

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

Progetto in Zona Sismica LS

**RISPOSTA SISMICA DI STRUTTURE ASIMMETRICHE IN
PIANTA: UN METODO SEMPLIFICATO**

CANDIDATO:

CONSUELO BALLORIANI

RELATORE:

Prof. Ing. TOMASO TROMBETTI

CORRELATORE:

Dott. Ing. STEFANO SILVESTRI

Anno Accademico 2009-2010

INDICE

1

IL SISTEMA DINAMICO ASIMMETRICO IN PIANTA

1.1	Introduzione	5
1.2	L'equazione del moto	7
1.2.1	Considerazioni sul parametro γ	10
1.2.2	Relazione tra γ e Ω_0	11
1.3	Vibrazioni libere non smorzate	12
1.3.1	Risposta in oscillazioni libere	14
1.3.2	Modal contribution factor	18
1.3.3	Periodi di vibrazione	20
1.3.4	Fundamental period shifting	24
1.4	Introduzione dello smorzamento	25
1.4.1	Smorzamento alla Rayleigh	26
1.5	Il sistema dinamico sottoposto a forzante sismica: l'equazione del moto	27
1.6	Parametri fondamentali	29
1.7	Influenza dell'eccentricità sulla rotazione e sulla traslazione del centro di massa	31
1.7.1	Effetto dell'eccentricità: l'equazione del moto	32
1.7.2	Effetto dell'eccentricità: il fundamental period shifting	33
1.7.3	Effetto dell'eccentricità dal punto di vista fisico	34

2

LA RISPOSTA LONGITUDINALE MASSIMA DI STRUTTURE ECCENTRICHE IN PIANTA

2.1	Introduzione	37
2.2	Studi condotti da Nagarajaiah	38
2.3	Necessità di capire altre classi di strutture	39
2.4	Nuova formulazione del rapporto δ	41
2.4.1	Combinazione dei modi	42

2.4.2	Studio dell'effetto dell'eccentricità sulla risposta longitudinale	43
2.4.2.1	Struttura torsorigida a pilastri	45
2.4.2.2	Struttura torsioflessibile	46
2.4.2.3	Struttura a ridotta eccentricità	46
2.4.3	Confronto degli spostamenti longitudinali massimi	47
2.4.3.1	Struttura torsorigida a pilastri	47
2.4.3.2	Struttura torsioflessibile	48
2.4.3.3	Struttura a ridotta eccentricità	49
2.5	Simulazioni numeriche	51
2.5.1	Ipotesi alla base dell'indagine numerica	51
2.5.2	Parametri strutturali considerati nelle simulazioni	51
2.5.3	Strutture analizzate	52
2.5.4	Input sismici	53
2.6	Valutazione del rapporto δ	53
2.6.1	Curve di regressione generali	54
2.6.2	Curve di livello per le strutture torsorigide	63
2.6.3	Curve di livello per le strutture torsioflessibili	65
2.6.4	Curve di livello per le strutture a ridotta eccentricità	67

3

LA RISPOSTA ROTAZIONALE MASSIMA DI STRUTTURE ECCENTRICHE IN PIANTA: MESSA A PUNTO DEL METODO ALPHA

3.1	Introduzione	69
3.2	Il parametro alpha per oscillazioni libere non smorzate	70
3.3	Rapporto tra la massima rotazione ed il massimo spostamento longitudinale in vibrazioni forzate	72
3.4	Valutazione del rapporto R	73
3.5	Il metodo alpha per la stima delle rotazioni	82
3.6	Valutazione del parametro A	91
3.6.1	Curve di regressione generali	91
3.6.2	Curve di livello per le strutture torsorigide	100
3.6.3	Curve di livello per le strutture torsioflessibili	101
3.6.4	Curve di livello per le strutture a ridotta eccentricità	103

4

APPLICAZIONE DEL METODO ALPHA PER LA STIMA DEL MASSIMO SPOSTAMENTO LONGITUDINALE DEL LATO FLESSIBILE

4.1	Introduzione	105
4.2	Approccio con i valori massimi delle risposte longitudinali e rotazionali.....	107
4.2.1	Il coefficiente di contemporaneità ζ	109
4.2.2	Il parametro B	110
4.2.3	Valutazione del parametro B	111
4.3	Il metodo alpha nella stima del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile: proposta di modifica del metodo alpha.....	120
4.4	Valutazione del rapporto Δ_{flex}	130
4.4.1	Curve di livello per le strutture torsiorigide	131
4.4.2	Curve di livello per le strutture torsioflessibili	133
4.4.3	Curve di livello per le strutture a ridotta eccentricità	135
4.4.4	Curve di livello globali	137
4.5	Importanza della rotazione e dello spostamento longitudinale del baricentro delle masse nello spostamento longitudinale della parte flessibile	138

5

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

5.1	Le analisi numeriche condotte	142
5.2	Risultati ottenuti	144
5.3	Sviluppi futuri.....	146
	BIBLIOGRAFIA	147
	APPENDICE	150

CAPITOLO 1

IL SISTEMA DINAMICO ASIMMETRICO IN PIANTA

1.1 INTRODUZIONE

Si consideri una generica struttura modellata come un sistema ad un singolo piano con due campate in direzione x ed una in direzione y , di dimensione trasversale L e dimensione longitudinale B . Si assume che il diaframma sia infinitamente rigido nel suo stesso piano e che gli elementi resistenti laterali, ovvero gli elementi che danno rigidità alla traslazione laterale e longitudinale, come ad esempio i pilastri, sono privi di massa e assialmente indeformabili.

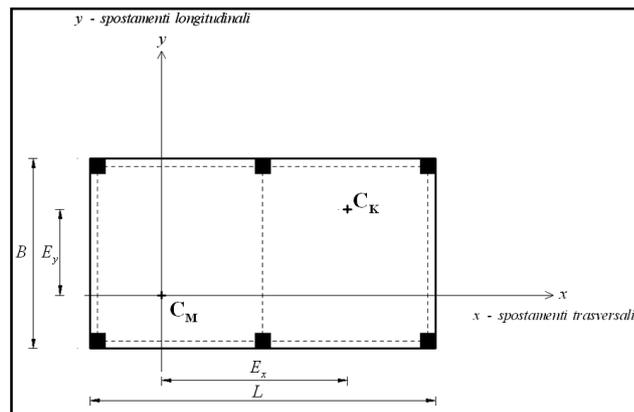


Fig. 1.1 Modellazione del sistema a tre gradi di libertà; sistema di riferimento centrato nel baricentro delle masse.

