$

$m_1(x)$  e  $m_1(y)$  sono le medie di  $x$  e  $y$ , date dalle (3.12) e (3.13) [13]:

$$m_1(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.12)$$

$$m_1(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.13)$$

Considero come parametri sismici principali le grandezze  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $T_{VA}$  e  $T_{DV}$ , e quindi calcolo i coefficienti di correlazione  $\rho$  tra queste grandezze e quelle illustrate nel paragrafo 3.3.2.

-  $PGA$

		PGA	
$\rho$	PGA-PGV	0,650	
	PGA-PGD	0,111	
	PGA- $T_{VA}$	-0,161	
	PGA- $T_{DV}$	-0,164	

Tabella 3.1

		PGA	
$\rho$	PGA- $I_c$	0,885	
	PGA- $a_{rms}$	0,879	
	PGA- $I_o$	0,786	
	PGA- $I_a$	0,786	
	PGA-SI	0,731	
	PGA-CAV	0,663	
	PGA-ASI	0,586	
	PGA- $T_d$	-0,019	

Tabella 3.2

Dalla tabella 3.1 si nota che  $PGA$  non è ben correlata con gli altri parametri, in particolar modo con  $PGD$ ,  $T_{VA}$  e  $T_{DV}$ , con i quali è completamente scorrelato. Per quanto riguarda la correlazione con  $PGV$ , questa non è elevata (0,650), e da questo fatto si deduce che utilizzando come unico parametro sismico la  $PGA$ , come attualmente avviene, non possono essere colte le informazioni fornite dalla  $PGV$ , poiché non implicite nella  $PGA$ .

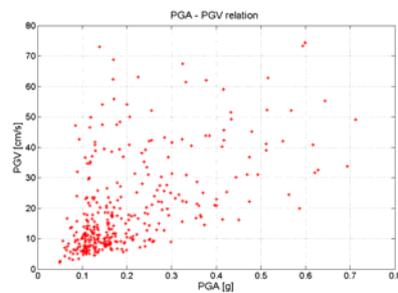
Se ci fosse stata una correlazione alta tra  $PGA$  e  $PGV$ , questo avrebbe significato che a valori fissati di  $PGA$  sarebbero corrisposti valori fissati di  $PGV$ ; ma essendo la correlazione bassa, significa che a valori fissati di  $PGA$  possono corrispondere diversi valori di  $PGV$ , diventa quindi necessario fornire tale valore per ottenere un input sismico più preciso. Mediante  $PGA$  è individuabile solamente una previsione del

comportamento di  $PGV$  al variare di questa, infatti dalla figura 3.1 (a) si può notare che all'aumentare di  $PGA$  i valori di  $PGV$  tendono anch'essi ad aumentare, senza però la possibilità di fornire informazioni più precise.

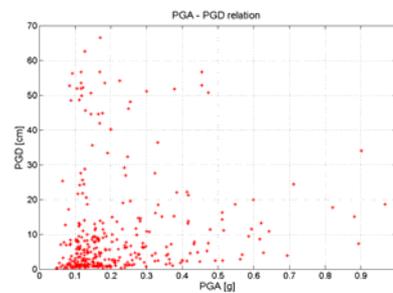
Per quanto riguarda le correlazioni con  $PGD$ ,  $T_{VA}$  e  $T_{DV}$ , queste sono talmente basse, se non nulle, che non solo non è possibile caratterizzarle a partire da  $PGA$ , ma non è nemmeno possibile individuare un loro trend al variare di questa.

Dalla tabella 3.2 si osserva che  $PGA$  è ben correlata con i parametri  $I_c$ ,  $a_{rms}$ ,  $I_o$ ,  $I_a$ , e  $SI$ , e quindi può essere considerata a sua volta una buona stima dell'ampiezza e del contenuto in frequenza di una registrazione sismica. Si nota però che c'è una totale scorrelazione con  $T_d$ , quindi il valore di  $PGA$  non può essere utilizzato per stimare la durata del sisma, la quale ha un grande riscontro sui danni strutturali.

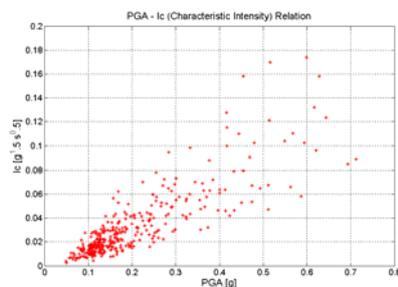
Si riportano in figura 3.1 le relazioni  $PGA-PGV$  (a), e  $PGA-PGD$  (b), per mostrare la dispersione dei valori, e le relazioni  $PGA-I_c$  (c),  $PGA-a_{rms}$  (d),  $PGA-I_o$  (e),  $PGA-I_a$  (f),  $PGA-SI$  (g).



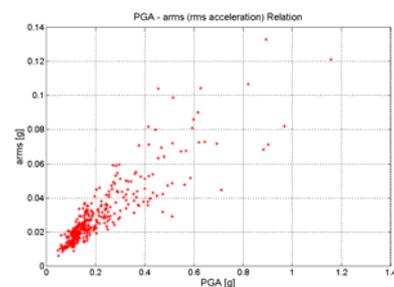
(a)



(b)



(c)



(d)

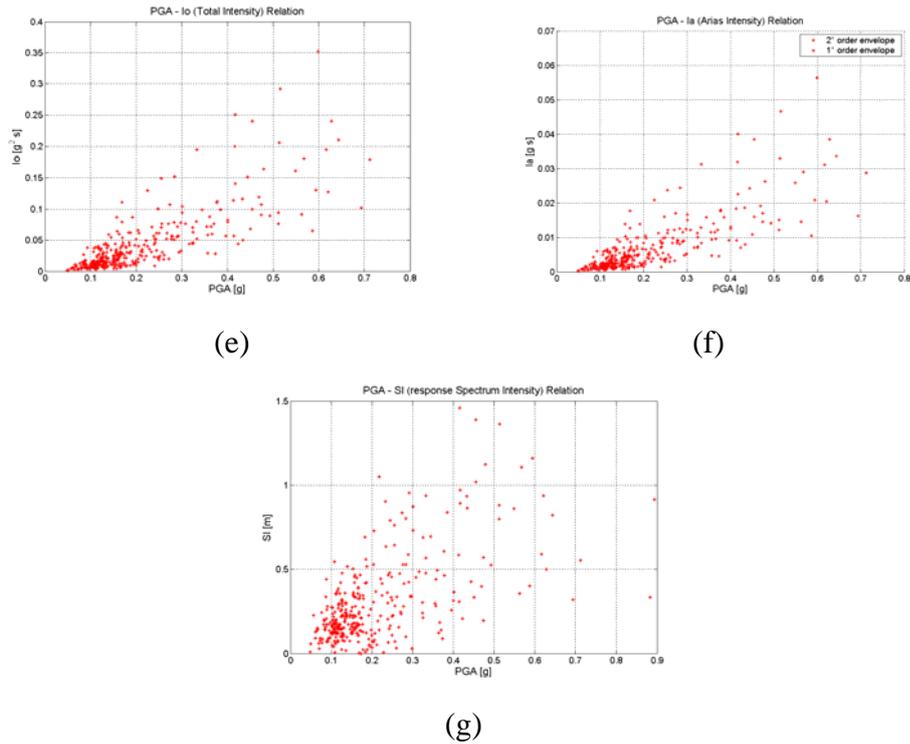


Figura 3.1:  $PGA-PGV$  (a) e  $PGA-PGD$  (b),  $PGA-I_c$  (c),  $PGA-a_{rms}$  (d),  $PGA-I_o$  (e),  $PGA-I_a$  (f),  $PGA-SI$  (g).

-  $PGV$

		<b>PGV</b>	
<b><math>\rho</math></b>	PGV-PGA	0,650	
	PGV-PGD	0,690	
	PGV- $T_{VA}$	0,546	
	PGV- $T_{DV}$	0,309	

Tabella 3.3

		<b>PGV</b>	
<b><math>\rho</math></b>	PGV-CAV	0,767	
	PGV- $I_c$	0,746	
	PGV-SI	0,731	
	PGV- $I_o$	0,690	
	PGV- $I_a$	0,690	
	PGV- $a_{rms}$	0,661	
	PGV- $T_d$	0,367	
	PGV-ASI	0,227	

Tabella 3.4

Dalla tabella 3.3 si nota che la  $PGV$  non è ben correlata con gli altri parametri, quindi utilizzando solo questo valore non posso prevedere l'andamento di  $PGA$ ,  $PGD$ ,  $T_{VA}$  e  $T_{DV}$ .

In particolare, per quanto riguarda la correlazione con  $PGD$ , questa non è elevata ( $0,690$ ), e da questo fatto si deduce che caratterizzando un valore di  $PGV$ , non possono essere colte le informazioni fornite dalla  $PGD$ , poiché non implicite nella  $PGV$ . Cioè a valori fissati di  $PGV$  possono corrispondere diversi valori di  $PGD$ , diventa quindi necessario fornire tale valore per ottenere un input sismico più preciso. Mediante  $PGV$  è individuabile solamente una previsione del comportamento di  $PGD$  al variare di questa, infatti dalla figura 3.2 si può notare che all'aumentare di  $PGV$  i valori di  $PGD$  tendono anch'essi ad aumentare, senza però la possibilità di fornire informazioni più precise.

Dalla tabella 3.4 emerge il fatto che anche  $PGV$ , così come  $PGA$ , può essere considerato una buona stima dell'ampiezza e del contenuto in frequenza di una registrazione sismica, poiché ben correlata con  $CAV$ ,  $I_c$  e  $SI$ , però in misura minore rispetto a  $PGA$ . Mediante  $PGV$  si ha una stima migliore di  $T_d$ , anche se non esaustiva, rispetto a  $PGA$ , infatti il coefficiente di correlazione aumenta al valore  $\rho=0,36$ .

Si riporta in figura 3.2 la relazione  $PGV$ - $PGD$ .

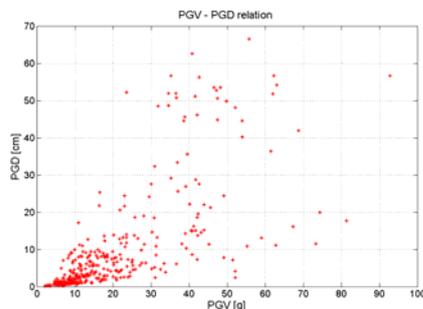


Figura 3.2:  $PGV$  -  $PGD$

- *PGD*

		<b>PGD</b>	
<b><math>\rho</math></b>	PGD-PGA	0,111	
	PGD-PGV	0,690	
	PGD- $T_{VA}$	0,825	
	PGD- $T_{DV}$	0,801	

Tabella 3.5

		<b>PGD</b>	
<b><math>\rho</math></b>	PGD- $T_d$	0,625	
	PGD-CAV	0,484	
	PGD- $I_c$	0,225	
	PGD- $I_o$	0,220	
	PGD- $I_a$	0,220	
	PGD-SI	0,187	
	PGD- $a_{rms}$	0,123	
	PGD-ASI	-0,072	

Tabella 3.6

Dalla tabella 3.5 si nota che *PGD* non è ben correlato con *PGA* e *PGV*, ma è ben correlato con  $T_{VA}$  e con  $T_{DV}$ .

Dalla tabella 3.6 si osserva invece, che a differenza di *PGA* e *PGV*, la *PGD* non è considerata una buona stima dell'ampiezza e del contenuto in frequenza di una registrazione sismica, poiché i coefficienti di correlazione sono bassi, confermando la loro tendenza, notata precedentemente, a diminuire rispetto quelli ricavati con la *PGA*. Aumenta ulteriormente il valore del coefficiente rispetto a  $T_d$ , quindi mediante *PGD* si può ottenere una stima migliore della durata di un sisma rispetto *PGA* e *PGV*.

Si riporta in figura 3.3 la relazione *PGD* -  $T_d$ . E' stata valutata l'interpolazione lineare di tale relazione, esplicitata dalla (3.14), fornendo così una formula per la stima della durata di un sisma a partire dal parametro *PGD*.

$$T_d = 0.97 \cdot PGD + 34.7 \quad (3.14)$$

Con:

*PGD* espresso in cm;

$T_d$  espresso in s.

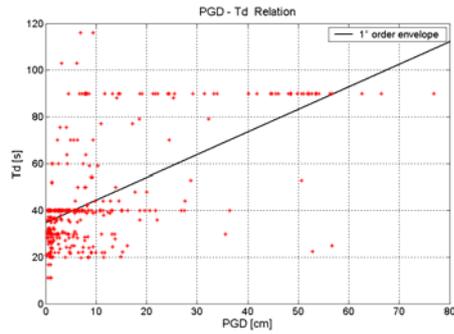


Figura 3.3:  $PGD - T_d$

-  $T_{VA}$

		$T_{VA}$	
$\rho$	$T_{VA} - PGA$		-0,161
	$T_{VA} - PGV$		0,546
	$T_{VA} - PGD$		0,825
	$T_{VA} - T_{DV}$		0,681

Tabella 3.7

		$T_{VA}$	
$\rho$	$T_{VA} - T_d$		0,570
	$T_{VA} - CAV$		0,289
	$T_{VA} - ASI$		-0,225
	$T_{VA} - a_{rms}$		-0,073
	$T_{VA} - SI$		0,057
	$T_{VA} - I_o$		0,027
	$T_{VA} - I_a$		0,027
	$T_{VA} - I_c$		0,014

Tabella 3.8

I risultati all'interno della tabella 3.7 erano già stati riportati nelle tabelle 3.1, 3.3 e 3.5, ma per completezza vengono mostrati tutti insieme.

Dalla tabella 3.8 si osserva che  $T_{VA}$  non è considerata una buona stima dell'ampiezza e del contenuto in frequenza di una registrazione sismica, poiché i coefficienti di correlazione sono bassi.

-  $T_{DV}$

		$T_{DV}$	
$\rho$	$T_{DV} - PGA$	-0,164	
	$T_{DV} - PGV$	0,309	
	$T_{DV} - PGD$	0,801	
	$T_{DV} - TVA$	0,681	

Tabella 3.9

		$T_{DV}$	
$\rho$	$T_{DV}-T_d$	0,629	
	$T_{DV}-CAV$	0,266	
	$T_{DV}-ASI$	-0,154	
	$T_{DV}-a_{rms}$	-0,133	
	$T_{DV}-SI$	-0,054	
	$T_{DV}-I_c$	-0,042	
	$T_{DV}-I_o$	-0,02	
	$T_{DV}-I_a$	-0,02	

Tabella 3.10

I risultati all'interno della tabella 3.9 erano già stati riportati nelle tabelle 3.1, 3.3 e 3.5, ma per completezza vengono mostrati tutti insieme.

Dalla tabella 3.10 si osserva che  $T_{DV}$  non è considerata una buona stima dell'ampiezza e del contenuto in frequenza di una registrazione sismica, poiché i coefficienti di correlazione sono bassi.

### 3.3.3 CONSIDERAZIONI FINALI

I risultati indicati mostrano che i parametri sismici  $PGA$ ,  $PGV$  e  $PGD$  non sono correlati tra loro, e quindi, teoricamente, sono tutti necessari per cogliere il maggior numero di informazioni possibile riguardo una scossa sismica. Si percepisce quindi il fatto che la sola  $PGA$  non è sufficiente a descrivere in maniera esaustiva l'input sismico.

Inoltre  $PGA$  è un buon estimatore dei parametri di intensità,  $PGV$  rappresenta bene il coefficiente di Housner e la 'cumulative absolute velocity', mentre  $PGD$  è direttamente correlato con la durata del sisma.

### 3.4 I PARAMETRI NELLA PROGETTAZIONE

La progettazione sismica delle strutture, seguendo la normativa italiana, viene effettuata partendo esclusivamente dall'individuazione dell'accelerazione massima del terreno, cioè dalla *PGA*, ignorando completamente altri parametri quali *PGV* e *PGD*, che, come mostrato nel paragrafo 3.3.3, sono ad essa scorrelati.

All'interno della normativa vengono forniti dei valori di *PGA* da utilizzare a seconda della zona interessata dalla progettazione. Infatti il territorio è stato suddiviso in zone in base al valore di *PGA* che ha una fissata probabilità di superamento in un determinato periodo di tempo (la probabilità di superamento e l'intervallo di tempo corrispondente dipendono dal livello di progettazione). Ad esempio per una progettazione allo *SLU* sono forniti quei valori di *PGA* con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (per gli edifici di classe 1), mentre per lo *SLD* i valori sono relativi ad una probabilità di superamento del 50% in 50 anni [15].

I valori di *PGA* utilizzati derivano da un'analisi del rischio sismico, la cosiddetta analisi di *Hazard*.

#### 3.4.1 ANALISI DI HAZARD

L'analisi di *Hazard*, il cui vero nome è '*probabilistic seismic hazard analysis*', o più brevemente *PSHA*, è un'analisi del rischio sismico, cioè per un determinato sito viene stimata la probabilità annuale di superamento di una determinata grandezza, che caratterizza l'evento sismico [16].

In questo modo, fissando una certa probabilità di superamento e il periodo di tempo di interesse, posso ottenere quel valore della grandezza che ha quella data probabilità di superamento in quel periodo di tempo.

I passaggi seguiti in una *PSHA* sono i seguenti [16]:

- identificazione di tutte le fonti sismiche che possono generare forti scosse nel sito di interesse;
- caratterizzazione di ogni fonte sismica in termini di geometria, massima magnitudo e distanza;

- selezione delle relazioni di attenuazione appropriate alle fonti sismiche, alla condizione sismotettonica e alle condizioni del sito;
- calcolo della probabilità di rischio sismico con programmi computazionali qualificati;

I risultati vengono forniti sotto forma di curve di *hazard*, e possono essere così costruite delle mappe di rischio sismico. Al momento le mappe di *hazard* sono di norma disponibili per la *PGA* e per un numero discreto di accelerazioni spettrali, ma possono essere ricavate anche per altre variabili.