Come mostrato in Fig.1.1 è possibile individuare in tale sistema un punto in cui si considera concentrata la forza d'inerzia, detto *baricentro delle masse*, ed un punto in cui viene applicata la reazione della struttura, detto *baricentro delle rigidità*.

La posizione del baricentro delle masse può essere determinata ricorrendo alla classica definizione di baricentro in termini integrali, dato che si è ipotizzata una distribuzione continua della massa:

$$r_{CM} = \frac{1}{M} \cdot \int_V r dm \quad (1.1)$$

Nel caso in cui la distribuzione delle masse è uniforme, il baricentro delle masse coincide con il baricentro geometrico della struttura.

Le rigidezze invece possono essere pensate come distribuite in modo discreto all'interno della struttura, per cui il baricentro delle rigidezze può essere valutato semplicemente come:

$$x_{CK} = \frac{\sum_i k_{xi} \cdot x_i}{\sum_i k_{xi}} \quad y_{CK} = \frac{\sum_i k_{yi} \cdot y_i}{\sum_i k_{yi}} \quad (1.2)$$

In questa trattazione si considerano sistemi asimmetrici, ovvero sistemi caratterizzati dalla non coincidenza tra il baricentro delle masse C_M ed il baricentro delle rigidezze C_K , in modo da poter indagare il comportamento torsionale che si sviluppa per effetto dell'azione sismica. Quest'ultima, essendo a tutti gli effetti un'accelerazione, può essere pensata agente direttamente nel baricentro delle masse mentre la reazione della struttura sarà applicata nel baricentro delle rigidezze. L'eccentricità dovuta alla non coincidenza tra C_M e C_K assume quindi il ruolo di braccio della coppia torcente:

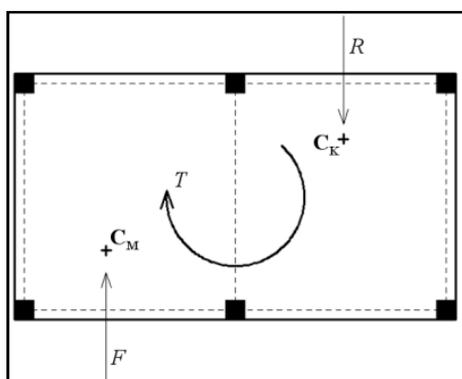


Fig. 1.2 Azione torcente che si instaura per effetto dell'eccentricità tra baricentro delle masse e

baricentro delle rigidità.

Dopo aver posto l'origine del sistema di riferimento nel baricentro delle masse (Fig. 1.1) è possibile valutare l'eccentricità del baricentro delle rigidità in termini di E_x ed E_y .

1.2 L'EQUAZIONE DEL MOTO

Il sistema dinamico asimmetrico, preso in considerazione in questo studio, è caratterizzato da tre gradi di libertà $\{u_x \ u_y \ u_\vartheta\}$, dove gli spostamenti sono definiti in funzione del sistema di riferimento con origine nel centro di massa (Fig. 1.3):

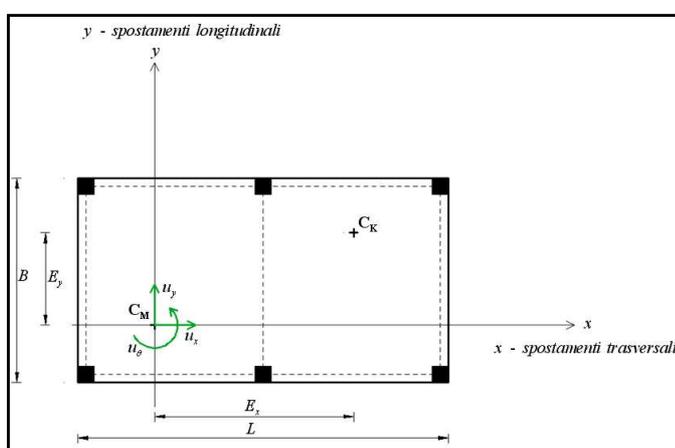


Fig. 1.3 Gradi di libertà del sistema considerato.

Sotto le seguenti ipotesi:

- uguale rigidità del sistema nelle due direzioni x e y ;
- risposta rotazionale u_ϑ sotto eccitazione dinamica piccola abbastanza da poter considerare l'approssimazione del prim'ordine $u_\vartheta \cong \sin u_\vartheta \cong \tan u_\vartheta$, ovvero un'analisi in ambito elastico-lineare;

l'equazione del moto che governa la risposta dinamica del sistema in esame presenta la seguente forma:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p \quad (1.3)$$

L'espressione esplicita dell'equazione del moto è stata dedotta per via diretta; in forma esplicita le tre equazioni differenziali accoppiate del moto assumono la seguente espressione:

$$\begin{aligned}
& m \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \\ \rho_m \ddot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \\ \rho_m \dot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} \\
& + m\omega_L^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_y\sqrt{12} \\ 0 & 1 & e_x\sqrt{12} \\ -e_y\sqrt{12} & e_x\sqrt{12} & \gamma^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ \rho_m u_\vartheta \end{Bmatrix} \quad (1.4) \\
& = \begin{Bmatrix} p_x(t) \\ p_y(t) \\ p_\vartheta(t)/\rho_m \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

Le grandezze che caratterizzano il sistema, riferite ad un sistema centrato nel baricentro delle masse, sono:

$u_x(t), u_y(t), u_\vartheta(t)$ movimenti lungo gli assi x e y e rotazione intorno all'asse z , passante per il baricentro delle masse C_M ;

m massa totale della struttura (coincidente, per le ipotesi fatte, con la massa del piano infinitamente rigido);

$I_{p,m} = I_{p,m,C_M} = \int_m (x^2 + y^2) dm = m \cdot \rho_m^2$ momento d'inerzia polare delle masse valutato rispetto l'asse z passante attraverso il baricentro delle masse C_M .

Questa grandezza è anche una proprietà fisica del sistema e, per questo motivo, di seguito verrà indicata semplicemente come $I_{p,m}$ invece di I_{p,m,C_M} ;

$\rho_m = \rho_{m,C_M} = \sqrt{\frac{I_{p,m}}{m}}$ raggio di inerzia delle masse valutato rispetto l'asse z passante attraverso il baricentro delle masse. Il raggio d'inerzia delle masse valutato rispetto al centro delle masse rappresenta anch'esso una proprietà fisica del sistema e di seguito verrà indicato semplicemente con ρ_m invece di ρ_{m,C_M} ;

$[C]$ matrice di smorzamento;

x_i, y_i coordinate dell' i -esimo elemento resistente laterale;

k_{xi}, k_{yi} rigidezza dell' i -esimo elemento resistente laterale in direzione x e y ;

$k = \sum_i k_{xi} = \sum_i k_{yi}$ rigidezze complessive nelle due direzioni x e y ;

$I_{p,k,C_M} = \sum_{i=1}^N (k_{yi} \cdot x_i^2 + k_{xi} \cdot y_i^2)$ momento d'inerzia polare delle rigidezze valutato rispetto all'asse z passante per il baricentro delle masse C_M . Tale

grandezza corrisponde anche alla rigidezza alla rotazione (intorno all'asse z) dell'insieme degli elementi resistenti della struttura rispetto al baricentro delle masse;

$\rho_{k,C_M} = \sqrt{\frac{I_{p,k,C_M}}{k}}$ raggio di inerzia delle rigidezze del sistema valutato rispetto all'asse z passante per il baricentro delle masse C_M ;

$E_x = \frac{\sum_{i=1}^N k_{yi} \cdot x_i}{k}$, $E_y = \frac{\sum_{i=1}^N k_{xi} \cdot y_i}{k}$ eccentricità del baricentro delle rigidezze dell'insieme degli elementi resistenti laterali rispetto al baricentro delle masse rispettivamente in direzione x ed in direzione y ;

$D_e = \rho_m \cdot \sqrt{12}$ diagonale equivalente del sistema;

$e_x = \frac{E_x}{D_e}$, $e_y = \frac{E_y}{D_e}$ eccentricità relative in direzione x e y ;

$\omega_L = \sqrt{\frac{k}{m}}$ pulsazione propria del modo traslazionale di una struttura fittizia non eccentrica che ha rigidezza laterale pari a k e massa pari ad m ;

$\omega_{\vartheta,C_M} = \sqrt{\frac{I_{p,k,C_M}}{I_{p,m}}}$ pulsazione propria del modo rotazionale di una struttura fittizia non eccentrica che ha la stessa rigidezza rotazionale e momento d'inerzia delle masse (rispetto all'asse z) del sistema eccentrico considerato in questo studio;

$\gamma = \gamma_{C_M} = \frac{\omega_{\vartheta,C_M}}{\omega_L} = \sqrt{\frac{k_{\vartheta\vartheta}}{k \cdot \rho_m^2}}$ è un parametro definito fisicamente come il rapporto tra le pulsazioni dei modi rotazionali e traslazionali disaccoppiati definiti sopra e da una misura della distribuzione in pianta della rigidezza;

L, B dimensioni in pianta della struttura;

p_x, p_y, p_{ϑ} forze e coppie applicate.

L'assunzione fatta nella determinazione della matrice delle rigidezze, secondo cui $k = \sum_i k_{xi} = \sum_i k_{yi}$ non fa perdere di generalità la trattazione; tale ipotesi non implica che la rigidezza di tutti gli elementi resistenti sia uguale (o meglio che ogni pilastro abbia la stessa rigidezza traslazionale k_{sing}). In tal caso la stessa rappresentazione di Fig.1.1 sarebbe errata in quanto la disposizione simmetrica dei pilastri (o dei generici elementi resistenti) comporterebbe il posizionamento

del baricentro delle rigidezze nel baricentro geometrico della struttura, ricadendo ovviamente in un caso particolare. Inoltre, come verrà mostrato nei paragrafi successivi, per il caso di eccitazione uniassiale e per eccentricità relativa longitudinale nulla¹ non è importante conoscere le singole rigidezze ma solo la loro somma nelle due direzioni [Trombetti et al., 2008].

1.2.1 Considerazioni sul parametro γ

All'interno dell'equazione del moto si è introdotta l'espressione del parametro γ inteso come rapporto tra le pulsazioni dei modi rotazionali e traslazionali disaccoppiati $\gamma = \sqrt{\frac{k_{\vartheta\vartheta}}{k \cdot \rho_m^2}}$, scritto con riferimento al sistema di coordinate avente origine nel baricentro delle masse (Fig. 1.1). In altre parole il γ che interviene nell'equazione del moto è in realtà un γ_{C_M} , parametro che non è funzione di sole proprietà fisiche del sistema. Infatti si può osservare che γ può essere espresso come rapporto tra il raggio d'inerzia delle rigidezze rispetto al baricentro delle masse ed il raggio d'inerzia delle masse rispetto al baricentro delle masse (solo quest'ultima è una proprietà fisica del sistema):

$$\gamma = \gamma_{C_M} = \frac{\omega_{\vartheta, C_M}}{\omega_L} = \sqrt{\frac{I_{p,k, C_M} m}{I_{p,m} k}} = \frac{\rho_{k, C_M}}{\rho_m} \quad (1.5)$$

È possibile però introdurre un nuovo parametro, simile al γ , ma funzione di sole proprietà fisiche del sistema:

$$\Omega_{\vartheta} = \sqrt{\frac{I_{p,k}}{I_{p,m}} \cdot \frac{m}{k}} = \frac{\rho_k}{\rho_m} \quad (1.6)$$

In questo modo sia il raggio d'inerzia delle rigidezze valutato rispetto a C_K , che il raggio d'inerzia delle masse valutato rispetto a C_M rappresentano proprietà fisiche del sistema quindi anche il loro rapporto Ω_{ϑ} sarà una proprietà fisica del sistema.