### 3.4.2 LEGGI DI ATTENUAZIONE

Come si deduce dal paragrafo precedente, per un'analisi di *hazard*, l'input di base che deve essere fornito, oltre alle condizioni del sito, è costituito da un modello sismico, e da relazioni di attenuazione delle grandezze di interesse [16].

E' quindi necessario ottenere delle leggi di attenuazione per ogni grandezza che si vuole studiare mediante questa analisi.

Le leggi di attenuazione [27] [30] [31] [32] [33] maggiormente disponibili riguardano la *PGA*, l'accelerazione spettrale  $S_A$ , e la *PGV*; ultimamente sono state ricavate leggi di attenuazione anche sullo spostamento spettrale non elastico  $S_{di}$ , come proposto da *Tothog* [28] [29].

Per quanto riguarda i parametri sismici considerati in questo capitolo, le uniche leggi di attenuazione attualmente ricavate riguardano *PGA* e *PGV*. Ne deriva il fatto che possono essere eseguite analisi di *hazard* solo su queste, e che quindi sono le sole, attualmente, a poter essere potenzialmente utilizzate nella progettazione.

Per il territorio italiano sono disponibili le leggi di attenuazione *Sabetta-Pugliese* per *PGA* [g] e per *PGV* [cm/s], descritte rispettivamente dalle formule (3.15) e (3.16) [18]:

$$\log PGA = -1.845 + 0.363 \cdot M - \log(R^2 + 25)^{\frac{1}{2}} + 0.195 \cdot s \quad (3.15)$$

$$\log PGV = -0.828 + 0.489 \cdot M - \log(R^2 + 15.21)^{\frac{1}{2}} + 0.116 \cdot s \quad (3.16)$$

Dove:

$M$  è la magnitudo,

$R$  è la distanza espressa in Km,

$s$  ( $= 0-1$ ) è un fattore che dipende dalle condizioni locali del sito.

### 3.4.3 CONSIDERAZIONI FINALI

Per i motivi appena esposti, nel proseguimento di questo lavoro si porrà maggiore attenzione ai parametri sismici  $PGA$  e  $PGV$ , poiché sono gli unici che attualmente possono essere utilizzati, senza trascurare però anche le altre grandezze, in previsione di una loro futura possibile utilizzazione.

## CAPITOLO 4

# GLI SPETTRI DI RISPOSTA DEGLI SPOSTAMENTI

### 4.1 INTRODUZIONE

Lo scopo di questo capitolo è la schematizzazione dello spettro di risposta degli spostamenti per un sistema elastico lineare, con smorzamento del 5%, su un terreno di tipo 'B'.

La prima fase consiste in un richiamo teorico dello spettro tripartito, la seconda nella descrizione della metodologia con cui vengono svolte le analisi numeriche della terza fase, che comprende anche la calibrazione dei fattori di amplificazione, mentre la quarta fase consiste nella costruzione sperimentale della schematizzazione dello spettro degli spostamenti.

### 4.2 IL 'TRIPARTITO'

Gli spettri di risposta degli spostamenti, delle pseudo-velocità e delle pseudo-accelerazioni, per un dato sisma, contengono tutti le stesse informazioni, poiché sono direttamente ricavabili l'uno dall'altro. Infatti i tre spettri sono semplicemente modi diversi di rappresentare la stessa informazione sulla risposta strutturale [12]. Conoscendo uno dei tre spettri è possibile ricavare gli altri due mediante le seguenti espressioni:

$$S_V = \omega \cdot D = \frac{2\pi}{T} \cdot D \quad (4.1)$$

$$S_A = \omega^2 \cdot D = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot D \quad (4.2)$$

Dove:

$D = S_d$  = spostamento della struttura (risposta in termini di spostamento);

$S_V$  = pseudo-velocità della struttura (risposta in termini di pseudo-velocità);

$S_A$  = pseudo-accelerazione della struttura (risposta in termini di pseudo-accelerazione);

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \text{frequenza della struttura};$$

$T$  = periodo della struttura.

Tutti gli spettri sono necessari, poiché ognuno fornisce direttamente una quantità fisica significativa: lo spettro degli spostamenti indica lo spostamento massimo del sistema, lo spettro delle pseudo-velocità è direttamente correlato con il picco di energia tensionale accumulata nel sistema durante il sisma, mentre lo spettro delle pseudo-accelerazioni è correlato al valore di picco della forza statica equivalente e del taglio alla base. Per questo motivo nel 1960, a cura di *Veletsos* e *Newmark*, è stata pensata la costruzione di uno spettro che contenesse contemporaneamente i tre spettri, cioè dello spettro tripartito [12].

Nel tripartito l'asse verticale, in scala logaritmica, rappresenta la pseudo-velocità; l'asse orizzontale, in scala logaritmica, rappresenta il periodo proprio della struttura. Sono presenti altri due assi, sempre in scala logaritmica, inclinati a  $+45^\circ$  e a  $-45^\circ$  che rappresentano rispettivamente lo spostamento e la pseudo-accelerazione.

In figura 4.1 è rappresentato un esempio di tripartito, calcolato per un gruppo di sismi, in cui in nero è rappresentato il valore medio, e in blu e in rosso rispettivamente la media più o meno la deviazione standard.

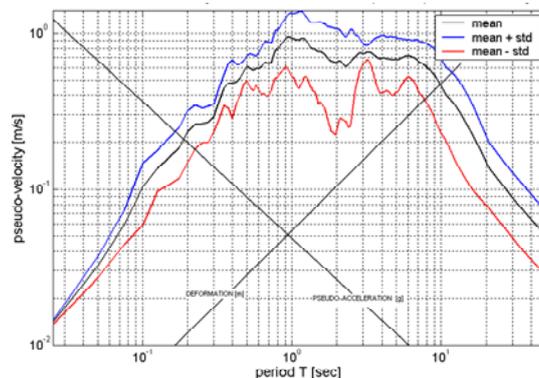


Figura 4.1: spettro tripartito.

## 4.2.1 INTERPRETAZIONE

Dalla ricerca si è potuto osservare che lo spettro tripartito può assumere una forma schematizzata. Nel *Chopra* [12] è riportata la schematizzazione presente nella figura 4.2, ricavata per sismi registrati su terreni compatti.

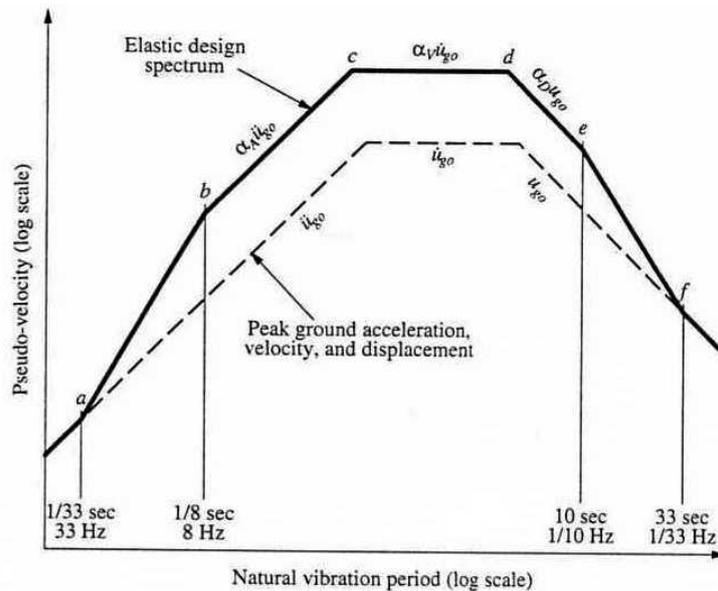


Figura 4.2: schematizzazione del tripartito [12].

Nella figura sono indicati:

$u_{go}$  = spostamento di picco del terreno (peak ground displacement = *PGD*),

$\dot{u}_{go}$  = velocità di picco del terreno (peak ground velocità = *PGV*),

$\ddot{u}_{go}$  = accelerazione di picco del terreno (peak ground acceleration = *PGA*).

$\alpha_A, \alpha_V, \alpha_D$ , fattori di amplificazione rispettivamente delle accelerazioni, delle velocità e degli spostamenti.

Si può notare come la forma del tripartito sia individuata da 12 parametri: *PGA, PGV, PGD,  $\alpha_A, \alpha_V, \alpha_D, T_a, T_b, T_c, T_d, T_e$  e  $T_f$* .

Per quanto riguarda i periodi, i valori  $T_a$  e  $T_b$  sono piccoli e quindi non influenzano significativamente la forma, i valori  $T_c$  e  $T_d$  possono essere ricavati da altre grandezze, come si vedrà in seguito dalle formule (4.14) e (4.28), e infine i

valori  $T_e$  e  $T_f$  sono grandi e non entrano in gioco nella progettazione strutturale, inoltre non influenzano significativamente la forma.

Per quanto riguarda  $PGA$ ,  $PGV$  e  $PGD$ , queste sono informazioni caratteristiche di ogni sisma, e quindi sono valori noti.

Da queste considerazioni si deduce che la forma del tripartito può essere ricavata dalla conoscenza dei fattori di amplificazione  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$ ,  $\alpha_D$ .

Lo spettro tripartito può essere suddiviso in tre regioni, le quali sono influenzate da grandezze differenti [12]:

- 1)  $T < T_c$  : acceleration-sensitive region (zona sensibile alle accelerazioni);
- 2)  $T_c < T < T_d$  : velocity-sensitive region (zona sensibile alle velocità);
- 3)  $T > T_d$  : displacement-sensitive region (zona sensibile agli spostamenti).

$T_a$  è quel valore del periodo  $T$  per cui c'è il passaggio da un tratto ad accelerazione costante (=PGA) ad un tratto lineare (a-b) in cui l'accelerazione cresce. Il *Chopra* [12] indica  $T_a = 1/33 \text{ sec} = 0.03 \text{ sec}$ ; quindi assume un valore molto basso, che non interessa la progettazione strutturale, infatti nelle norme italiane il valore  $T_a$  non è nemmeno menzionato.

$T_b$  è quel valore del periodo  $T$  per cui c'è il passaggio da un tratto lineare (a-b) ad accelerazione crescente ad un tratto (b-c) ad accelerazione costante, in cui questa assume il valore  $S_A = \alpha_A PGA$ . Il *Chopra* [12] indica  $T_b = 1/8 \text{ sec} = 0.125 \text{ sec}$ .

$T_c$  è quel valore del periodo  $T$  per cui c'è il passaggio da un tratto (b-c) ad accelerazione costante ( $S_A = \alpha_A PGA$ ) ed un tratto (c-d) a velocità costante, in cui questa assume il valore  $S_V = \alpha_V PGV$ . Il *Chopra* [12] non fornisce alcun valore di  $T_c$ , infatti questo è dato dall'intersezione dei due tratti b-c e c-d, e quindi dipenderà dai valori assunti dalle grandezze  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $\alpha_A$  e  $\alpha_V$ . Questo concetto è rafforzato dal fatto che  $T_c$  è un valore di passaggio tra la zona sensibile alle accelerazioni e quella sensibile alle velocità.

Ad Esempio, come si può vedere dalla figura 4.3, tenendo costante i valori di  $PGA$ ,  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$ , e aumentando il valore di  $PGV$ , il punto  $c$  si sposta verso destra, diventando  $c'$ , perché si alza il tratto c-d, quindi in questo caso il periodo  $T_c$  aumenta.

$T_d$  è quel valore del periodo  $T$  per cui c'è il passaggio da un tratto ( $c-d$ ) a velocità costante ( $S_V=\alpha_V PGV$ ) ed un tratto ( $d-e$ ) a spostamento costante, in cui questo assume il valore  $S_D=\alpha_D PGD$ . Il *Chopra* [12] non fornisce alcun valore di  $T_d$ , infatti questo è dato dall'intersezione dei due tratti  $c-d$  e  $d-e$ , e quindi dipenderà dai valori assunti dalle grandezze  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $\alpha_V$  e  $\alpha_D$ . Questo concetto è rafforzato dal fatto che  $T_d$  è un valore di passaggio tra la zona sensibile alle velocità e quella sensibile agli spostamenti.

Ad Esempio, come si può vedere dalla figura 4.3, tenendo costante i valori di  $PGD$ ,  $\alpha_D$ ,  $\alpha_V$ , e aumentando il valore di  $PGV$ , il punto  $d$  si sposta verso sinistra, diventando  $d'$ , perché si alza il tratto  $c-d$ , quindi in questo caso il periodo  $T_d$  diminuisce.

$T_e$  è quel valore del periodo  $T$  per cui c'è il passaggio da un tratto ( $d-e$ ) a spostamento costante ad un tratto ( $e-f$ ) a spostamento decrescente. Il *Chopra* [12] indica  $T_e = 10 \text{ sec}$ .

$T_f$  è quel valore del periodo  $T$  per cui c'è il passaggio da un tratto lineare ( $e-f$ ) in cui lo spostamento decresce ad un tratto a spostamento costante ( $=PGV$ ). Il *Chopra* [12] indica  $T_f = 33 \text{ sec}$ , di molto superiore ai periodi propri delle strutture, quindi di poca importanza per la progettazione strutturale.

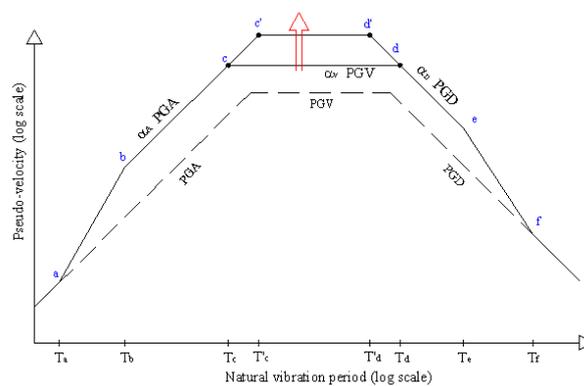


Figura 4.3: spettro tripartito

Dalla figura 4.2 si può notare l'importanza dei valori assunti dai fattori di amplificazione, i quali, intuitivamente, influenzano sia i valori di picco delle pseudo-accelerazioni  $S_A=\alpha_A PGA$ , delle pseudo-velocità  $S_V=\alpha_V PGV$ , e degli spostamenti  $S_D=\alpha_D PGD$ , sia i valori dei periodi  $T_c$  e  $T_d$ .

Nel *Chopra* [12] sono riportati in tabella (figura 4.4) i valori di tali fattori, elaborati da *Newmark* e *Hall*, in base allo smorzamento (damping) della struttura:

**TABLE 6.9.1** AMPLIFICATION FACTORS: ELASTIC DESIGN SPECTRA

Damping, $\xi$ (%)	Median (50 percentile)			One Sigma (84.1 percentile)		
	$\alpha_A$	$\alpha_V$	$\alpha_D$	$\alpha_A$	$\alpha_V$	$\alpha_D$
1	3.21	2.31	1.82	4.38	3.38	2.73
2	2.74	2.03	1.63	3.66	2.92	2.42
5	2.12	1.65	1.59	2.71	2.30	2.01
10	1.64	1.37	1.20	1.99	1.84	1.69
20	1.17	1.08	1.01	1.26	1.37	1.38

Source: N. M. Newmark and W. J. Hall, *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 1982, pp. 35 and 36.

Figura 4.4: fattori di amplificazione.

#### 4.2.2 SPETTRO DEGLI SPOSTAMENTI DAL 'TRIPARTITO'

Nello spettro tripartito schematizzato di figura 4.2 sono ricavabili tutte le informazioni per la costruzione dello spettro di risposta degli spostamenti  $S_d$  ( $=D$ ), schematizzabile come in figura 4.5:

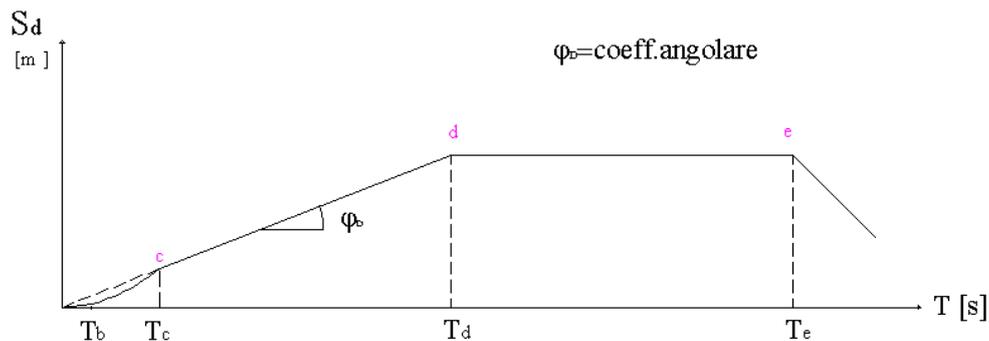


Figura 4.5: spettro di risposta degli spostamenti

Tratto *c-d* : velocità costante o spostamento crescente in modo lineare, del tipo

$$S_d = \varphi_D T, \text{ dove } \varphi_D \text{ è il coefficiente angolare di tale tratto.}$$

Tratto *d-e* : spostamento costante.

Si vuole trovare il valore del coefficiente angolare  $\varphi_D$  del tratto lineare *c-d*, e il valore del periodo  $T_d$  (*Corner Period*), in modo da costruire lo spettro di risposta

degli spostamenti per una progettazione agli spostamenti (*Displacement Based Design*).

Dal tripartito si possono fare le seguenti considerazioni:

1. Il tratto **c-d** del tripartito può essere scritto come:

$$S_v = \alpha_v \cdot PGV \quad (4.3)$$

Da cui:

$$S_D = \frac{S_v}{\omega} = \frac{\alpha_v}{2\pi} \cdot PGV \cdot T \quad (4.4)$$

Quindi posso scrivere:

$$\boxed{\varphi_D = \frac{\alpha_v}{2\pi} \cdot PGV} \quad (4.5)$$

Dalla relazione (4.5) si può notare che il valore  $\varphi_D$  è direttamente proporzionale alla grandezza  $PGV$ , mediante il coefficiente  $\alpha_v/2\pi$ .

2. Considerando il punto **d**, e quindi il periodo  $T_d$  :

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_v = D \cdot \omega = \alpha_v \cdot PGV & \text{pseudo-velocità (tratto c-d del tripartito)} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_d = D = \alpha_D \cdot PGD & \text{spostamento (tratto d-e del tripartito)} \end{array} \right. \quad (4.7)$$

$$\text{Dalla (4.6):} \quad \left\{ \begin{array}{l} D = \frac{\alpha_v \cdot PGV}{\omega} \end{array} \right. \quad (4.8)$$

$$\text{Dalla (4.7):} \quad \left\{ \begin{array}{l} D = \alpha_D \cdot PGD \end{array} \right. \quad (4.9)$$

$$\text{Uguagliando trovo:} \quad D = \frac{\alpha_v \cdot PGV}{\omega} = \alpha_D \cdot PGD \quad ; \quad (4.10)$$

$$\text{Da cui:} \quad \omega = \frac{\alpha_v \cdot PGV}{\alpha_D \cdot PGD} \quad (4.11)$$

$$\frac{2\pi}{T_d} = \frac{\alpha_v \cdot PGV}{\alpha_D \cdot PGD} \quad (4.12)$$

Quindi ricavo l'espressione di  $T_d$  :

$$T_d = 2\pi \frac{\alpha_D \cdot PGD}{\alpha_V \cdot PGV} = 2\pi \cdot \frac{\alpha_D}{\alpha_V} \cdot \frac{PGD}{PGV} = 2\pi \cdot \frac{\alpha_D}{\alpha_V} \cdot RR' = 2\pi \cdot \frac{\alpha_D}{\alpha_V} \cdot T_{DV} \quad (4.13)$$

In questo modo ho ricavato l'espressione (4.14) del periodo  $T_d$  in funzione del parametro  $T_{DV} = PGD/PGV$ .

$$T_d = 2\pi \cdot \frac{\alpha_D}{\alpha_V} \cdot T_{DV} \quad (4.14)$$

3. Il tratto **d-e** del tripartito può essere scritto come:

$$S_d = \alpha_D \cdot PGD \quad (4.15)$$

La relazione (4.15) indica una relazione diretta tra il valore massimo dello spostamento e la grandezza  $PGD$ , secondo il fattore di amplificazione degli spostamenti  $\alpha_D$ .

#### 4.2.3 SPETTRO DELLE VELOCITA' DAL 'TRIPARTITO'

Nello spettro tripartito schematizzato di figura 4.2 sono ricavabili tutte le informazioni per la costruzione dello spettro di risposta delle velocità  $S_v$ , schematizzabile come in figura 4.6:

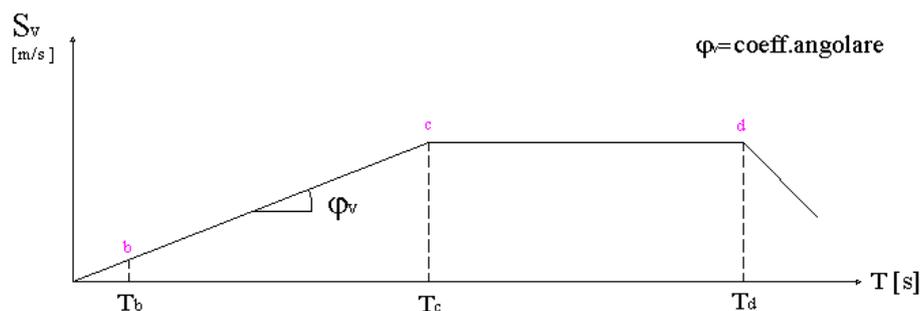


Figura 4.6: spettro di risposta delle pseudo-velocità

Tratto *b-c* : accelerazione costante o velocità crescente in modo lineare, del tipo

$$S_V = \varphi_V T, \text{ dove } \varphi_V \text{ è il coefficiente angolare di tale tratto.}$$

Tratto *c-d* : velocità costante.

Si vuole trovare il valore del coefficiente angolare  $\varphi_V$  del tratto lineare *b-c*, e il valore del periodo  $T_c$ , in modo da costruire lo spettro di risposta delle velocità. Inoltre, per una progettazione basata sugli spostamenti, il valore  $T_c$  è il periodo in cui inizia il tratto lineare *c-d* dello spettro degli spostamenti.

Dal tripartito si possono fare le seguenti considerazioni:

1. Il tratto **b-c** del tripartito può essere scritto come:

$$S_A = \alpha_A \cdot PGA \quad (4.16)$$

Da cui:

$$S_V = \frac{S_A}{\omega} = \frac{\alpha_A}{2\pi} \cdot PGA \cdot T \quad (4.17)$$

Quindi posso scrivere:

$$\boxed{\varphi_V = \frac{\alpha_A}{2\pi} \cdot PGA} \quad (4.18)$$

Dalla relazione (4.18) si può notare che il valore  $\varphi_V$  è direttamente proporzionale alla grandezza  $PGA$ , mediante il coefficiente  $\alpha_A/2\pi$ .

2. Considerando il punto **c**, e quindi il periodo  $T_c$  :

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_a = D \cdot \omega^2 = \alpha_A \cdot PGA & \text{pseudo accelerazione (tratto } b-c) \end{array} \right. \quad (4.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_v = D \cdot \omega = \alpha_v \cdot PGV & \text{pseudo velocità (tratto } c-d) \end{array} \right. \quad (4.20)$$

$$\text{Dalla (4.19): } \left\{ \begin{array}{l} D = \frac{\alpha_A \cdot PGA}{\omega^2} \end{array} \right. \quad (4.21)$$

$$\text{Dalla (4.20): } \left\{ \begin{array}{l} D = \frac{\alpha_V \cdot PGV}{\omega} \end{array} \right. \quad (4.22)$$

$$\text{Uguagliando trovo: } D = \frac{\alpha_A \cdot PGA}{\omega^2} = \frac{\alpha_V \cdot PGV}{\omega} ; \quad (4.23)$$

$$\text{Da cui: } \frac{\alpha_A \cdot PGA}{\omega} = \alpha_V \cdot PGV \quad (4.24)$$

$$\omega = \frac{\alpha_A \cdot PGA}{\alpha_V \cdot PGV} \quad (4.25)$$

$$\frac{2\pi}{T_c} = \frac{\alpha_A \cdot PGA}{\alpha_V \cdot PGV} \quad (4.26)$$

Quindi ricavo l'espressione di  $T_c$  :

$$T_c = 2\pi \frac{\alpha_V \cdot PGV}{\alpha_A \cdot PGA} = 2\pi \cdot \frac{\alpha_V}{\alpha_A} \cdot \frac{PGV}{PGA} = 2\pi \cdot \frac{\alpha_V}{\alpha_A} \cdot RR = 2\pi \cdot \frac{\alpha_V}{\alpha_A} \cdot T_{VA} \quad (4.27)$$

In questo modo ho ricavato l'espressione (4.28) del periodo  $T_c$  in funzione del parametro  $T_{VA} = PGV/PGA$ .

$$\boxed{T_c = 2\pi \cdot \frac{\alpha_V}{\alpha_A} \cdot T_{VA}} \quad (4.28)$$

#### 4.2.4 SPETTRO DELLE ACCELERAZIONI DAL 'TRIPARTITO'

Nello spettro tripartito schematizzato di figura 4.2 sono ricavabili tutte le informazioni per la costruzione dello spettro di risposta delle accelerazioni  $S_A$ , schematizzabile come in figura 4.7:

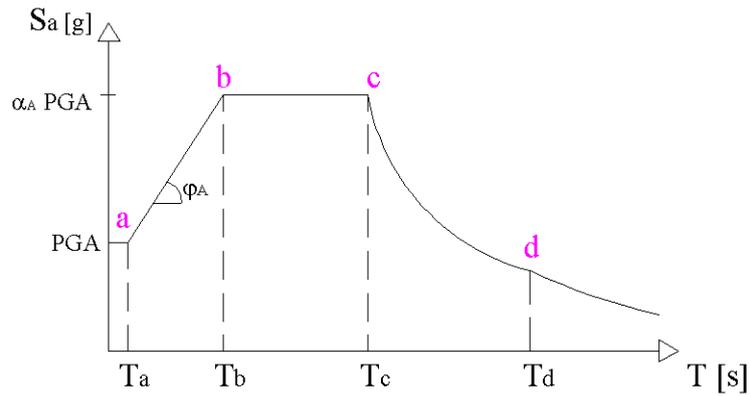


Figura 4.7: spettro di risposta delle pseudo-accelerazioni

Tratto *a-b*: accelerazione crescente in modo lineare, del tipo  $S_A = \varphi_A T + k$

Tratto *c-d*: accelerazione costante.

Si vuole trovare il valore del coefficiente angolare  $\varphi_A$  del tratto lineare *a-b*.

Dal tripartito si possono fare le seguenti considerazioni:

1. Il tratto **a-b** del tripartito può essere scritto come:

$$S_A = \frac{\alpha_A \cdot PGA - PGA}{T_b - T_a} \cdot T = \frac{\alpha_A - 1}{T_b - T_a} \cdot PGA \cdot T \quad (4.29)$$

Da cui:

$$\boxed{\varphi_A = \frac{\alpha_A - 1}{T_b - T_a} \cdot PGA} \quad (4.30)$$

2. Considerando il punto **b**:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_A = \frac{\alpha_A - 1}{T_b - T_a} \cdot T_b \cdot PGA \end{array} \right. \quad (4.31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_A = \alpha_A \cdot PGA \end{array} \right. \quad (4.32)$$

$$\text{Quindi uguagliando : } \frac{\alpha_A - 1}{T_b - T_a} \cdot T_b \cdot PGA = \alpha_A \cdot PGA \quad (4.33)$$

$$\frac{\alpha_A - 1}{\alpha_A} = \frac{T_b - T_a}{T_b} \quad (4.34)$$

$$\frac{T_a}{T_b} = \frac{1}{\alpha_A} \quad (4.35)$$

Da cui si ricava:

$$T_b = \alpha_A \cdot T_a \quad (4.36)$$

### 4.3 UNA METODOLOGIA ALTERNATIVA DI VALUTAZIONE DEGLI 'α': REGRESSIONI LINEARI ROBUSTE

Per definizione di fattori di amplificazione si ha:

$$\alpha_A = \frac{A_{\max(\text{media})}}{PGA} \quad (4.37)$$

$$\alpha_V = \frac{V_{\max(\text{media})}}{PGV} \quad (4.38)$$

$$\alpha_D = \frac{D_{\max(\text{media})}}{PGD} \quad (4.39)$$

Con:

$A_{\max(\text{media})}$  = accelerazione massima valutata come media delle accelerazioni  
nell'intervallo  $T_b < T < T_c$  ;

$V_{\max(\text{media})}$  = velocità massima valutata come media delle velocità nell'intervallo  
 $T_c < T < T_d$  ;

$D_{\max(\text{media})}$  = spostamento massimo valutato come media degli spostamenti  
nell'intervallo  $T_d < T < T_e$  .

Secondo un approccio tradizionale, per la valutazione dei fattori di amplificazione, cioè per utilizzare le formule (4.37), (4.38) e (4.39), è necessaria

una stima dei valori  $A_{max,(media)}$ ,  $V_{max,(media)}$  e  $D_{max,(media)}$  all'interno dei rispettivi intervalli di periodo.

La stima dei valori  $A_{max,(media)}$ ,  $V_{max,(media)}$  e  $D_{max,(media)}$  è difficile da fornire a causa della forma degli spettri, e inoltre è difficile individuare i valori estremi dei periodi all'interno dei quali deve essere effettuata tale stima, rendendo in questo modo deboli i valori ricavati dalle formule (4.37), (4.38) e (4.39).

La figura 4.8 (a) rappresenta uno spettro delle pseudo-accelerazioni, e da qui si può notare la difficoltà palese di valutare sia i valori dei periodi  $T_b$  e  $T_c$ , sia un valore medio delle accelerazioni ( $A_{max,(media)}$ ) nell'intervallo  $T_b < T < T_c$ , all'interno del quale si dovrebbe poter rappresentare un tratto costante delle accelerazioni.

Ragionamento analogo può essere effettuato anche per gli spettri delle pseudo-velocità (b) e degli spostamenti (c), rappresentati in figura 4.8.

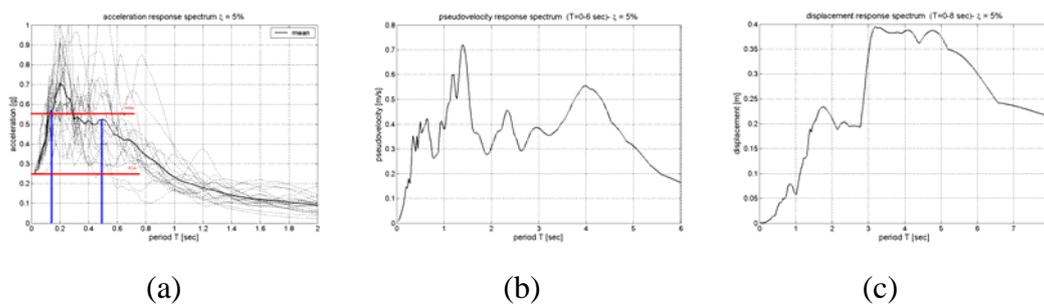
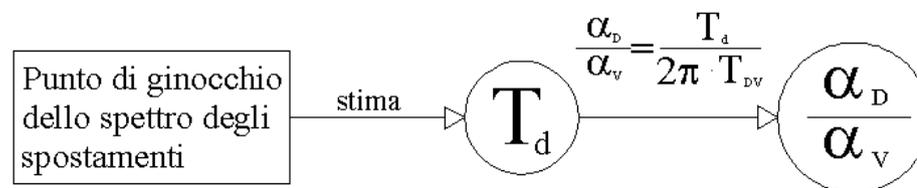
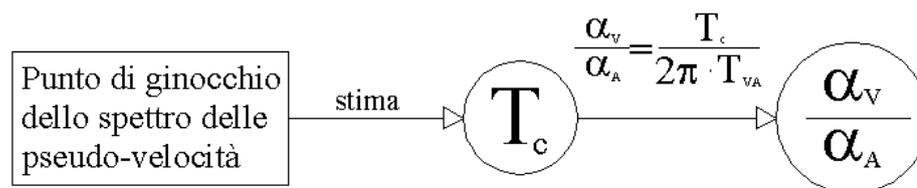
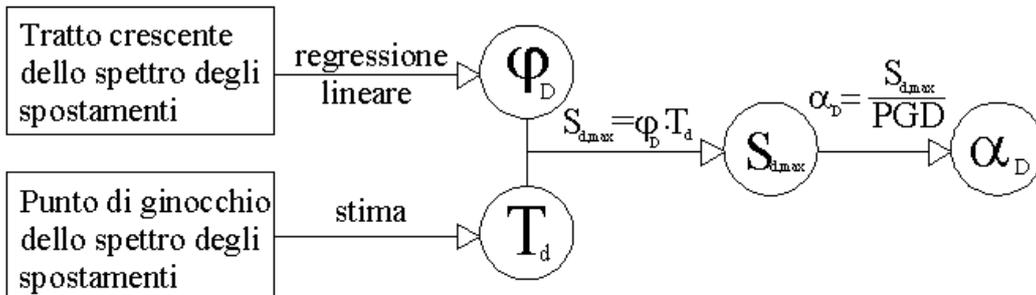
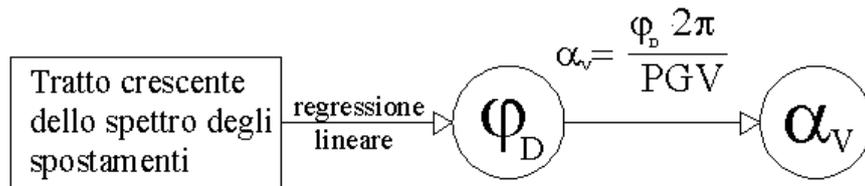
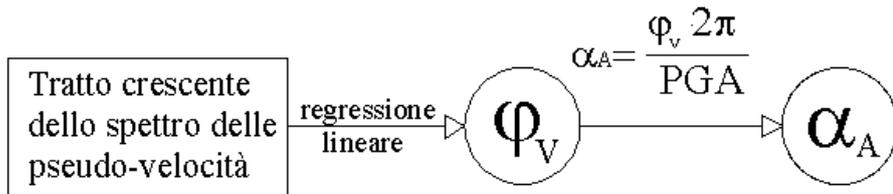


Figura 4.8. (a): spettro delle pseudo-accelerazioni; (b): spettro delle pseudo-velocità; (c): spettro degli spostamenti.

Utilizzando una metodologia alternativa, basata su regressioni lineari più robuste rispetto a quelle tradizionali, è possibile fare riferimento alle formule (4.5), (4.14), (4.15), (4.18), (4.28), (4.30) e (4.36), che mettono in relazione  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$  e  $\alpha_D$  con i valori  $\varphi_A$ ,  $\varphi_V$ ,  $\varphi_D$ ,  $T_b$ ,  $T_c$  e  $T_d$ , ottenendo una stima più robusta dei fattori di amplificazione.

Si riportano di seguito i diagrammi di flusso che schematizzano graficamente i passaggi per ricavare i fattori di amplificazione mediante il metodo alternativo proposto.



Per la valutazione dei valori  $\varphi_A$ ,  $\varphi_V$ ,  $\varphi_D$  è sufficiente calcolare il coefficiente angolare delle rette che linearizza il tratto crescente dello spettro corrispondente (pseudo-accelerazioni, pseudo-velocità, spostamenti), fino al tratto che diventa costante. In questo lavoro si è proceduto eseguendo una regressione lineare di una porzione di tale tratto crescente.

In figura 4.9 è mostrata la regressione lineare del tratto crescente dello spettro degli spostamenti, mediante una retta rossa, il cui coefficiente angolare è  $\varphi_D$ .