¹ Nelle pagine seguenti si porrà particolare attenzione a questa situazione, che verrà presa come oggetto di studio nelle simulazioni numeriche, perché tali condizioni conducono ad avere la massima risposta rotazionale.

1.2.2 Relazione tra γ e Ω_ϑ

Con riferimento alla Fig.1.1 si può osservare che valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} x_{i,C_S} = x_i + E_x = x_i + e_x \cdot \rho_m \sqrt{12} \\ y_{i,C_S} = y_i + E_y = y_i + e_y \cdot \rho_m \sqrt{12} \end{cases} \quad (1.7)$$

Per cui si ottiene:

$$\rho_{m,C_S} = \rho_m \sqrt{1 + 12(e_x^2 + e_y^2)} \quad (1.8)$$

da cui:

$$\gamma_{C_S} = \frac{\rho_{k,C_S}}{\rho_{m,C_S}} = \frac{\rho_k}{\rho_m \sqrt{1 + 12(e_x^2 + e_y^2)}} = \Omega_\vartheta \frac{1}{\sqrt{1 + 12(e_x^2 + e_y^2)}} \quad (1.9)$$

Inoltre si ha:

$$\rho_{k,C_M} = \rho_k \sqrt{1 + \frac{\rho_m^2 \cdot 12(e_x^2 + e_y^2)}{\rho_k^2}} = \rho_k \sqrt{1 + \frac{12(e_x^2 + e_y^2)}{\Omega_\vartheta^2}} \quad (1.10)$$

A questo punto poiché:

$$\gamma = \frac{\rho_{k,C_M}}{\rho_m} \quad (1.11)$$

sostituendo nella (1.11) la (1.10) si ottiene la relazione tra i due parametri:

$$\gamma = \sqrt{\Omega_\vartheta^2 + 12(e_x^2 + e_y^2)} = \sqrt{\left(\frac{\rho_k}{\rho_m}\right)^2 + 12(e_x^2 + e_y^2)} \quad (1.12)$$

o, in alternativa:

$$\Omega_\vartheta = \sqrt{\gamma^2 - 12(e_x^2 + e_y^2)} = \sqrt{\left(\frac{\rho_{k,C_M}}{\rho_m}\right)^2 - 12(e_x^2 + e_y^2)} \quad (1.13)$$

Si può infine osservare che $\gamma, \gamma_{C_S}, \Omega_\vartheta$ coincidono nel caso in cui l'eccentricità sia nulla. Ottenuta la fondamentale relazione tra γ e Ω_ϑ è possibile riscrivere l'equazione del moto in termini di Ω_ϑ :

$$\begin{aligned}
& m \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \\ \rho_m \ddot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \\ \rho_m \dot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} \\
& + m\omega_L^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_y\sqrt{12} \\ 0 & 1 & e_x\sqrt{12} \\ -e_y\sqrt{12} & e_x\sqrt{12} & \Omega_\vartheta^2 + 12(e_x^2 + e_y^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ \rho_m u_\vartheta \end{Bmatrix} \quad (1.14) \\
& = \begin{Bmatrix} p_x(t) \\ p_y(t) \\ p_\vartheta(t)/\rho_m \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

Generalmente strutture caratterizzate da valori di $\Omega_\vartheta > 1$ possono essere definite strutture torsiorigide, mentre quelle caratterizzate da valori di $\Omega_\vartheta < 1$, torsioflessibili.

1.3 VIBRAZIONI LIBERE NON SMORZATE

Lo studio delle vibrazioni libere in assenza di smorzamento della (1.3) si riduce alla risoluzione di un problema agli autovalori. Cercando infatti una soluzione del tipo $u(t) = q_n(t) \cdot \phi_n$ per l'equazione $M\ddot{u} + Ku = 0$ si ottiene:

$$[-\omega_n^2 M \phi_n + K \phi_n] q_n(t) = 0 \quad (1.15)$$

La soluzione della (1.15), escludendo la soluzione banale, si ottiene risolvendo:

$$K \phi_n = \omega_n^2 M \phi_n \quad (1.16)$$

L'uguaglianza sopra risulta verificata nel caso in cui il determinante è nullo:

$$\det[K - \omega_n^2 M] = 0 \quad (1.17)$$

La soluzione del problema relativo alla (1.16), che governa le vibrazioni libere non smorzate del sistema, fornisce le seguenti frequenze naturali in forma chiusa per il problema specifico, normalizzate rispetto ω_L ed elevate al quadrato [Trombetti e Conte, 2005]:

$$\Omega_1 = \left(\frac{\omega_1}{\omega_L}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \gamma^2 - \sqrt{(\gamma^2 - 1)^2 + 48 \cdot e^2} \right\} \quad (1.18)$$

$$\Omega_2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_L}\right)^2 = 1 \quad (1.19)$$

$$\Omega_3 = \left(\frac{\omega_3}{\omega_L}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \gamma^2 + \sqrt{(\gamma^2 - 1)^2 + 48 \cdot e^2} \right\} \quad (1.20)$$

dove $e^2 = e_x^2 + e_y^2$.

Con riferimento alla Fig.1.4, che rappresenta le frequenze normalizzate $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ come funzioni di e e di Ω_θ , è possibile osservare che Ω_1 è generalmente inferiore ad uno mentre Ω_3 abbastanza maggiore; le due frequenze estreme hanno comunque come limite, superiore ed inferiore rispettivamente, sempre la frequenza Ω_2 .

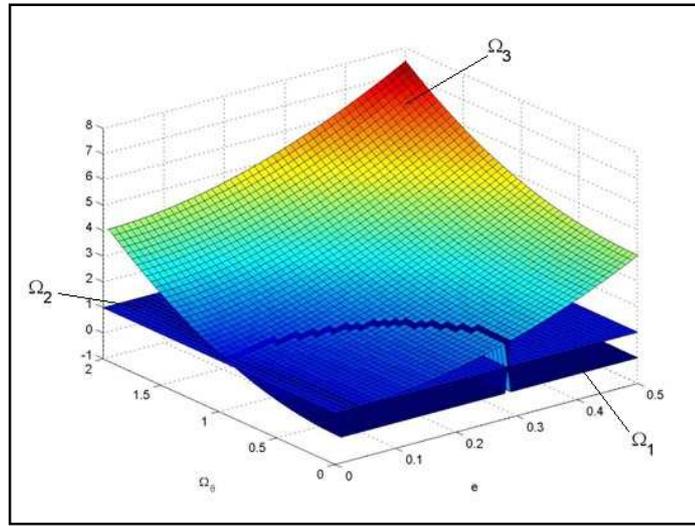


Fig. 1.4 Frequenze naturali normalizzate in funzione dei parametri e, Ω_θ .