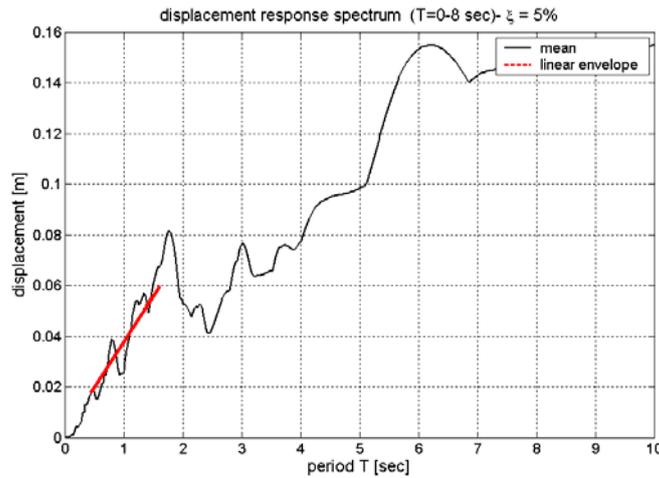
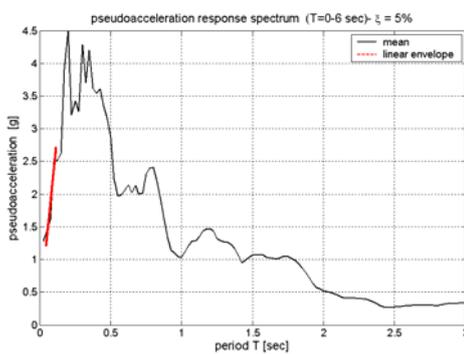
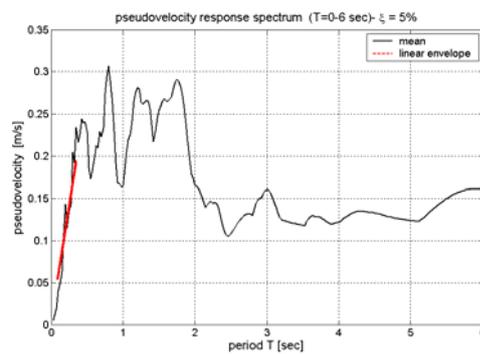


Figura 4.9: linearizzazione dello spettro degli spostamenti.

La stessa valutazione è stata effettuata sugli spettri delle pseudo-accelerazioni e delle pseudo-velocità, come mostrato in figura 4.10 (a) e (b) rispettivamente.



(a)



(b)

Figura 4.10: linearizzazione dello spettro degli pseudo-ccelerazioni (a) e delle pseudo-velocità (b).

Come si può notare anche dalle figure 4.9 e 4.10 le regressioni lineari effettuata sono precise, e quindi robuste.

La stima dei valori  $T_c$  e  $T_d$  è stata eseguita graficamente.

Infatti  $T_c$  rappresenta il periodo in cui termina il tratto lineare e inizia il tratto costante dello spettro delle pseudo-velocità. Mentre  $T_d$  rappresenta il periodo in cui termina il tratto lineare e inizia il tratto costante dello spettro degli spostamenti.

In figura 4.11(a) e (b) sono riportati due esempi di stima rispettivamente dei valori  $T_c$  e  $T_d$ , cioè dei punti di ginocchio degli spettri delle pseudo-velocità (a) e degli spostamenti (b) : si ricava  $T_c = 0.4$  secondi e  $T_d = 2$  secondi

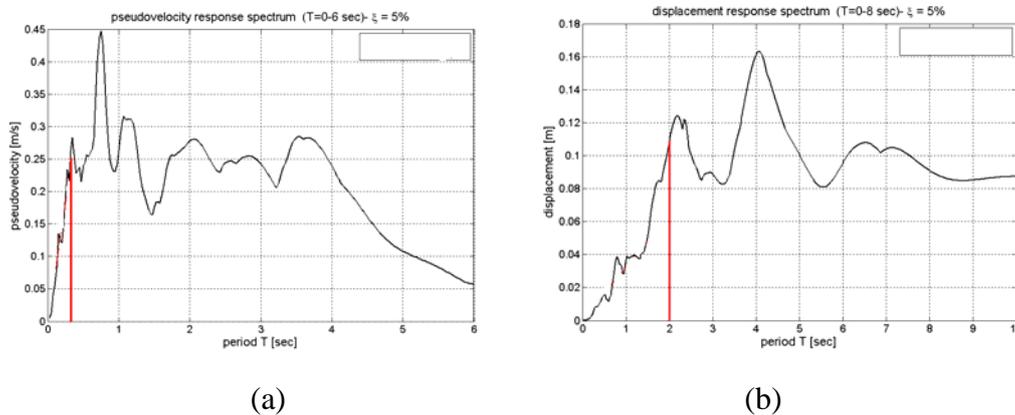


Figura 4.11: stima dei valori  $T_c$  (a) e  $T_d$  (b).

La stima del periodo  $T_b$  non è stata effettuata perché per poter utilizzare le formule (4.30) e (4.36) è necessario stimare anche il periodo  $T_a$ , la cui valutazione grafica è molto difficile, se non impossibile, e molto incerta, a causa dei bassissimi valori che questo assume.

In questo modo si ottiene una stima più robusta dei valori  $\varphi_v$ ,  $\varphi_D$ ,  $T_c$  e  $T_d$ , e quindi dei fattori di amplificazione.

## 4.4 ELABORAZIONI NUMERICHE

Lo scopo di queste elaborazioni numeriche è quello di riproporre le relazioni estratte dallo spettro tripartito mediante i valori trovati dai 344 sismi presenti nel database riportato in appendice, cioè di verificare tali relazioni per sismi appartenenti al terreno di tipo 'B', ed eventualmente di proporre nuovi coefficienti, per tale tipo di terreno, che colgano in modo più preciso le relazioni viste.

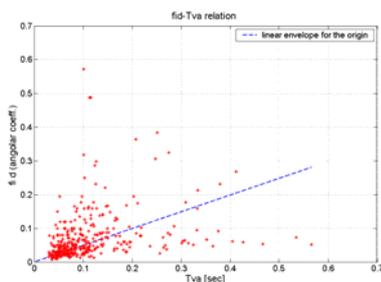
### 4.4.1 VALUTAZIONE DI $\varphi_D$

Per ogni singolo sisma del database è stata creata un'interpolazione lineare, passante per l'origine, come illustrato nel paragrafo 4.3. Ricavati tutti i valori di  $\varphi_D$ , questi sono stati messi in relazione con le grandezze note, in particolare sono stati calcolati i coefficienti di correlazione  $\rho$ , riportati in tabella 4.1:

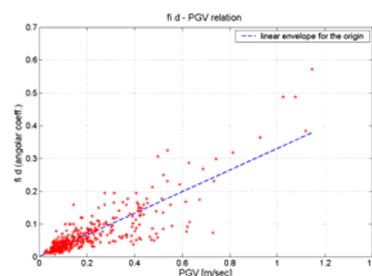
	$\varphi_D$ -PGA	$\varphi_D$ -PGV	$\varphi_D$ -PGD	$\varphi_D$ - $T_{VA}$	$\varphi_D$ - $T_{DV}$
$\rho$	0,66	0,85	0,395	0,27	0,056

Tabella 4.1: coefficienti di correlazione  $\rho$

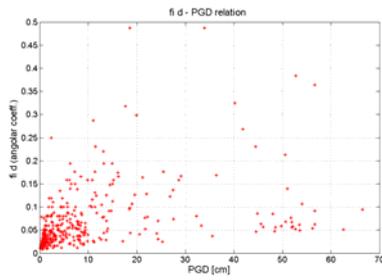
In figura 4.12 si riportano le relazione tra  $\varphi_D$  e grandezze note, quali  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $T_{VA}$  e  $T_{DV}$  :



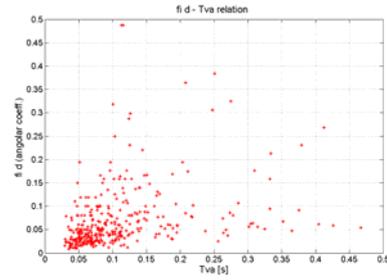
(a)  $\varphi_D - PGA$



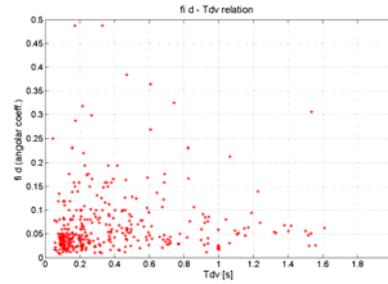
(b)  $\varphi_D - PGV$



(c)  $\varphi_D - PGD$



(d)  $\varphi_D - T_{VA}$



(e)  $\varphi_D - T_{DV}$

Figura 4.12:  $\varphi_D - PGA$  (a),  $\varphi_D - PGV$  (b),  $\varphi_D - PGD$  (c),  
 $\varphi_D - T_{VA}$  (d),  $\varphi_D - T_{DV}$  (e)

Figura 4.12 (a) : la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$\varphi_D = 0,32 PGA \quad (4.40)$$

Figura 4.12 (b) : la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$\varphi_D = 0,33 PGV \quad (4.41)$$

Dallo studio si può notare che si ha solamente una buona correlazione tra  $\varphi_D$  e  $PGV$ , con un coefficiente di correlazione  $\rho=0.85$ , e questo fatto conferma la bontà della schematizzazione del tripartito, in quanto dalla formula (4.5) ricavata teoricamente c'è proprio una relazione diretta tra  $\varphi_D$  e  $PGV$ .

#### 4.4.2 VALUTAZIONE DI $\varphi_V$

Per ogni singolo sisma del database è stata creata un'interpolazione lineare, passante per l'origine, come illustrato nel paragrafo 4.3.

Ricavati tutti i valori di  $\varphi_V$ , questi sono stati messi in relazione con le grandezze note, in particolare sono stati calcolati i coefficienti di correlazione  $\rho$ , riportati in tabella 4.2:

	$\varphi_V$ -PGA	$\varphi_V$ -PGV	$\varphi_V$ -PGD	$\varphi_V$ - $T_{VA}$	$\varphi_V$ - $T_{DV}$
$\rho$	0,924	0,523	0,025	-0,22	-0,196

Tabella 4.2: coefficienti di correlazione  $\rho$

In figura 4.13 si riportano le relazioni tra  $\varphi_V$  e grandezze note, quali  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $T_{VA}$  e  $T_{DV}$ :

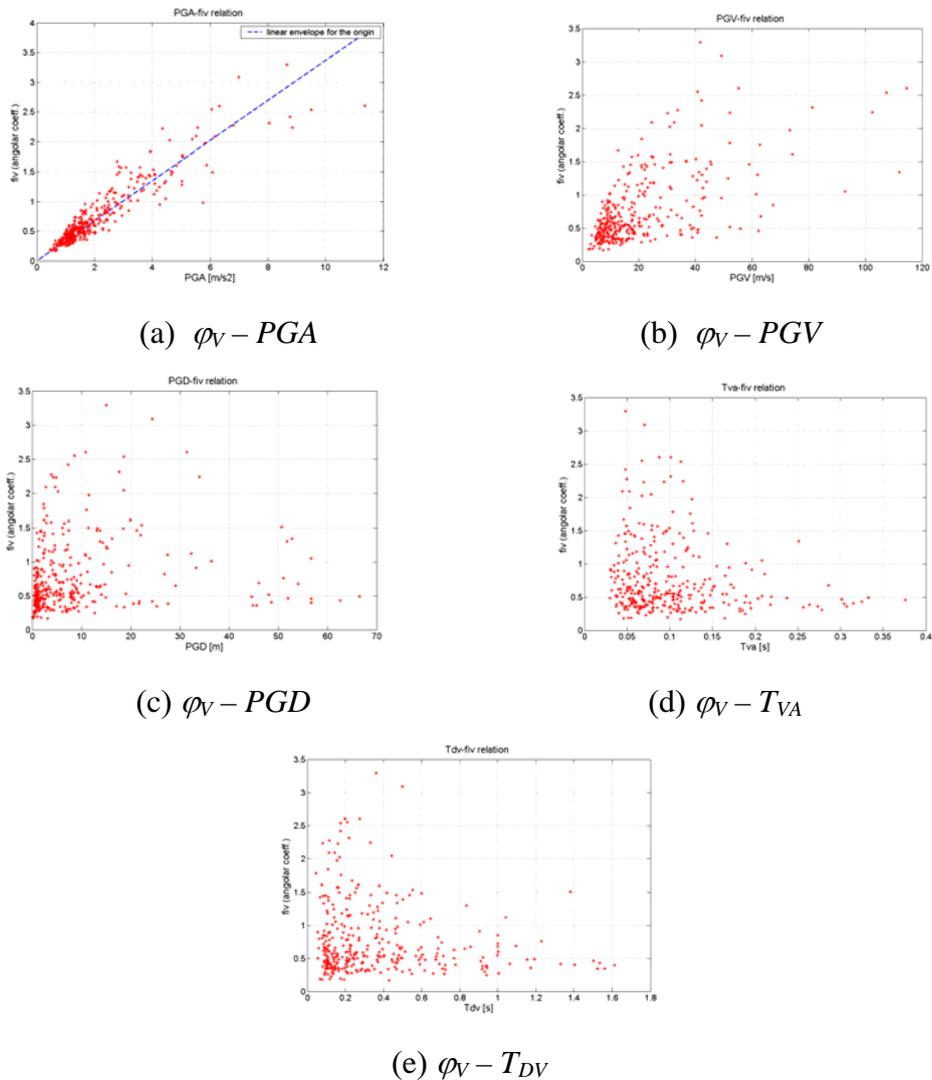


Figura 4.13:  $\varphi_V - PGA$  (a),  $\varphi_V - PGV$  (b),  $\varphi_V - PGD$  (c),  $\varphi_V - T_{VA}$  (d),  $\varphi_V - T_{DV}$  (e)

Figura 4.13 (a) : la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$\varphi_V = 0,337 PGA \quad (4.42)$$

Dallo studio si può notare che si ha solamente una buona correlazione tra  $\varphi_V$  e  $PGA$ , con un coefficiente di correlazione  $\rho=0.92$ , e questo fatto conferma la bontà della schematizzazione del tripartito, in quanto dalla formula (4.18) ricavata teoricamente c'è proprio una relazione diretta tra  $\varphi_V$  e  $PGA$ .

#### 4.4.3 VALUTAZIONE DI $\varphi_A$

Per ogni singolo sisma del database è stata creata un'interpolazione lineare come illustrato nel paragrafo 4.3.

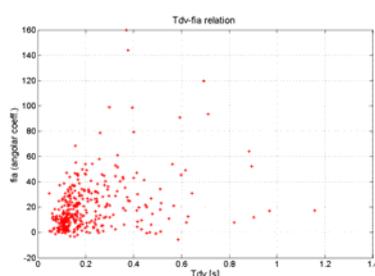
Ricavati tutti i valori di  $\varphi_A$ , questi sono stati messi in relazione con le grandezze note, in particolare sono stati calcolati i coefficienti di correlazione  $\rho$ , riportati in tabella 4.3:

	$\varphi_A$ -PGA	$\varphi_A$ -PGV	$\varphi_A$ -PGD	$\varphi_A$ -T <sub>V</sub> A	$\varphi_A$ -T <sub>D</sub> V
$\rho$	0,33	0,03	-0,121	-0,268	-0,22

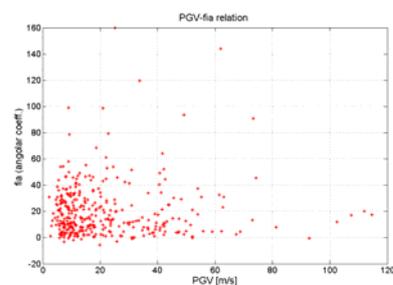
Tabella 4.3: coefficienti di correlazione  $\rho$

Dalla tabella si può notare che il valore di  $\varphi_A$  è poco correlato con i parametri riportati.

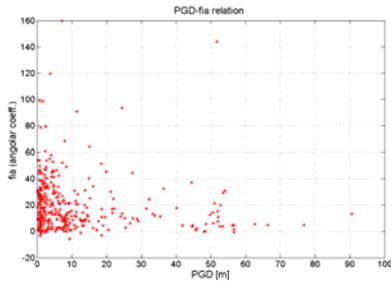
In figura 4.14 si riportano le relazioni tra  $\varphi_A$  e grandezze note:



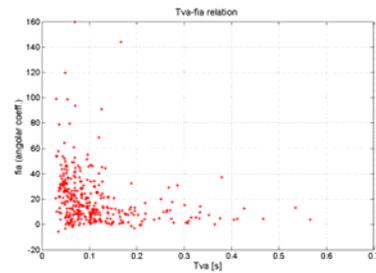
(a)  $\varphi_A - PGA$



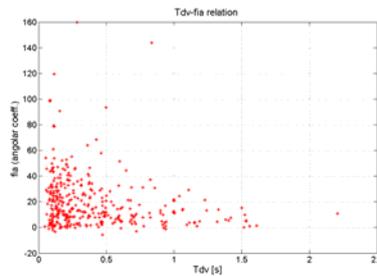
(b)  $\varphi_A - PGV$



(c)  $\varphi_A - PGD$



(d)  $\varphi_A - T_{VA}$



(e)  $\varphi_A - T_{DV}$

Figura 4.14:  $\varphi_A - PGA$  (a),  $\varphi_A - PGV$  (b),  $\varphi_A - PGD$  (c),  
 $\varphi_A - T_{VA}$  (d),  $\varphi_A - T_{DV}$  (e)

Dallo studio si può notare che non si hanno correlazioni soddisfacenti tra  $\varphi_A$  e gli altri parametri, infatti dalle formule ricavate del tripartito non ve ne sono che legano direttamente  $\varphi_A$  con un'altra grandezza.