Gli autovettori associati agli autovalori del problema per vibrazioni libere non smorzate sono [Trombetti e Conte, 2005]:

$$\begin{aligned} \{\phi_1\} &= \begin{bmatrix} (e_y \sqrt{12}) / (1 - \Omega_1) \\ (e_x \sqrt{12}) / (\Omega_1 - 1) \\ 1 \end{bmatrix}, & \{\phi_2\} &= \begin{bmatrix} e_x / e_y \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, & \{\phi_3\} \\ & & & & (1.21) \\ & & & & = \begin{bmatrix} (e_y \sqrt{12}) / (1 - \Omega_3) \\ (e_x \sqrt{12}) / (\Omega_3 - 1) \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Dall'espressione analitica dei tre modi naturali fornita dalla (1.21) si osserva che nel primo e nel terzo modo le traslazioni sono accoppiate con le rotazioni, mentre la seconda forma modale è puramente traslazionale, nella direzione definita dalla congiungente il baricentro delle masse e quello delle rigidità (Fig.1.5):

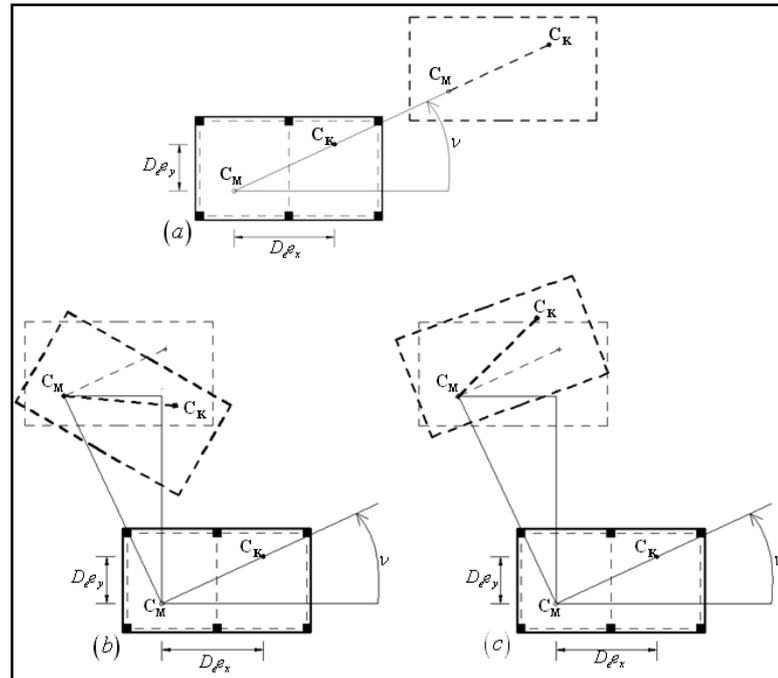


Fig. 1.5 Rappresentazione grafica qualitativa delle forme modali per la struttura in esame: (a) $\{\phi_2\}$, (b) $\{\phi_1\}$, (c) $\{\phi_3\}$; $\nu = \arctan(e_y/e_x)$.

1.3.1 Risposta in oscillazioni libere

Nel caso particolare in cui il sistema sia non smorzato ($[C] = 0$) e l'unica perturbazione, in assenza di forze e coppie applicate ($\{p\} = 0$), sia rappresentata dalla seguente deformazione iniziale impressa:

$$\begin{bmatrix} u_x(0) \\ u_y(0) \\ \rho_m u_\vartheta(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

dove a rappresenta lo spostamento iniziale lungo la direzione y (direzione longitudinale), la soluzione della (1.14) è stata determinata [Trombetti, 1994; Trombetti e Conte, 2005] mediante analisi modale².

² Le ipotesi di partenza consentono l'applicabilità dell'analisi modale perché si stanno considerando piccoli spostamenti (ambito lineare e quindi validità del principio di sovrapposizione degli effetti) e la matrice di smorzamento nulla (quindi un insieme di equazioni disaccoppiate grazie all'ortogonalità dei modi di vibrare)

L'equazione trattata è quindi ottenuta dalla (1.14) ponendo pari a zero sia il vettore delle forze e delle coppie applicate, sia la matrice di smorzamento:

$$M\ddot{u} + Ku = 0$$

$$m \begin{pmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \\ \rho_m \ddot{u}_\vartheta \end{pmatrix} + m\omega_L^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_y\sqrt{12} \\ 0 & 1 & e_x\sqrt{12} \\ -e_y\sqrt{12} & e_x\sqrt{12} & \Omega_\vartheta^2 + 12(e_x^2 + e_y^2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ \rho_m u_\vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.23)$$

Nell'ottica dell'analisi modale si applica quindi un cambiamento di coordinate:

$$u(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r q_r(t) = \Phi q(t) \quad (1.24)$$

Mediante la (1.24) il sistema di equazioni accoppiate rappresentato dalla (1.23) può essere trasformato in un sistema di equazioni disaccoppiate in coordinate modali $q_n(t)$. Sostituendo quindi la (1.24) all'interno della (1.23) si ha:

$$\sum_{r=1}^N M \phi_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N K \phi_r q_r(t) = 0 \quad (1.25)$$

Premoltiplicando per ϕ_n^T si ottiene la seguente espressione:

$$\sum_{r=1}^N \phi_n^T M \phi_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \phi_n^T K \phi_r q_r(t) = 0 \quad (1.26)$$

Per l'ortogonalità dei modi di vibrare, rispetto alle masse e rispetto alle rigidzze, ogni termine della sommatoria è nullo, ad eccezione del caso in cui $r=n$, per cui l'equazione precedente si semplifica nel modo seguente:

$$(\phi_n^T M \phi_n) \ddot{q}_n(t) + (\phi_n^T K \phi_n) q_n(t) = 0 \quad (1.27)$$

espressione che può anche essere riscritta come:

$$M_n \ddot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = 0 \quad (1.28)$$

dove i termini $M_n = \phi_n^T M \phi_n$, $K_n = \phi_n^T K \phi_n$ rappresentano rispettivamente la massa generalizzata per il modo n-esimo (massa modale) e la rigidzza generalizzata per il modo n-esimo (rigidzza modale).