#### 4.4.4 VALUTAZIONE DI $T_d$

Per ogni singolo sisma è stato valutato graficamente quel periodo  $T_d$  in cui avviene il passaggio dal tratto lineare al tratto costante nello spettro di risposta degli spostamenti, come illustrato nel paragrafo 4.3.

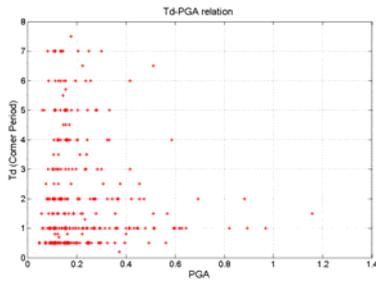
Per 53 registrazioni non è stato possibile individuare un punto di ginocchio in quanto lo spettro continuava a salire oltre il periodo massimo (10 secondi).

Ricavati i valori di  $T_d$ , questi sono stati messi in relazione con le grandezze note, in particolare sono stati calcolati i coefficienti di correlazione  $\rho$  riportati in tabella 4.4:

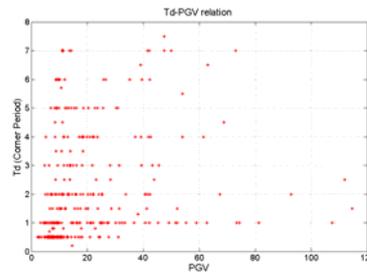
	$T_d$ -PGA	$T_d$ -PGV	$T_d$ -PGD	$T_d$ - $T_{VA}$	$T_d$ - $T_{DV}$
$\rho$	-0,106	0,201	0,56	0,486	0,82

Tabella 4.4: coefficienti di correlazione  $\rho$

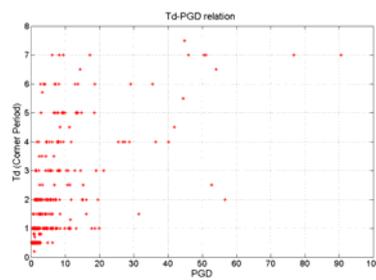
In figura 4.15 si riportano le relazioni tra  $T_d$  e le grandezze note:



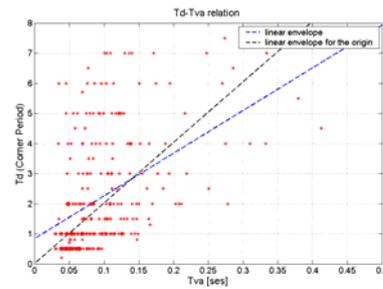
(a)  $T_d - PGA$



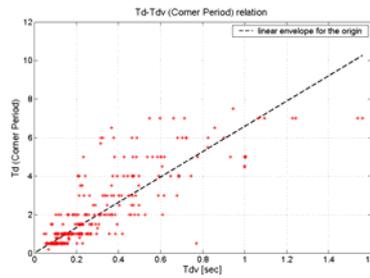
(b)  $T_d - PGV$



(c)  $T_d - PGD$



(d)  $T_d - T_{VA}$



(e)  $T_d - T_{DV}$

Figura 4.15:  $T_d - PGA$  (a),  $T_d - PGV$  (b),  $T_d - PGD$  (c),  
 $T_d - T_{VA}$  (d),  $T_d - T_{DV}$  (e)

Figura 4.15 (d) : la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$T_d = 20 T_{VA} \quad (4.43)$$

la retta di regressione lineare è del tipo:

$$T_d = 0.83 + 14.2 T_{VA} \quad (4.44)$$

Figura 4.15 (e) : la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$T_d = 6.57 T_{DV} \quad (4.45)$$

Dallo studio si può notare che si ha solamente una buona correlazione tra  $T_d$  e  $T_{DV}$ , con un coefficiente di correlazione  $\rho=0.82$ , e questo fatto conferma la bontà della schematizzazione del tripartito, in quanto dalla formula (4.14) ricavata teoricamente c'è proprio una relazione diretta tra  $T_d$  e  $T_{DV}$ .

Dallo studio dei valori di  $T_d$  trovati si nota che il valor medio è circa 2.2 sec.

#### 4.4.5 VALUTAZIONE DI $T_c$

Per ogni singolo sisma è stato valutato graficamente quel periodo  $T_c$  per cui avviene il passaggio dal tratto lineare al tratto costante nello spettro di risposta delle pseudo-velocità, come illustrato nel paragrafo 4.3.

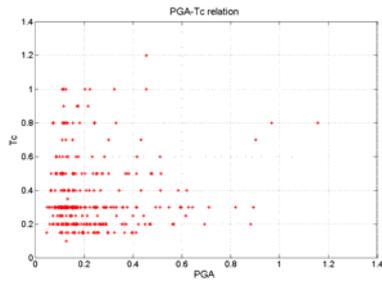
Per 39 registrazioni non è stato possibile individuare un punto di ginocchio in quanto lo spettro presentava una forma tale per cui la valutazione di tale punto era molto incerta.

Ricavati i valori di  $T_c$ , questi sono stati messi in relazione con le grandezze note, in particolare sono stati calcolati i coefficienti di correlazione  $\rho$  riportati in tabella 4.5:

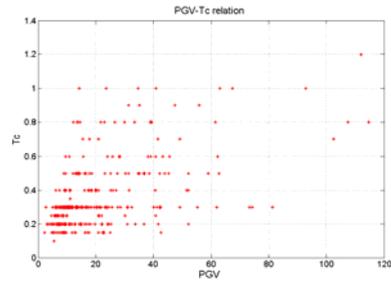
	$T_c$ -PGA	$T_c$ -PGV	$T_c$ -PGD	$T_c$ - $T_{VA}$	$T_c$ - $T_{DV}$
$\rho$	0,06	0,535	0,602	0,67	0,437

Tabella 4.5: coefficienti di correlazione  $\rho$

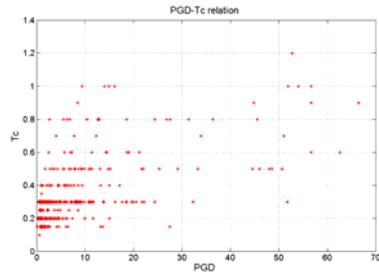
In figura 4.16 si riportano le relazioni tra  $T_c$  e le grandezze note:



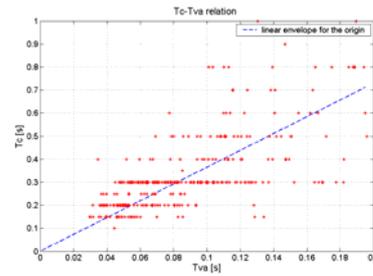
(a)  $T_c - PGA$



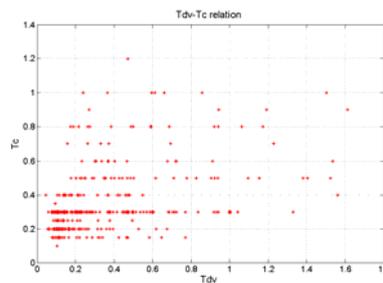
(b)  $T_c - PGV$



(c)  $T_c - PGD$



(d)  $T_c - T_{VA}$



(e)  $T_c - T_{DV}$

Figura 4.16:  $T_c - PGA$  (a),  $T_c - PGV$  (b),  $T_c - PGD$  (c),  
 $T_c - T_{VA}$  (d),  $T_c - T_{DV}$  (e)

Figura 4.16 (d) : la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$T_c = 3.65 T_{VA} \quad (4.46)$$

Dallo studio si può notare che si ha solamente una buona correlazione tra  $T_c$  e  $T_{VA}$ , con un coefficiente di correlazione  $\rho=0.67$ , e questo fatto conferma la bontà della schematizzazione del tripartito, in quanto dalla formula (4.28) ricavata teoricamente c'è proprio una relazione diretta tra  $T_c$  e  $T_{VA}$ .

#### 4.4.6 VALUTAZIONE DI $S_{d,max}$

Per ogni singolo sisma è stato calcolato il valore massimo dello spostamento  $S_{d,max}$ , cioè il valore dello spostamento nel punto  $d$  di figura 4.5, dove inizia il tratto costante. E' stato calcolato mediante la formula:  $S_{d,max} = \varphi_D \cdot T_d$

Con i valori di  $\varphi_D$  e di  $T_d$  ricavati come illustrato nel paragrafo 4.3.

La correlazione che interessa  $S_{d,max}$  riguarda la grandezza  $PGD$ , quindi è stato calcolato il coefficiente di correlazione  $\rho$  che risulta pari a 0.856, quindi le due grandezze sono molto correlate.

Può essere interessante trovare una relazione che leghi  $S_{d,max}$  e  $PGD$ , riguardo la progettazione strutturale secondo l'approccio agli spostamenti, poiché dando il valore di  $PGD$  sarebbe possibile individuare il punto d'inizio ( $d$ ) del tratto costante di figura 4.5, in alternativa a fornire il valore del periodo  $T_d$ .

In figura 4.17 si riporta la relazione  $S_{d,max} - PGD$  e le relative interpolazioni lineari:

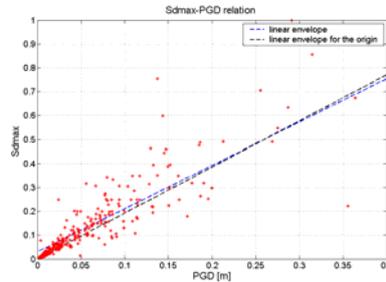


Figura 4.17:  $S_{d,max} - PGD$

Figura 4.17: la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$S_{d,max} = 1.92 PGD \quad (4.47)$$

la retta di regressione lineare è del tipo:

$$S_{d,max} = 0.03 + 1.8 PGD \quad (4.48)$$

#### 4.4.7 FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

##### A. VALUTAZIONE DIRETTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

Dalle formule riportate di seguito è possibile ottenere una stima diretta dei valori dei fattori di amplificazione.

###### A.1 $\varphi_V - PGA$

Utilizzando le equazioni (4.18) e (4.42):

$$\begin{cases} \varphi_V = \frac{\alpha_A}{2\pi} \cdot PGA \\ \varphi_V = 0,337 \cdot PGA \quad \text{coefficiente di correlazione } \rho=0,92 \end{cases}$$

Uguagliando le equazioni:  $\frac{\alpha_A}{2\pi} = 0,337$  , da cui:  $\alpha_A = 2\pi \cdot 0,337$  ,

Quindi:  $\alpha_A = 2,11$  (4.49)

###### A.2 $\varphi_D - PGV$

Utilizzando le equazioni (4.5) e (4.41):

$$\begin{cases} \varphi_D = \frac{\alpha_V}{2\pi} \cdot PGV \\ \varphi_D = 0,33 \cdot PGV \quad \text{coefficiente di correlazione } \rho=0,85 \end{cases}$$

Uguagliando le equazioni:  $\frac{\alpha_V}{2\pi} = 0,33$  , da cui:  $\alpha_V = 2\pi \cdot 0,33$  ,

Quindi:  $\alpha_V = 2,07$  (4.50)

### A.3 $S_{d,max} - PGD$

Utilizzando le equazioni (4.15) e (4.47):

$$\begin{cases} S_{d,max} = \alpha_D \cdot PGD \\ S_{d,max} = 1,92 \cdot PGD \end{cases} \quad \text{coefficiente di correlazione } \rho=0,85$$

Uguagliando le equazioni:

$$\alpha_D = 1,92$$

(4.51)

## B. VALUTAZIONE INDIRETTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

Dalle formule riportate di seguito, ottenute dai valori dei periodi  $T_d$  e  $T_c$ , è possibile ottenere delle relazioni che legano tra loro due fattori di amplificazione, avendo così un'ulteriore stima e controllo dei fattori a partire dai valori appena trovati (4.49), (4.50) e (4.51).

### B.1 $T_d - T_{DV}$

Utilizzando le equazioni (4.14) e (4.45):

$$\begin{cases} T_d = 2\pi \cdot \frac{\alpha_D}{\alpha_V} \cdot T_{DV} \\ T_d = 6,57 \cdot T_{DV} \end{cases} \quad \text{coefficiente di correlazione } \rho=0,82$$

Uguagliando le equazioni:  $2\pi \cdot \frac{\alpha_D}{\alpha_V} = 6,57$

Quindi:

$$\alpha_D = 6,57 \cdot \frac{\alpha_V}{2\pi}$$

(4.52)

Da cui si deduce che  $\alpha_D \approx \alpha_V$  .

$$\text{Se si pone } \alpha_D = 1,92 \quad \text{si ricava } \alpha_V = 1,84 \quad (4.53)$$

$$\text{Se si pone } \alpha_V = 2,07 \quad \text{si ricava } \alpha_D = 2,16 \quad (4.54)$$

Dalla (4.53) si nota come il valore di  $\alpha_V$  cala rispetto al valore (4.50), mentre dalla (4.54) si nota come il valore di  $\alpha_D$  aumenta rispetto al valore (4.51).

Questi ultimi due valori di  $\alpha_V$  e  $\alpha_D$  sono meno attendibili di quelli ricavati precedentemente. Infatti questi sono legati tra loro dalla relazione (4.52) e vengono ricavati reciprocamente, quindi oltre all'incertezza presente nella relazione tra  $T_d$  e  $T_{DV}$  ( $\rho=0,82$ ) bisogna tener conto di quella presente nelle relazioni precedenti utilizzate per ricavare rispettivamente  $\alpha_D$  ( $\rho=0,85$ ) e  $\alpha_V$  ( $\rho=0,85$ ).

## B.2 $T_c - T_{VA}$

Utilizzando le equazioni (4.28) e (4.46):

$$\begin{cases} T_c = 2\pi \cdot \frac{\alpha_V}{\alpha_A} \cdot T_{VA} \\ T_c = 3,65 \cdot T_{VA} \end{cases} \quad \text{coefficiente di correlazione } \rho=0,67$$

$$\text{Uguagliando le equazioni: } 2\pi \cdot \frac{\alpha_V}{\alpha_A} = 3,65$$

$$\text{Quindi: } \boxed{\alpha_V = 3,65 \cdot \frac{\alpha_A}{2\pi}} \quad (4.55)$$

$$\text{Da cui si deduce che } \alpha_V \approx \frac{1}{2} \alpha_A$$

$$\text{Se si pone } \alpha_A = 2,11 \text{ si ricava } \alpha_V = 1,23 \quad (4.56)$$

$$\text{Se si pone } \alpha_V = 2,07 \text{ si ricava } \alpha_A = 3,63 \quad (4.57)$$

$$\text{Se si pone } \alpha_V = 1,84 \text{ si ricava } \alpha_A = 3,16 \quad (4.58)$$

Dalla (4.56) viene confermata la tendenza a calare del valore di  $\alpha_V$  rispetto al valore (4.50). Dalle (4.56) e (4.57) si nota la tendenza di  $\alpha_A$  ad aumentare rispetto al valore (4.49).

Questi ultimi valori di  $\alpha_A$  e  $\alpha_V$  sono meno attendibili di quelli ricavati precedentemente. Infatti questi sono legati tra loro dalla relazione (4.55) e vengono ricavati reciprocamente, quindi oltre all'incertezza presente nella relazione tra  $T_c$  e  $T_{VA}$  ( $\rho=0,67$ ) bisogna tener conto di quella presente nelle relazioni precedenti utilizzate per ricavare rispettivamente  $\alpha_V$  ( $\rho=0,85$ ) e  $\alpha_A$  ( $\rho=0,92$ ).

### C. RANGE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

Considerando le formule (4.49), (4.50), (4.51), (4.52) e (4.55) è possibile ottenere una stima degli intervalli (range) all'interno dei quali possono variare i valori dei fattori di amplificazione.

Vengono così definiti i seguenti range:

$$2.11 < \alpha_A < 3.30 \quad (4.59)$$

$$1.23 < \alpha_V < 2.07 \quad (4.60)$$

$$1.92 < \alpha_D < 2.16 \quad (4.61)$$

### D. CONFRONTO

Ci si propone ora di confrontare tali range con i valori dei fattori proposti nel 'Chopra' [12], ricavati da *Newmark* e *Hall* [21], rappresentati in figura 4.4.

	$\alpha_A$	$\alpha_V$	$\alpha_D$
Chopra	2,12	1,65	1,59
range proposto	2,11 - 3,30	1,23 - 2,07	1,92 - 2,16

Tabella 4.6: confronto

I valori medi dei range proposti sono:

$$\alpha_A \approx 2.7 \quad (4.62)$$

$$\alpha_V \approx 1.65 \quad (4.63)$$

$$\alpha_D \approx 2.05 \quad (4.64)$$

Si riporta nella tabella 4.7 il confronto di tali valori medi con quelli proposti nel *Chopra* [12]:

	$\alpha_A$	$\alpha_V$	$\alpha_D$
Chopra	2,12	1,65	1,59
valori medi dei range	2,7	1,65	2,05

Tabella 4.7: confronto.

Si nota che:

- $\alpha_A$  aumenta,
- $\alpha_V$  rimane uguale,
- $\alpha_D$  aumenta.

La figura 4.18 rappresenta lo spettro tripartito: in nero è rappresentato lo spettro con i fattori proposti dal *Chopra* [12], mentre in rosso lo spettro con i fattori proposti in questo lavoro (mantenendo gli stessi valori di *PGA*, *PGV* e *PGD*).

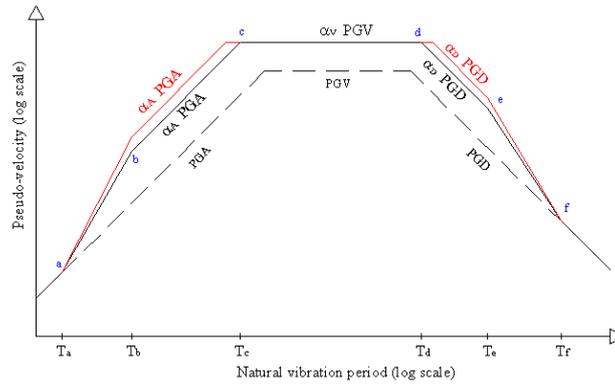


Figura 4.18: variazione del tripartito.

## 4.5 LO SPETTRO DEGLI SPOSTAMENTI

Lo scopo di questo paragrafo è quello di fornire le relazioni necessarie alla costruzione dello spettro di risposta degli spostamenti, schematizzabile come in figura 4.19:

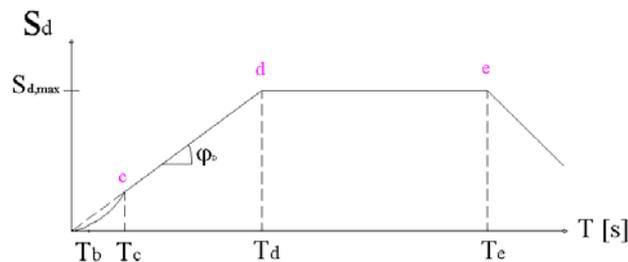


Figura 4.19: schematizzazione dello spettro degli spostamenti.

Non si considera il periodo  $T_e$  perché assume valori che non interessano la pratica progettuale. Si ottiene così il seguente spettro (figura 4.20):

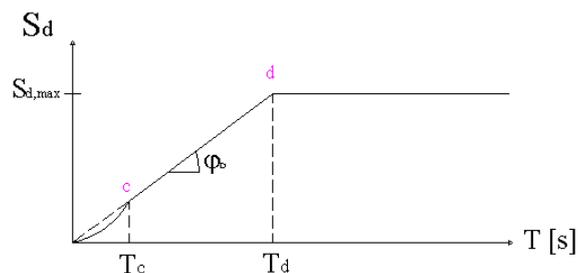


Figura 4.20: schematizzazione dello spettro degli spostamenti.

Per la costruzione dello spettro è necessario fornire:

- il coefficiente angolare  $\varphi_D$ , in modo da determinare l'inclinazione del tratto lineare;
- il periodo  $T_c$ , per determinare l'inizio del tratto lineare;
- il periodo  $T_d$ , o lo spostamento  $S_{d,max}$ , per determinare l'inizio del tratto costante.

#### 4.5.2 $\varphi_D$

Sperimentalmente è stata trovata la relazione (4.41):

$$\varphi_D = 0,33 \cdot PGV \quad \text{con un coefficiente di correlazione } \rho=0,85.$$

Siccome è possibile avere informazioni valide anche sulla  $PGA$ , e si è visto che questa è abbastanza correlata con  $\varphi_D$  (coefficiente di correlazione  $\rho=0,66$ ), si è provato a studiare la correlazione tra  $\varphi_D$  e il prodotto  $PGA^x \cdot PGV$ , del tipo quindi  $PGA^y \cdot T_{VA}$ , con particolare attenzione al miglioramento del coefficiente di correlazione.

1) La prima soluzione pensata riguarda la relazione tra  $\varphi_D$  e  $PGA \cdot PGV$ , cioè tra  $\varphi_D$  e  $PGA^2 \cdot T_{VA}$ .

Si è trovato un coefficiente di correlazione  $\rho=0,84$ , simile a quello relativo alla coppia  $\varphi_D - PGV$ , quindi non si introduce nessun miglioramento.

In figura 4.21 si riporta la relazione  $\varphi_D - PGA^2 \cdot T_{VA}$  e le relative interpolazioni lineari:

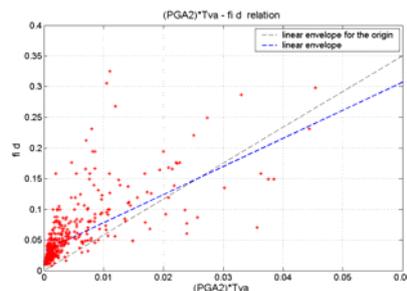


Figura 4.21:  $\varphi_D - PGA^2 \cdot T_{VA}$

Figura 4.21: la retta di regressione lineare è del tipo:

$$\varphi_D = 0.032 + 4.6 PGA^2 T_{VA} \quad (4.65)$$

la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$\varphi_D = 5.85 PGA^2 T_{VA} \quad (4.66)$$

ma dalla figura 4.21 si nota come questa regressione sia inappropriata, soprattutto per bassi valori dell'ascissa.

- 2) Considerando il prodotto  $PGA^y \cdot T_{VA}$ , il valore di  $y$  che massimizza il coefficiente di correlazione tra  $\varphi_D$  e  $PGA^y \cdot T_{VA}$  è pari a 1.5.

Infatti considerando la relazione  $\varphi_D - PGA^{1.5} \cdot T_{VA}$  si trova un coefficiente di correlazione  $\rho=0.88$ , maggiore di quello che si aveva utilizzando la sola informazione su  $PGV$ . Il prodotto è del tipo  $PGA^{0.5} \cdot PGV$ , quindi si può notare che l'informazione principale è relativa alla  $PGV$ , ma introducendo una piccola (perché elevata allo 0.5) informazione sulla  $PGA$  il risultato migliora. Si riporta in figura 4.22 tale relazione e le relative interpolazioni lineari:

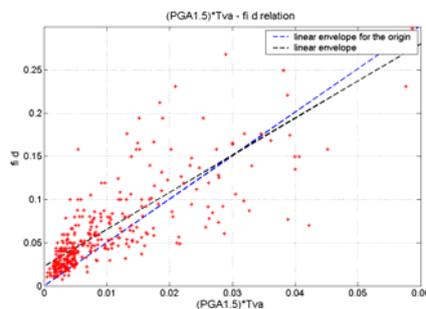


Figura 4.22:  $\varphi_D - PGA^{1.5} \cdot T_{VA}$

Figura 4.22: la retta di regressione lineare per l'origine è del tipo:

$$\varphi_D = 5 PGA^{1.5} T_{VA} \quad (4.67)$$

la retta di regressione lineare è del tipo:

$$\varphi_D = 0.022 + 4.3 PGA^{1.5} T_{VA} \quad (4.68)$$

dalla figura si nota che questa è migliore di quella passante per l'origine poiché coglie meglio il comportamento relativo a bassi valori di ascisse.

In conclusione si può ottenere  $\varphi_D$  dalla (4.41) o dalla (4.68) :

$$\varphi_D = 0,33 \cdot PGV \quad (\rho=0,85)$$

$$\varphi_D = 4.3 \cdot PGA^{1.5} \cdot T_{VA} + 0.022 \quad (\rho=0,88)$$

Con:

$PGA$  espresso in  $g$  ( $= 9.81 \text{ m/s}^2$ );

$PGV$  espresso in  $m/s$ ;

$T_{VA}$  espresso in  $s$ .

### 4.5.3 $T_c$

Sperimentalmente è stata trovata la relazione (4.46):

$$T_c = 3.65 T_{VA} \quad (\rho=0,67)$$

Con:

$T_c$  espresso in  $s$ .

$T_{VA}$  espresso in  $s$ .

### 4.5.4 $T_d$

Sperimentalmente sono state trovate le relazioni (4.43) e (4.45):

$$T_d = 20 T_{VA} \quad (\rho=0,48)$$

$$T_d = 6.57 T_{DV} \quad (\rho=0,82)$$

Con:

$T_{VA}$  espresso in  $s$ .

$T_{DV}$  espresso in  $s$ .

#### 4.5.5 $S_{d,max}$

Sperimentalmente è stata trovata la relazione (4.47):

$$S_{d,max} = 1,92 \cdot PGD \quad (\rho=0,85)$$

Con:

$S_{d,max}$  espresso in  $m$ .

$PGD$  espresso in  $m$ .

#### 4.5.6 COSTRUZIONE DELLO SPETTRO

Facendo riferimento alla figura 4.20, si suggerisce uno spettro degli spostamenti individuato dalle seguenti equazioni:

$$0 \leq T \leq T_c : \quad S_d(T) = \frac{\varphi_D}{T_c} \cdot T^2 \quad (4.69)$$

$$T_c \leq T \leq T_d : \quad S_d(T) = \varphi_D \cdot T \quad (4.70)$$

$$T \geq T_d : \quad S_d(T) = \varphi_D \cdot T_d \quad (4.71)$$

$$\text{oppure} \quad S_d(T) = S_{d,max} \quad (4.72)$$

Dove:

$S_d(T)$  è lo spettro di risposta elastico in termini di spostamento.

$T$  è il periodo di vibrazione di un sistema ad un grado di libertà (*SDOF*).

$\varphi_D$  è dato da:

$$\varphi_D = 0,33 \cdot PGV \quad (\rho=0,85) \quad \text{oppure}$$

$$\varphi_D = 4,3 \cdot PGA^{1,5} \cdot T_{VA} + 0,022 \quad (\rho=0,88).$$

$T_c$  è dato da:

$$T_c = 3,65 T_{VA} \quad (\rho=0,67).$$

$T_d$  è dato da:

$$T_d = 20 T_{VA} \quad (\rho = 0,48) \quad \text{oppure}$$

$$T_d = 6.57 T_{DV} \quad (\rho = 0,82).$$

$S_{d,max}$  è dato da:

$$S_{d,max} = 1,92 \cdot PGD \quad (\rho = 0,85)$$

Da queste formule si può percepire l'importanza dei parametri  $PGV$  e  $PGD$ , oltre che  $PGA$ , nella forma dello spettro di risposta degli spostamenti. Infatti  $PGV$  influenza l'inizio ( $T_c$ ) del tratto lineare e la sua inclinazione ( $\varphi_D$ ), mentre  $PGD$  influenza l'inizio ( $T_d$ ) del tratto costante e di conseguenza l'entità dello spostamento massimo.

#### 4.5.7 APPLICAZIONI NUMERICHE

Si vuole costruire, a titolo di esempio, lo spettro degli spostamenti schematizzato di un sisma realmente avvenuto, e confrontarlo con lo spettro reale, ricavato dalle analisi.

- 1) Si considera l'evento sismico *Cape Mendocino* registrato nella stazione 89509 *Eureka – Myrtle & West*. I parametri sismici, ricavati dal database in appendice, sono:

$$PGA = 0.154 \text{ g}$$

$$PGV = 0.202 \text{ m/s}$$

$$PGD = 0.0589 \text{ m}$$

$$T_{VA} = 0.134 \text{ s}$$

$$T_{DV} = 0.292 \text{ s}$$

Utilizzando le formule proposte, in particolare quelle con i coefficienti di correlazione più elevati, si trova:

$$T_c = 3,65 \cdot T_{VA} = 0.49 \approx 0.5 \text{ s}$$

$$\varphi_D = 4.3 \cdot PGA^{1.5} \cdot T_{VA} + 0.022 = 0.0568$$

$$T_d = 6,57 \cdot T_{DV} = 1.9 \approx 2 \text{ s}$$

In figura 4.23 si riporta il confronto tra lo spettro reale, raffigurato in nero, e lo spettro di risposta schematizzato, in rosso, ricavato con le formule proposte nel paragrafo 4.5.6. Si osserva una buona schematizzazione.

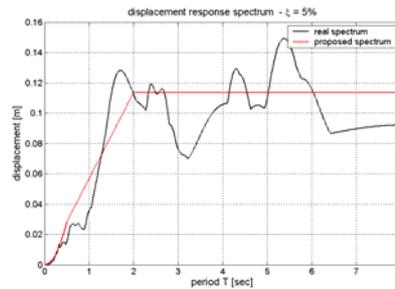


Figura 4.23: confronto tra spettro reale (nero) e spettro schematizzato (rosso).

- 2) Si considera l'evento sismico *Chi Chi Taiwan* registrato nella stazione *HWA033*. I parametri sismici, ricavati dal database in appendice, sono:

$$PGA = 0.167 \text{ g}$$

$$PGV = 0.17 \text{ m/s}$$

$$PGD = 0.08 \text{ m}$$

$$T_{VA} = 0.104 \text{ s}$$

$$T_{DV} = 0.474 \text{ s}$$

Utilizzando le formule proposte, in particolare quelle con i coefficienti di correlazione più elevati, si trova:

$$T_c = 3,65 \cdot T_{VA} \approx 0.38 \text{ s}$$

$$\varphi_D = 4.3 \cdot PGA^{1.5} \cdot T_{VA} + 0.022 = 0.0525$$

$$T_d = 6,57 \cdot T_{DV} \approx 3.1 \text{ s}$$

In figura 4.24 si riporta il confronto tra lo spettro reale, raffigurato in nero, e lo spettro di risposta schematizzato, in rosso, ricavato con le formule proposte nel paragrafo 4.5.6. Si osserva una buona schematizzazione.

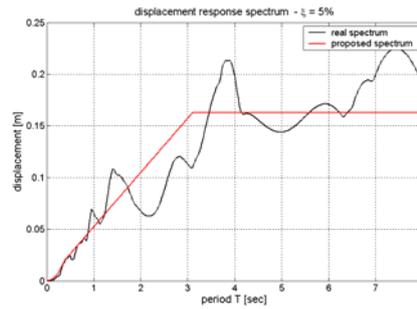


Figura 4.24: confronto tra spettro reale (nero) e spettro schematizzato (rosso).

- 3) Si considera l'evento sismico *Northridge* registrato nella stazione *24389 LA - Century City CC North*. I parametri sismici, ricavati dal database in appendice, sono:

$$PGA = 0.222 \text{ g}$$

$$PGV = 0.252 \text{ m/s}$$

$$PGD = 0.057 \text{ m}$$

$$T_{VA} = 0.1116 \text{ s}$$

$$T_{DV} = 0.226 \text{ s}$$

Utilizzando le formule proposte, in particolare quelle con i coefficienti di correlazione più elevati, si trova:

$$T_c = 3,65 \cdot T_{VA} \approx 0.4 \text{ s}$$

$$\varphi_D = 4.3 \cdot PGA^{1.5} \cdot T_{VA} + 0.022 = 0.074$$

$$T_d = 6,57 \cdot T_{DV} \approx 1.5 \text{ s}$$

In figura 4.25 si riporta il confronto tra lo spettro reale, raffigurato in nero, e lo spettro di risposta schematizzato, in rosso, ricavato con le formule proposte nel paragrafo 4.5.6. Si osserva una buona schematizzazione

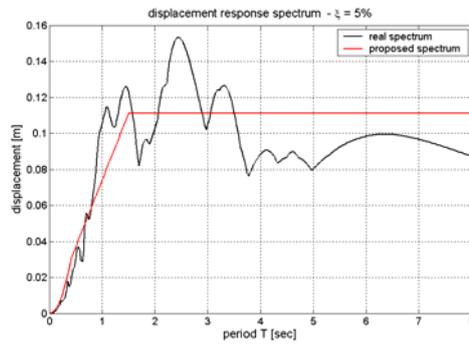


Figura 4.25: confronto tra spettro reale (nero) e spettro schematizzato (rosso).

#### 4.5.8 COMMENTO FINALE

Per quanto affermato nel capitolo 3, in particolare nel paragrafo 3.4.4, gli unici parametri sismici che attualmente possono interessare la progettazione sono  $PGA$  e  $PGV$ , poiché sono i soli ad avere delle leggi di attenuazione sperimentali, quindi per ora è possibile utilizzare esclusivamente le formule proposte in cui compaiono  $PGA$ ,  $PGV$  e  $T_{VA}$ , cioè le (4.41) (4.43) (4.46) e (4.68), scartando così quelle in cui sono presenti  $PGD$  e  $T_{DV}$ , cioè le (4.45) e (4.47).

# CAPITOLO 5

## CONFRONTO TRA GLI SPETTRI DI RISPOSTA

### 5.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo si vogliono confrontare i seguenti spettri di risposta degli spostamenti per un sistema elastico lineare *SDOF*, con smorzamento del 5%, su un terreno di tipo 'B':

- spettro di risposta reale medio, considerando come input un gruppo di sismi caratterizzati da valori definiti di *PGA* e *PGV*;
- spettro di risposta definito dalla normativa italiana;
- spettro di risposta proposto nel capitolo 4 (paragrafo 4.5.6).

Dal confronto di tali spettri si vuole verificare che lo spettro di risposta proposto sia una buona schematizzazione di quello reale, ma soprattutto si vuole mostrare l'importanza del parametro *PGV* nella forma dello spettro.

### 5.2 SPETTRO DEGLI SPOSTAMENTI REALE

In questo paragrafo si vuole costruire lo spettro di risposta degli spostamenti di un *SDOF*, con uno smorzamento del 5%, sottoposto ad un gruppo di sismi reali, registrati tutti su un terreno di tipo 'B', caratterizzati da valori di *PGA* e *PGV*, o meglio di *PGA* e  $T_{VA}$ , compresi in determinati intervalli.

#### 5.2.1 GRUPPO DI SISMI

Bisogna innanzitutto definire gli intervalli che caratterizzano le grandezze *PGA* e  $T_{VA}$ , in modo da scegliere i sismi che verranno utilizzati nell'analisi.

- *PGA*

Si considera una  $PGA=0.25g$  , con un fattore di scala  $\lambda$  tale che sia  $0.8 < \lambda < 1.2$  , quindi i valori di *PGA* sono compresi nell'intervallo  $0.20g < PGA < 0.30g$  . Gli accelerogrammi verranno poi scalati al valore  $PGA=0.25g$ .

-  $T_{VA}$

Si vogliono caratterizzare tre intervalli di  $T_{VA}$  : *L (Low)*, *N (Normal)*, *H (High)*. Il criterio utilizzato per tale determinazione è il seguente: viene considerato un gruppo di sismi, registrati su terreno 'B', e i tre intervalli vengono trovati imponendo un numero uguale di sismi in questi tre intervalli [3].

Si procede dapprima alla determinazione degli intervalli senza caratterizzare il valore di *PGA*, e in seguito caratterizzando vari valori di *PGA*, ma dalle analisi svolte si nota che gli intervalli sono circa gli stessi, come si può notare dalla tabella 5.1. Tale risultato poteva essere previsto dalle analisi di correlazione riportate nel capitolo 3, in cui è emersa una mancanza totale di correlazione tra *PGA* e  $T_{VA}$  ( $\rho = -0.161$ ).