A questo punto il problema di partenza, rappresentato dalla (1.23) è stato ricondotto allo studio di N oscillatori semplici del tipo:

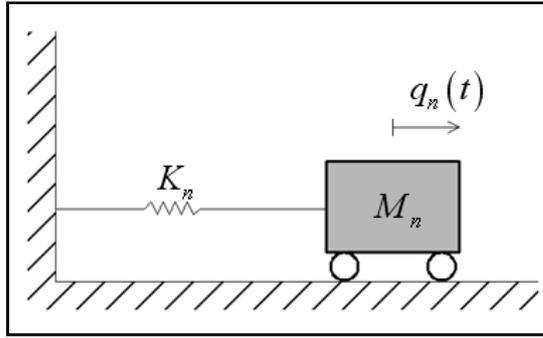


Fig. 1.6 Generico oscillatore semplice in cui viene scomposto il sistema iniziale a più gradi di libertà.

I contributi di ciascun modo in termini di spostamento, calcolati grazie alla generica equazione $\ddot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = 0$ vengono combinati per ottenere lo spostamento totale:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad (1.29)$$

Tornando alla soluzione della (1.23) si ottengono, agendo secondo la procedura precedentemente esposta, i seguenti spostamenti trasversale, longitudinale e rotazionale:

$$u_x(t) = a \frac{e_x e_y}{e^2} \left\{ -\frac{\theta_3}{\theta_3 - \theta_1} \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) - \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_3} \cos(\omega_3 t) \right\} \quad (1.30)$$

$$u_y(t) = a \frac{e_x^2}{e^2} \left\{ \frac{\theta_3}{\theta_3 - \theta_1} \cos(\omega_1 t) + \frac{e_y^2}{e_x^2} \cos(\omega_2 t) + \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_3} \cos(\omega_3 t) \right\} \quad (1.31)$$

$$u_z(t) = \frac{a}{\sqrt{48} \rho_m} \frac{e_x}{e} \theta_1 \frac{\theta_3}{\theta_3 - \theta_1} \{ \cos(\omega_1 t) - \cos(\omega_3 t) \} \quad (1.32)$$

Un'analisi delle (1.30),(1.31),(1.32) porta ad alcune prime osservazioni riguardo le vibrazioni libere di sistemi eccentrici sollecitati da uno spostamento iniziale lungo la direzione longitudinale y:

- gli spostamenti longitudinali, trasversali e rotazionali dipendono linearmente dalla deformazione iniziale impressa a;

- in assenza di eccentricità lungo la direzione longitudinale il secondo modo di vibrare non viene chiamato in causa nelle vibrazioni libere. Considerando l'espressione analitica degli spostamenti nel caso in cui $e_y = 0$ si ha infatti:

$$u_x(t) = 0$$

$$u_y(t) = a \left\{ \frac{\theta_3}{\theta_3 - \theta_1} \cos(\omega_1 t) + \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_3} \cos(\omega_3 t) \right\}$$

$$u_\vartheta(t) = \frac{a}{\sqrt{48\rho_m}} \theta_1 \frac{\theta_3}{\theta_3 - \theta_1} \{ \cos(\omega_1 t) - \cos(\omega_3 t) \}$$

e si può vedere come la pulsazione ω_2 sia scomparsa;

- allo stesso tempo, dall'analisi delle equazioni del punto precedente, il primo modo ed il terzo modo regolano la risposta del sistema solo se questi presenta un'eccentricità non nulla in direzione trasversale ($e_x \neq 0$);
- per non avere un contributo nullo di vibrazione libera in direzione trasversale del baricentro delle masse, la struttura deve avere eccentricità in entrambe le direzioni x e y ;
- per avere gli stessi massimi spostamenti trasversali e longitudinali nella risposta in vibrazioni libere è necessario che $e_x = e_y$ ³;
- per una data eccentricità trasversale e_x si può dimostrare che il sistema sviluppa la massima risposta rotazionale quando l'eccentricità longitudinale è nulla ($e_y = 0$);
- gli spostamenti longitudinali, trasversali e la risposta rotazionale sono composti dalla somma di più funzioni trigonometriche di diversa ampiezza e pulsazione. Tale composizione crea delle armoniche a modulazione di ampiezza, come suggerito dalle formule di prostaferesi:

³ $\frac{e_x e_y}{e_x^2 + e_y^2} = \frac{1}{2} \Rightarrow (e_x - e_y)^2 = 0 \Rightarrow e_x = e_y$

$$\cos(x) + \cos(y) = 2 \cos\left[\frac{1}{2}(x + y)\right] \cdot \cos\left[\frac{1}{2}(x - y)\right]$$

Tali modulazioni possono essere complete se le ampiezze delle due armoniche sono uguali, oppure incomplete in caso contrario.

Il caso di eccentricità longitudinale nulla nelle vibrazioni libere indotte da uno spostamento iniziale in direzione y è quello per cui si ha la massima risposta rotazionale, per cui rappresenta il caso di maggior interesse; per questo motivo d'ora in avanti verrà studiato il sistema a tre gradi di libertà eccentrico solo in direzione trasversale $e_x \neq 0$.

1.3.2 Modal contribution factor

Per cercare di capire qual è il contributo di ciascun modo alla risposta complessiva, è stato studiato il *modal contribution factor*; il fattore \bar{r}_n è una misura di quanto conta il modo n -esimo nella generica risposta r e può essere definito come:

$$\bar{r}_n = \frac{r_n^{st}}{r^{st}} \quad (1.33)$$

Dove:

r^{st} è il valore statico della risposta r in seguito all'applicazione di un set $\{s\}$ di forze statiche alla struttura; $\{s\}$ può essere definito come $\{s\} = [M]\{1\}$.

r_n^{st} (n -esima risposta statica modale) è il valore statico della risposta r in seguito all'applicazione di un set $\{s_n\}$ di forze statiche alla struttura; $\{s_n\}$ può essere definito come $\{s_n\} = \Gamma_n[M]\{\phi_n\}$.