<b>PGA</b>	<b><math>T_{VA}</math> [s]</b>		
	<b>L (Low)</b>	<b>N (Normal)</b>	<b>H (High)</b>
qualunque	< 0,078	0,078 - 0,12	> 0,12
0,35g (0,85<l<1,14)	< 0,06	0,06 - 0,115	> 0,115
0,25g (0,84<l<1,16)	< 0,058	0,058 - 0,099	> 0,099
0,15g (0,86<l<1,13)	< 0,064	0,064 - 0,1	> 0,1

Tabella 5.1

Siccome i valori sono simili possono essere uniformati per tutti i valori di *PGA*, come mostrato in tabella 5.2:

<b>PGA</b>	<b><math>T_{VA}</math> [s]</b>		
	<b>L (Low)</b>	<b>N (Normal)</b>	<b>H (High)</b>
<b>0,35g</b>	< 0,06	0,07 - 0,1	> 0,13
<b>0,25g</b>	< 0,06	0,07 - 0,1	> 0,13
<b>0,15g</b>	< 0,06	0,07 - 0,1	> 0,13

Tabella 5.2

In questo lavoro si sceglie di considerare l'intervallo  $N$  (*Normal*), caratterizzato quindi da un valore di  $T_{VA}$  compreso nell'intervallo  $0.07 s < T_{VA} < 0.1 s$

Dalle considerazioni appena fatte, le registrazioni che compongono il gruppo di sismi di lavoro sono raccolte nella tabella 5.3 [6] [7]:

<b>NOME SISMA</b>	<b>STAZIONE</b>	<b>PGA [g]</b>	<b>PGV [cm/s]</b>	<b>T<sub>VA</sub> [s]</b>
<b>Chi-Chi, Taiwan</b>	CHY086	0,204	17,8	0,089
<b>Imperial Valley</b>	5051 Parachute Test Site	0,204	16,1	0,080
<b>Kocaeli, Turkey</b>	Arcelik	0,218	17,7	0,083
<b>Landers</b>	23 Coolwater	0,283	25,6	0,092
<b>Loma Prieta</b>	1652 Anderson Dam (Downstream) (comp. X)	0,244	20,3	0,085
	1652 Anderson Dam (Downstream) (comp. y)	0,24	18,4	0,078
<b>Morgan Hill</b>	1652 Anderson Dam (Downstream)	0,289	27,6	0,097
<b>Northridge</b>	24389 LA - Century City CC North	0,256	21,1	0,084
	90015 LA - Chalon Rd	0,225	16,6	0,075
	90033 LA - Cypress Ave	0,21	17,3	0,084
	24688 LA - UCLA Grounds	0,278	22	0,081
	90009 N. Hollywood - Coldwater Can (comp.x)	0,298	25	0,086
	90009 N. Hollywood - Coldwater Can (comp.y)	0,271	22,2	0,084
	5108 Santa Susana Ground (comp. x)	0,279	19,4	0,071
	5108 Santa Susana Ground (comp. y)	0,29	19,7	0,069
<b>San Fernando</b>	24278 Castaic - Old Ridge Route	0,268	25,9	0,099
<b>Whittier Narrows</b>	14196 Inglewood - Union Oil	0,247	18,1	0,075
	24400 LA - Obregon Park	0,261	24	0,094

Tabella 5.3

## 5.2.2 SPETTRO DEGLI SPOSTAMENTI MEDIO

Mediante un'analisi sismica al calcolatore vengono costruiti gli spettri degli spostamenti per ogni registrazione, linee grigie tratteggiate in figura 5.1, e in

seguito viene ricavato lo spettro medio per il gruppo di sismi, linea nera in figura 5.1.

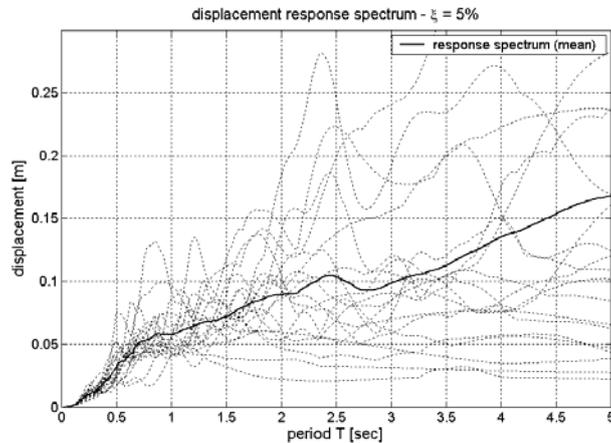


Figura 5.1: spettro degli spostamenti reale medio (linea nera)

### 5.3 LO SPETTRO DEGLI SPOSTAMENTI DELLA NORMATIVA ITALIANA

La normativa italiana fornisce le equazioni per la costruzione dello spettro delle pseudo-accelerazioni [15]:

$$0 \leq T \leq T_b \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T}{T_b} + \frac{0,4}{\eta} \left( 1 - \frac{T}{T_b} \right) \right] \quad (5.1)$$

$$T_b \leq T \leq T_c \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (5.2)$$

$$T_c \leq T \leq T_d \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left( \frac{T_c}{T} \right) \quad (5.3)$$

$$T_d \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left( \frac{T_c \cdot T_d}{T^2} \right) \quad (5.4)$$

Dove:

$S_e$  è l'accelerazione spettrale;

$T$  è il periodo di vibrazione;

$a_g$  è l'accelerazione del terreno (=PGA);

$S$  è un fattore che tiene conto della categoria del suolo di fondazione;

$\eta$  è un fattore che altera lo spettro elastico per smorzamenti viscosi convenzionali  $\xi$  diversi dal 5%;

$T_b, T_c, T_d$  sono i periodi che separano i diversi rami dello spettro, dipendenti dalla categoria del suolo di fondazione.

In questo lavoro si considera uno smorzamento del 5%, e un terreno di fondazione di tipo 'B', quindi la normativa fornisce i seguenti valori [15]:

$$S = 1,25;$$

$$\eta = 1;$$

$$T_b = 0,15 \text{ s};$$

$$T_c = 0,5 \text{ s};$$

$$T_d = 2 \text{ s}.$$

La normativa afferma inoltre che lo spettro di risposta elastico dello spostamento può ottenersi per trasformazione diretta dello spettro di risposta elastico delle accelerazioni, usando l'espressione (5.5) [15]:

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (5.5)$$

Come si può notare dalle (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4) lo spettro di risposta che si ottiene è caratterizzato esclusivamente dal valore della  $PGA$ , senza alcun riferimento ai valori della  $PGV$ .

Considerando una  $PGA=0.25g$ , come già esplicitato nel paragrafo 5.2.2, si ottiene lo spettro di risposta degli spostamenti rappresentato in figura 5.2.

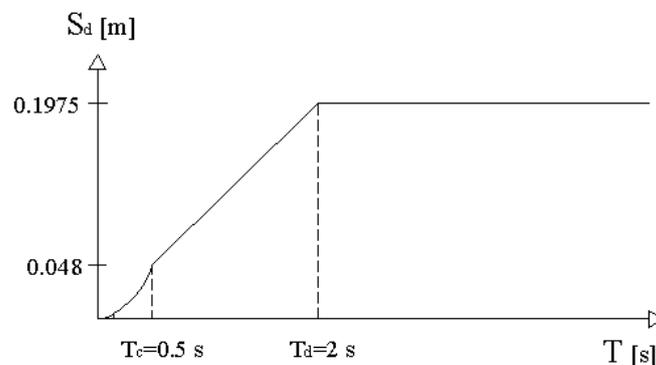


Figura 5.2: Spettro degli spostamenti da normativa, per  $PGA=0.25g$ .

## 5.4 SPETTRO DEGLI SPOSTAMENTI PROPOSTO

Per la costruzione dello spettro degli spostamenti come proposto nel capitolo 4, si devono utilizzare le formule (4.41), (4.68), (4.46), (4.43), (4.45) e (4.47).

Le informazioni sismiche sono:

- $PGA = 0.25 \text{ g}$
- $0.07 \text{ s} < T_{VA} < 0.1 \text{ s}$

Per poter utilizzare correttamente le formule appena indicate deve essere fornito un valore fissato di  $T_{VA}$ , e non un intervallo, quindi si decide di considerare il valore medio ( $T_{VA} = 0,085 \text{ s}$ ).

Dai valori di  $PGA$  e  $T_{VA}$  è possibile ricavare il valore di  $PGV (=T_{VA} PGA)$ .

Quindi le informazioni sismiche diventano:

- $PGA = 0,25 \text{ g}$
- $PGV = 0,208 \text{ m/s}$
- $T_{VA} = 0,085 \text{ s}$

Si ricava:

$$\varphi_D = 0,33 \cdot PGV = 0,33 \cdot 0,208 = 0,069 \quad \text{oppure:}$$

$$\varphi_D = 4,3 \cdot PGA^{1,5} \cdot T_{VA} + 0,022 = 4,3 \cdot (0,25)^{1,5} \cdot 0,085 + 0,022 = 0,068$$

I due risultati si equivalgono, ma scelgo il secondo risultato perché la formula ha un coefficiente di correlazione maggiore ( $\rho=0.88$  rispetto  $\rho=0.85$ ).

$$T_c = 3,65 \cdot T_{VA} = 3,65 \cdot 0,085 \approx 0,3 \text{ s}$$

$$T_d = 20 \cdot T_{VA} = 20 \cdot 0,085 = 1,7 \text{ s}$$

Lo spettro di risposta che ne risulta è rappresentato in figura 5.3.

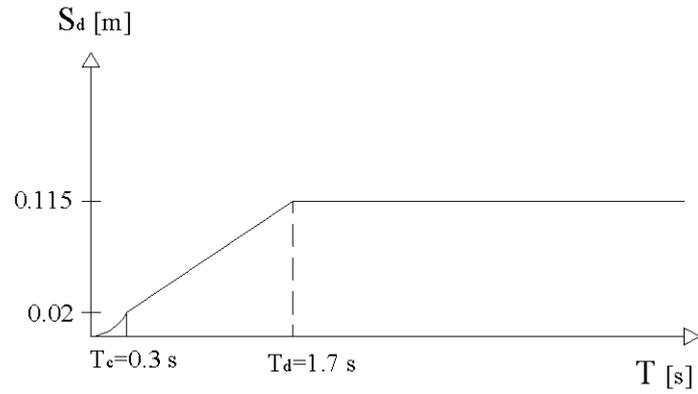


Figura 5.3: spettro degli spostamenti proposto.

### 5.5 CONFRONTO TRA GLI SPETTRI DEGLI SPOSTAMENTI

Si mettono a confronto gli spettri trovati per evidenziarne le differenze e commentare i risultati trovati.

In figura 5.4 vengono sovrapposti tutti gli spettri: in nero è rappresentato lo spettro reale valutato nel paragrafo 5.2, in blu quello proposto dalla normativa italiana, paragrafo 5.3, e in rosso quello proposto da questo lavoro, ricavato nel paragrafo 5.4.

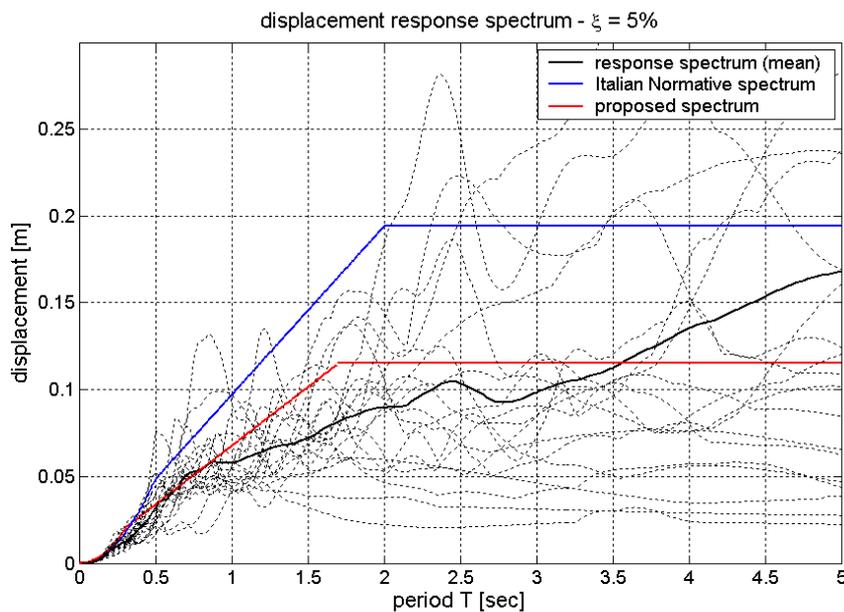


Figura 5.4: confronto tra gli spettri

La figura 5.5 rappresenta un dettaglio della figura 5.4 per periodi piccoli ( $T < 1$  s).

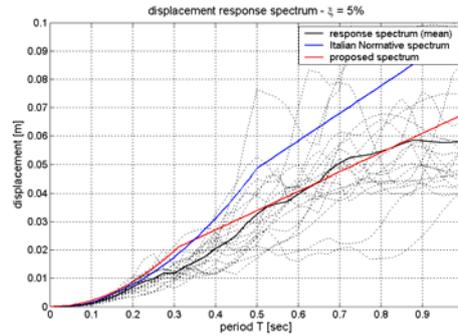


Figura 5.5: dettaglio

Si riportano in figura 5.6 i confronti tra coppie di spettri.

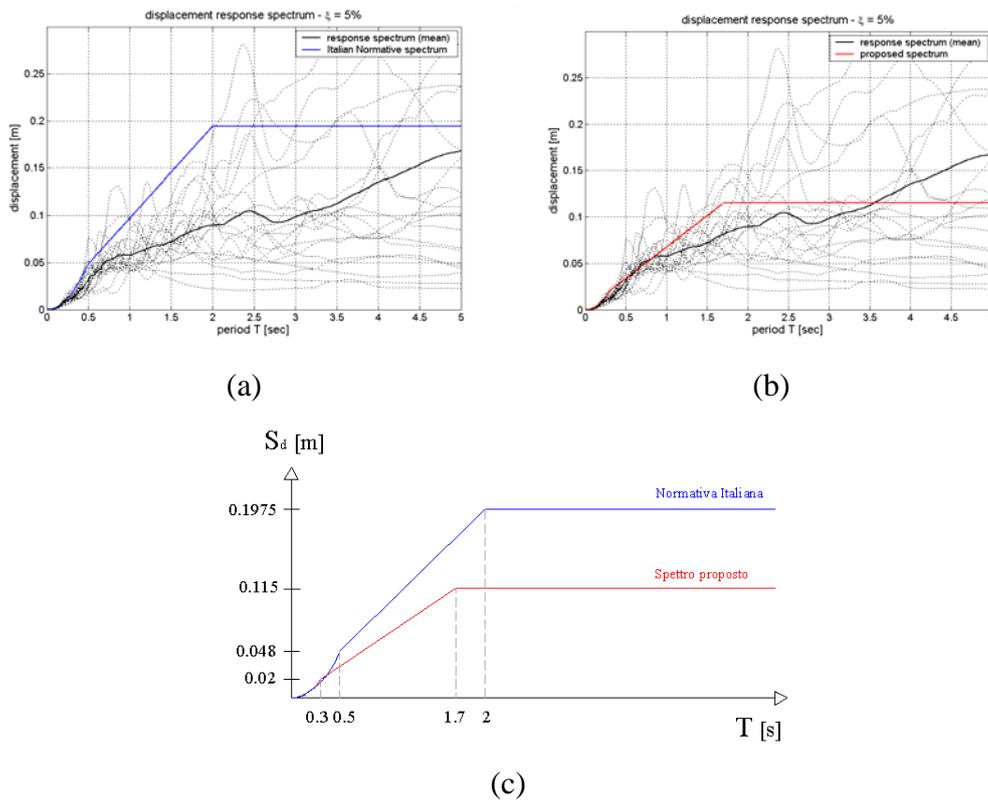


Figura 5.6

La figura 5.6 (a) rappresenta il confronto tra lo spettro reale e quello fornito da normativa. Come si può notare lo spettro da normativa assume valori nettamente superiori a quello reale, in particolare per periodi superiori ad 1 secondo.

La figura 5.6 (b) rappresenta il confronto tra lo spettro reale e quello proposto da questo lavoro. Si può osservare che lo spettro proposto rappresenta una buona schematizzazione dello spettro reale, confermando così la bontà delle analisi svolte nel capitolo 4.

La figura 5.6 (c) rappresenta il confronto tra lo spettro da normativa e quello proposto da questo lavoro. Si nota che i due spettri sono abbastanza diversi, sia come valori dei periodi di riferimento  $T_c$  e  $T_d$ , sia come valori degli spostamenti.

Dalla figura 5.6 si nota che utilizzando esclusivamente informazioni sulla  $PGA$  si ottengono spettri non esatti, e che quindi il valore di  $PGV$  è fondamentale per la schematizzazione dello spettro degli spostamenti, poiché è fondamentale per la costruzione di un input sismico corretto.

# CAPITOLO 6

## CONCLUSIONI

### 6.1 ANALISI CONDOTTE

In questo lavoro sono state effettuate analisi di correlazione tra i parametri sismici, su un gruppo di sismi composto da 344 registrazioni, allo scopo di individuare i parametri indipendenti che meglio caratterizzano l'input sismico.

Si è trovato che i parametri necessari alla descrizione dell'input sismico sono *PGA*, *PGV* e *PGD*.

Conseguentemente sono state effettuate analisi di relazione tra i parametri *PGA*, *PGV*, *PGD* e le grandezze che caratterizzano la forma degli spettri di risposta del gruppo di sismi considerato, in modo da individuare relazioni sperimentali per la schematizzazione dello spettro degli spostamenti per un sistema elastico lineare *SDOF*, con smorzamento del 5%, su un terreno di tipo 'B'.