$\{\phi_n\}$ è l'autovettore corrispondente all' n -esima frequenza modale del sistema.

$\Gamma_n = \frac{\{\phi_n\}^T[M]\{1\}}{\{\phi_n\}^T[M]\{\phi_n\}}$ è il coefficiente di partecipazione modale per il modo n .

Gli N *modal contribution factors*, ovvero gli \bar{r}_n definiti sopra, sono caratterizzati dalle seguenti proprietà:

- sono adimensionali;
- sono indipendenti dalla normalizzazione dei modi $\{\phi_n\}$;
- la somma effettuata per tutti i modi dà l'unità (i.e. $\sum_{n=1}^N \bar{r}_n = 1$).

Se viene assunta come quantità significativa la massa modale, il *modal contribution factor* \overline{M}_n è definito come:

$$\overline{M}_n = \frac{M_n^{st}}{M^{st}} = \frac{M_n^*}{\sum_{n=1}^N M_n^*} \quad (1.34)$$

Dove $M_n^* = \Gamma_n \cdot \{\phi_n\}^T [M] \{1\} = \frac{(\{\phi_n\}^T [M] \{1\})^2}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}}$ è la massa efficace della struttura del modo n-esimo e può essere interpretata come la parte di massa totale che risponde al sisma secondo il modo n-esimo; al denominatore invece compare la massa totale $\sum_{n=1}^N M_n^* = M_{tot}$.

Le espressioni dei *modal contribution factors* dipendono dai modi di vibrare della struttura e dalla massa del sistema, per cui dalle sole caratteristiche fisiche del sistema, dato che gli autovettori sono dati in forma chiusa. Anche per questi fattori è possibile quindi dare una rappresentazione in forma chiusa; la massa efficace dei tre modi, sotto le ipotesi di forzante sismica solo in direzione y ed eccentricità longitudinale nulla, si può esprimere come:

$$M_1^* = m \frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2 + \rho_m} \quad (1.35)$$

$$M_2^* = m \quad (1.36)$$

$$M_3^* = m \frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2 + \rho_m} \quad (1.37)$$

Per cui i *modal contribution factor* relativi ai tre modi di vibrare del sistema avranno la seguente espressione in forma chiusa, in cui non state sostituite le espressioni dei modi di vibrare per non appesantire la notazione:

$$\overline{M}_1 = \frac{1}{\frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2 + \rho_m} + 1 + \frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2 + \rho_m}} \cdot \frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2 + \rho_m} \quad (1.38)$$

$$\overline{M}_2 = \frac{1}{\frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2 + \rho_m} + 1 + \frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2 + \rho_m}} \quad (1.39)$$

$$\overline{M}_3 = \frac{1}{\frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_1-1}\right)^2 + \rho_m} + 1 + \frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2 + \rho_m}} \frac{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2}{\left(\frac{e\sqrt{12}}{\Omega_3-1}\right)^2 + \rho_m} \quad (1.40)$$

1.3.3 Periodi di vibrazione

Allo studio dei *modal contribution factors* è stato affiancato quello dei periodi di vibrazione normalizzati rispetto al periodo longitudinale, coincidente con il T_2 .

Dallo studio degli autovalori si è visto che per gli intervalli delle grandezze e, Ω_ϑ presi in esame in questo studio ($0 \leq e \leq 0.48$; $0.15 \leq \Omega_\vartheta \leq 2$), il primo ed il secondo modo di vibrare hanno delle pulsazioni proprie molto vicine, in particolare $\omega_1 \leq 1$ e $\omega_2 = 1$, mentre il terzo assume valori molto più elevati ($\omega_3 \gg \omega_1, \omega_2$) e solo per un ristretto intervallo di coppie (e, Ω_ϑ) si avvicina all'unità.

Per la nota relazione tra periodo e frequenza ($T = \frac{2\pi}{\omega}$), dallo studio del problema agli autovalori è possibile ottenere una formulazione analitica in forma chiusa anche per i tre periodi di vibrazione:

$$T_1 = \frac{T_L}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \gamma^2 - \sqrt{(\gamma^2 - 1)^2 + 48 \cdot e^2} \right\}}} \quad (1.41)$$

$$T_2 = T_L \quad (1.42)$$

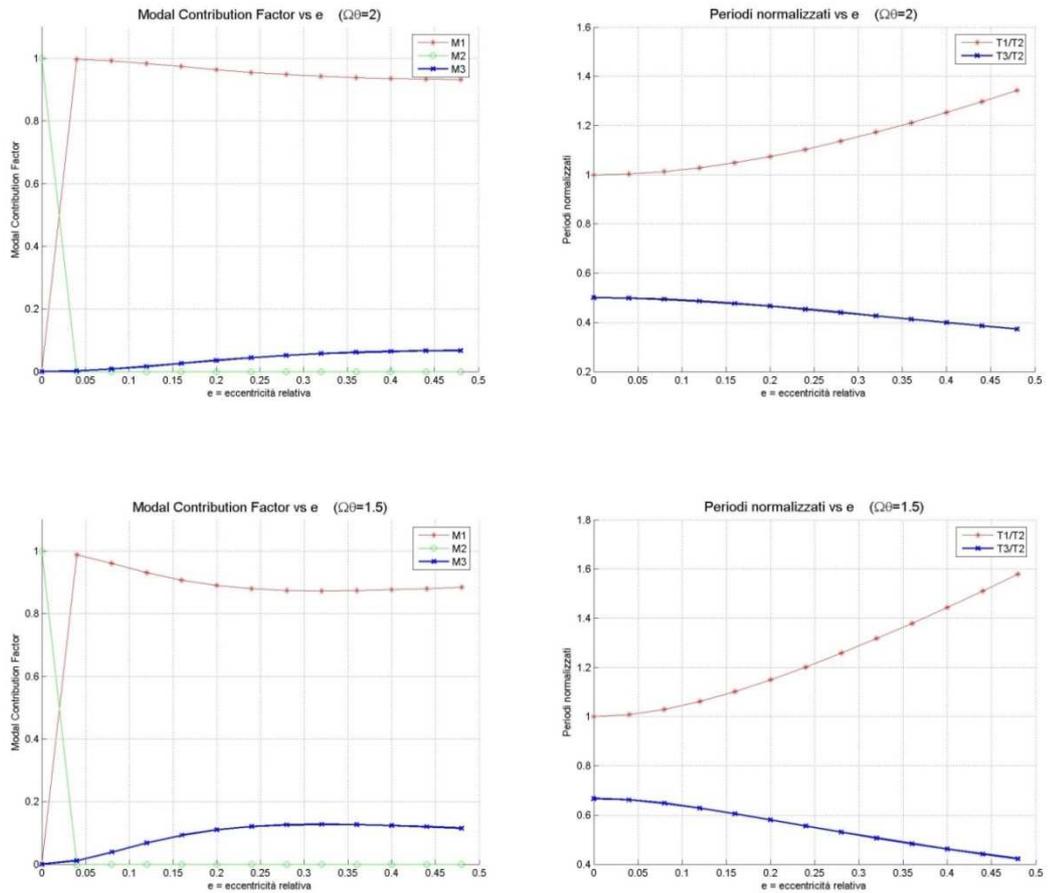
$$T_3 = \frac{T_L}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \gamma^2 + \sqrt{(\gamma^2 - 1)^2 + 48 \cdot e^2} \right\}}} \quad (1.43)$$