Si è infine focalizzata l'attenzione sui parametri *PGA* e *PGV*, poiché sono gli unici che attualmente possono essere utilizzati in fase di progettazione, come illustrato nel paragrafo 3.4.3.

### 6.2 RISULTATI OTTENUTI

I risultati ottenuti in questo lavoro si possono riassumere nei seguenti due punti:

1. Mediante i parametri sismici attualmente disponibili, cioè *PGA* e *PGV*, è possibile individuare una schematizzazione dello spettro di risposta degli spostamenti per un sistema elastico lineare *SDOF*, con smorzamento del 5%, su un terreno di tipo 'B', utilizzabile nella progettazione sismica delle strutture secondo l'approccio agli spostamenti (*DBD*).

Lo spettro è del tipo riportato in figura 6.1:

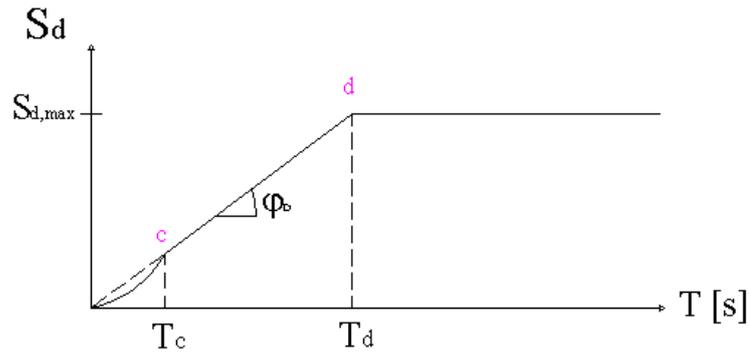


Figura 6.1: schematizzazione dello spettro degli spostamenti.

Le equazioni dello spettro sono:

$$0 \leq T \leq T_c : \quad S_d(T) = \frac{\varphi_D}{T_c} \cdot T^2 \quad (6.1)$$

$$T_c \leq T \leq T_d : \quad S_d(T) = \varphi_D \cdot T \quad (6.2)$$

$$T \geq T_d : \quad S_d(T) = \varphi_D \cdot T_d \quad (6.3)$$

Dove:

$S_d(T)$  è lo spettro di risposta elastico in termini di spostamento.

$T$  è il periodo di vibrazione di un sistema ad un grado di libertà (*SDOF*).

$\varphi_D$  è dato da:

$$\varphi_D = 0,33 \cdot PGV \quad (\rho=0,85) \quad (6.4)$$

oppure da:

$$\varphi_D = 4,3 \cdot PGA^{1,5} \cdot T_{VA} + 0,022 \quad (\rho=0,88) \quad (6.5)$$

$T_c$  è dato da:

$$T_c = 3,65 T_{VA} \quad (\rho=0,67) \quad (6.6)$$

$T_d$  è dato da:

$$T_d = 20 T_{VA} \quad (\rho=0,48) \quad (6.7)$$

2. Il parametro  $PGV$ , abbinato a  $PGA$ , è molto importante per cogliere meglio l'andamento dello spettro degli spostamenti, poiché ha influenza significativa sulla forma di questo, e non può essere trascurato in quanto la sola  $PGA$  non è in grado di cogliere le informazioni contenute nella  $PGV$  ( $\rho_{PGA-PGV} = 0.65$ ).

Per mostrare l'importanza di  $PGV$ , e quindi del parametro  $T_{VA}$ , si riportano in figura 6.2 gli spettri degli spostamenti costruiti con gruppi di sismi aventi la stessa  $PGA (=0.25g)$  ma valori diversi di  $PGV$ , e quindi di  $T_{VA}$ . Gli spettri sono quelli segnati in nero; in rosso e in blu sono indicate le deviazioni standard.

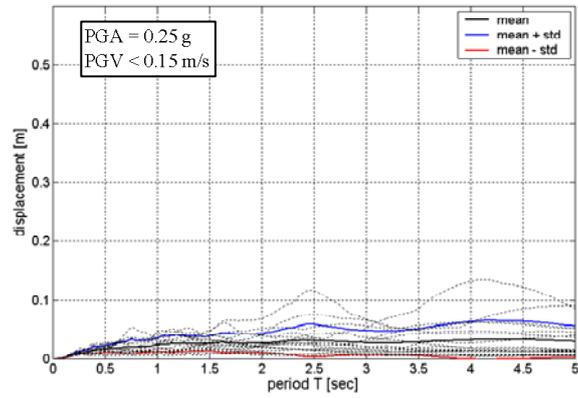
Considerando una  $PGA=0.25g$  sono stati costruiti tre gruppi di sismi al variare del valore di  $T_{VA}$ , in particolare tale parametro assume i valori riportati in tabella 5.2 nel capitolo precedente. Ogni gruppo è cioè caratterizzato da un intervallo di  $T_{VA}$ , e cioè di  $PGV$ , come mostrato in tabella 6.1.

<b>INTERVALLO</b>	<b>PGA [g]</b>	<b>T<sub>VA</sub> [s]</b>	<b>PGV [m/s]</b>
<b>L (Low)</b>	0,25	< 0,06	< 0,15
<b>N (Normal)</b>	0,25	0,07- 0,1	0,17 - 0,25
<b>H (High)</b>	0,25	> 0,13	> 0,32

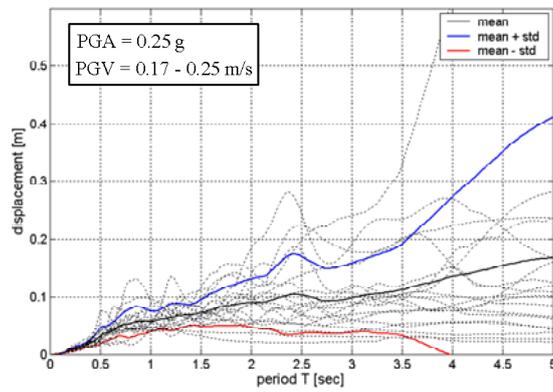
Tabella 6.1: valori di  $PGA$ ,  $T_{VA}$  e  $PGV$  per ogni gruppo

Dalla figura 6.2 si può notare come vari notevolmente il valore dello spostamento al variare del parametro  $PGV$ , cioè di  $T_{VA}$ , mantenendo fissa  $PGA$ . Si vede infatti che aumentando il valore di  $PGV$ , e quindi di  $T_{VA}$ , aumenta lo spostamento.

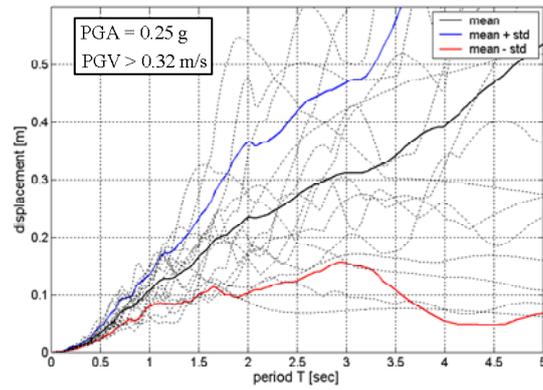
Questa è una prova evidente dell'incisività del valore di  $PGV$  sulla forma dello spettro di risposta degli spostamenti, e quindi della sua importanza nella progettazione.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.2: (a) intervallo  $L$ , (b) intervallo  $N$ , (c) intervallo  $H$ .  
 Nero: media degli spettri; blu: media + deviazione standard;  
 rosso: media – deviazione standard

### 6.3 POSSIBILI APPLICAZIONI E PROBLEMATICHE

Lo spettro di risposta degli spostamenti individuato come proposto in questo lavoro può essere utilizzato per una progettazione sismica basata su un approccio agli spostamenti, quindi che non utilizza spettri delle pseudo-accelerazioni, ma bensì spettri degli spostamenti.

La considerazione che il parametro  $PGV$  assume importanza rilevante sulla forma dello spettro può essere anche utilizzata in una progettazione sismica basata sulle forze (*'force-based approach'*), poiché lo spettro delle pseudo-accelerazioni utilizzato deriva direttamente da quello degli spostamenti, e quindi  $PGV$  ha una grande influenza anche sullo spettro delle pseudo-accelerazioni.

Attualmente si progetta mediante la sola  $PGA$ , e il valore dato è un valore con una determinata probabilità annuale di superamento, stabilita a seconda del tipo di progettazione.

Volendo progettare con due parametri sismici, cioè  $PGA$  e  $PGV$ , devono essere utilizzati quei valori con una certa probabilità annuale di superamento, quindi sorge il problema se considerare le probabilità di superamento delle due grandezze separatamente, che tengono conto delle distribuzioni marginali (6.6) (6.7) dei due parametri  $PGA$  e  $PGV$ , o se considerare la loro interazione reciproca, cioè effettuare un'analisi di *hazard* del vettore  $[PGA, PGV]$ , che tiene conto della distribuzione congiunta  $f_{PGA,PGV}(pga, pgv)$  dei due parametri  $PGA$  e  $PGV$ .

$$f_{PGA}(pga) = \int_0^{\infty} f_{PGA,PGV}(pga, pgv) dpgv \quad (6.6)$$

$$f_{PGV}(pgv) = \int_0^{\infty} f_{PGA,PGV}(pga, pgv) dpga \quad (6.7)$$

Analisi di *hazard* su vettori sono state compiute da *Jalayer-Franchin* [20], che hanno considerato il vettore  $[S_a(T_1), S_a(T_2)]$ , dove  $S_a(T)$  è l'accelerazione spettrale relativa al periodo  $T$ . Le curve di *hazard* relative a  $S_a(T_1=0.80\text{ s})$  e  $S_a(T_2=1.50\text{ s})$  sono riportate in figura 6.3 (a) e (b); mentre in figura 6.4 è riportata la funzione di distribuzione complementare congiunta.

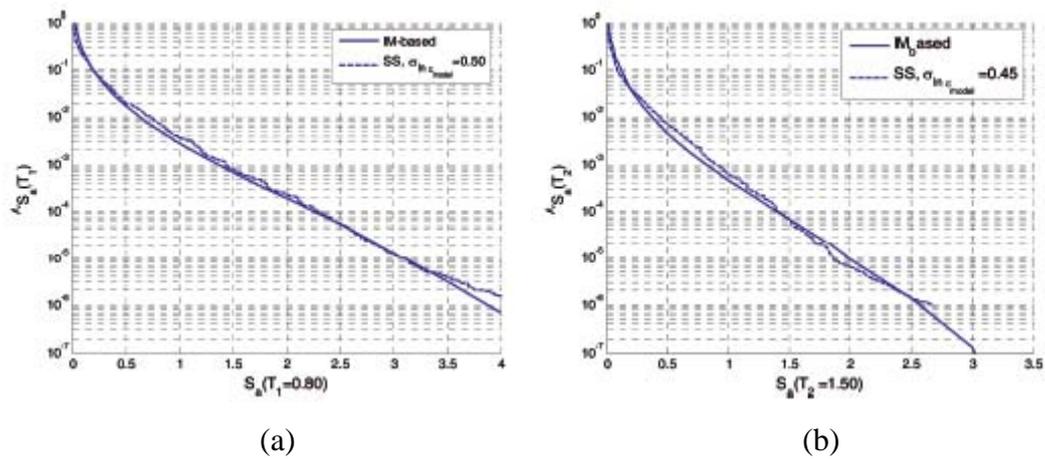


Figura 6.3: curve di hazard [20].

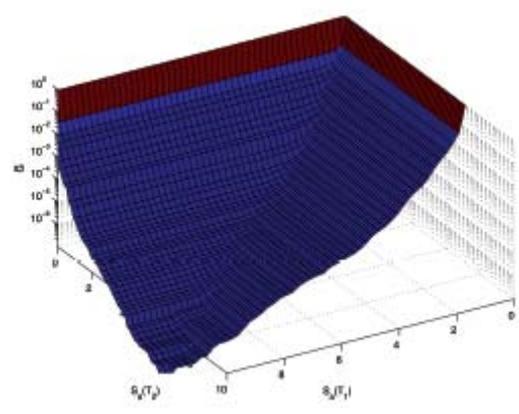


Figura 6.4: funzione di distribuzione complementare congiunta [20].

Lo stesso tipo di ragionamento potrebbe essere fatto per il vettore  $[PGA, PGV]$ .

# APPENDICE

## DATABASE

Il database raccoglie sismi registrati su terreno di tipo 'B', quindi con  $v_S = 360-750 \text{ m/s}$ , caratterizzati da  $PGA > 0,10 \text{ g}$ . Sono presenti in totale 344 registrazioni.

Per ogni registrazione sono riportate le seguenti grandezze:

- $PGA$  = Peak Ground Acceleration,
- $PGV$  = Peak Ground Velocity,
- $PGD$  = Peak Ground Displacement,
- $T_{VA} = PGV/PGA$ ,
- $T_{DV} = PGD/PGV$ ,
- $d$  = distanza epicentrale,
- $T_d$  = durata del sisma,
- $M$  = magnitudo,
- $I_o$  = total intensity of a ground motion of duration  $T_d$ ,
- $a_{rms}$  = rms acceleration,
- $I_a$  = Arias Intensity,
- $I_c$  = Characteristic Intensity
- $CAV$  = Cumulative Absolute Velocity
- $ASI$  = Acceleration Spectrum Intensità
- $SI$  = Response Spectrum Intensity (o Housner coefficient)

Inoltre sono indicati:

- il nome del sisma,
- la stazione in cui è avvenuta la registrazione,
- il codice relativo alla registrazione, indicato dal *PEER* [6] [7],
- il nome del file nell'archivio del *PEER* [6] [7].

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **Giovenale, P., Cornell, C.A. and Esteva, L.** (2004), Comparing the adequacy of alternative ground motion intensity measures for the estimation of structural response, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33, 951-979.
- [2] **Akkar, S. and Özen, Ö.** (2005), Effect of peak ground velocity on deformation demands for SDOF systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34, 13, 1551-1571.
- [3] **Guan J.; Hao H.; Lu Y.** (2004) Generation of probabilistic displacement response spectra for displacement-based design, [\*Soil Dynamics and Earthquake Engineering\*](#), Volume 24, Number 2, February 2004, pp. 149-166(18)
- [4] **Jack W. Baker, C. Allin Cornell** (2005), Which Spectral Acceleration are you using? *Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University*
- [5] **T.T.Zhu, A.C.Heidebrecht and W.K.Tso** (1986), Effect of Peak Ground Acceleration to Velocity Ratio on Ductility Demand of Inelastic System *Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Mc Master University, Hamilton, Ontario, Canada*
- [6] <http://peer.berkeley.edu/nga/index.html>
- [7] <http://peer.berkeley.edu/smcat/>
- [8] **M.J.N. Priestley** (2003), Myths and Fallacies in Earthquake Engineering, Revisited
- [9] **Priestley, Calvi, Kowalsky**, Displacement-Based Seismic Design of Structures
- [10] **Priestley**. Seismological information for Displacement Based Design. *First European conference on earthquake engineering and seismology. 2006*
- [11] **Kramer, S.L.** (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, *Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 653 pp.*
- [12] **Chopra, A.K.**, "Dynamics of Structures. Theory and applications to earthquake engineering." *Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995.*

- [13] **Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang**, Probability Concepts in Engineering, Wiley (2007)
- [14] **Eurocodice 8**
- [15] **Testo Unico**, Norme tecniche per le costruzioni.
- [16] **Benjamin**, probabilistic seismic hazard analysis for ground shaking and estimation of earthquake scenario probabilities. *September 2006*.
- [17] **Todorowska, Gupta**, Probabilistic seismic hazard analysis.
- [18] **Trombetti, Silvestri, Gasparini**, Individuazione di accelerogrammi di progetto mediante analisi hazard. *Reluis Napoli 2006*
- [19] **Campbell, K. W.** (1997). Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, *Seismological Research Letters*, 68, 154–179.
- [20] **Jalayer, Franchin**. Seismic hazard analysis for alternative measures of ground motion intensity employing stochastic simulation methods. *Application of statistic and probability in Civil engineering. 2007*
- [21] **Newmark, Hall**. Earthquake Spectra and Design. *Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif. 1982 pp. 35 e 36*.
- [22] **G.P. Mavroeidis, G. Dong, A.S. Papageorgiou** (2004), Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33, 9, 1551-1023.
- [23] **C. Amadio, M. Fragiaco, S. Rajgelj** (2002), The effects of repeated earthquake ground motions on the non-linear response of SDOF systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32, 2, 291-308.
- [24] **I. Iervolino, G. Manfredi, E. Cosenza** (2005), Ground motion duration effects on nonlinear seismic response, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35, 1, 21-38.

- [25] **Lam N.T.K.; Wilson J.L.; Chandler A.M.** (2001) Seismic displacement response spectrum estimated from the frame analogy soil amplification model. *Engineering Structures*. Volume 23, Number 11, November 2001, pp. 1437-1452(16)
- [26] **Malhotra P.K.** (2001) Response spectrum of incompatible acceleration, velocity and displacement histories. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30, 2, 279-286
- [27] **Cornell CA.** Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1968; **58**(5): 1583–1606.
- [28] **Tothong P, Cornell CA.** An empirical ground motion attenuation relation for inelastic spectral displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2006; **96**(6):2146–2164.
- [29] **Tothong P, Cornell CA.** Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 2007.*
- [30] **Baker JW, Cornell CA.** A vector-valued ground motion intensity consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2005; 34:1193–1217
- [31] **Baker JW, Cornell CA.** Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2006; 35:1077–1095.
- [32] **Abrahamson, N.A. and W.J. Silva.** Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, *Seism. Res. Lett*, 68, 94-109, 1997.
- [33] **J. Douglas** Errata of and additions to ESEE Report No. 01-1: ‘A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000)’ *Civil & Environmental Engineering Dept. Report October 2002*
- [34] **Veletsos AS, Newmark NM, Chelapati CV.** Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motions. *Proceedings of the 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Wellington, New Zealand, 1965; 663–680.*