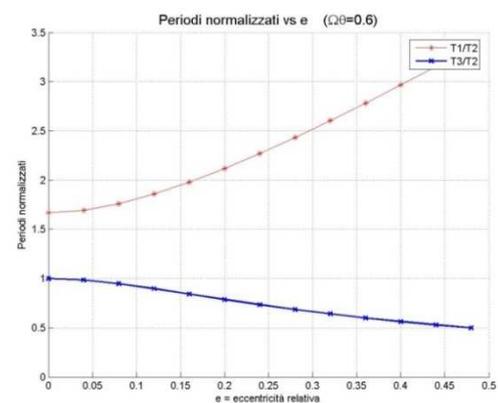
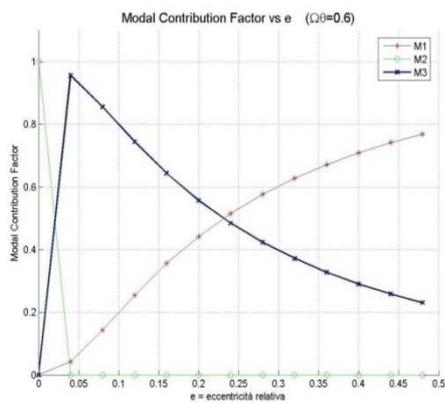
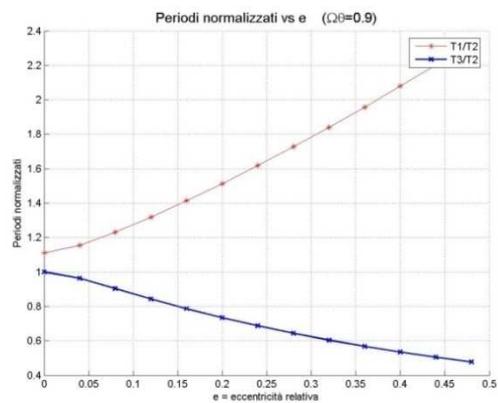
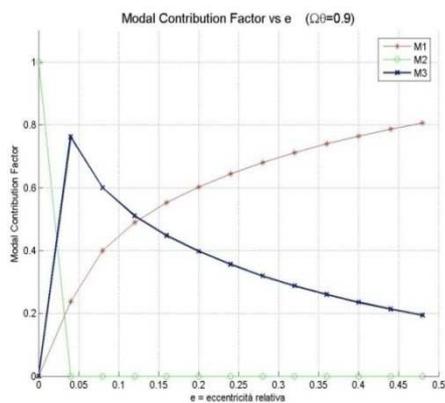
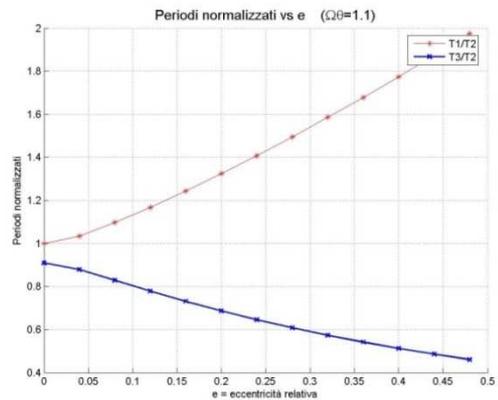
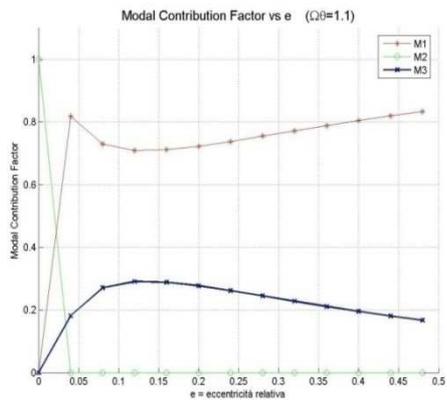
È inoltre possibile affermare che per i valori più frequenti delle grandezze che caratterizzano il sistema il periodo fondamentale è prossimo a quello longitudinale ($T_1 \cong T_2 = T_L$) e il terzo periodo è molto più piccolo degli altri due ($T_3 \ll T_1, T_2$); per coppie limitate di valori di (e, Ω_ϑ), T_1 e T_3 si avvicinano al periodo

longitudinale.

Per capire quali modi contano nel comportamento delle strutture torsioflessibili e quali in quello delle torsiorigide e come variano i tre periodi di vibrazione nei due casi, sono stati rappresentati i valori dei *modal contribution factors* e dei periodi normalizzati rispetto a T_L , in funzione dell' eccentricità relativa e e di Ω_θ .

Vengono riportati prima i grafici delle strutture torsiorigide, che si suppone abbiano un comportamento più regolare, poi di quelle torsioflessibili:





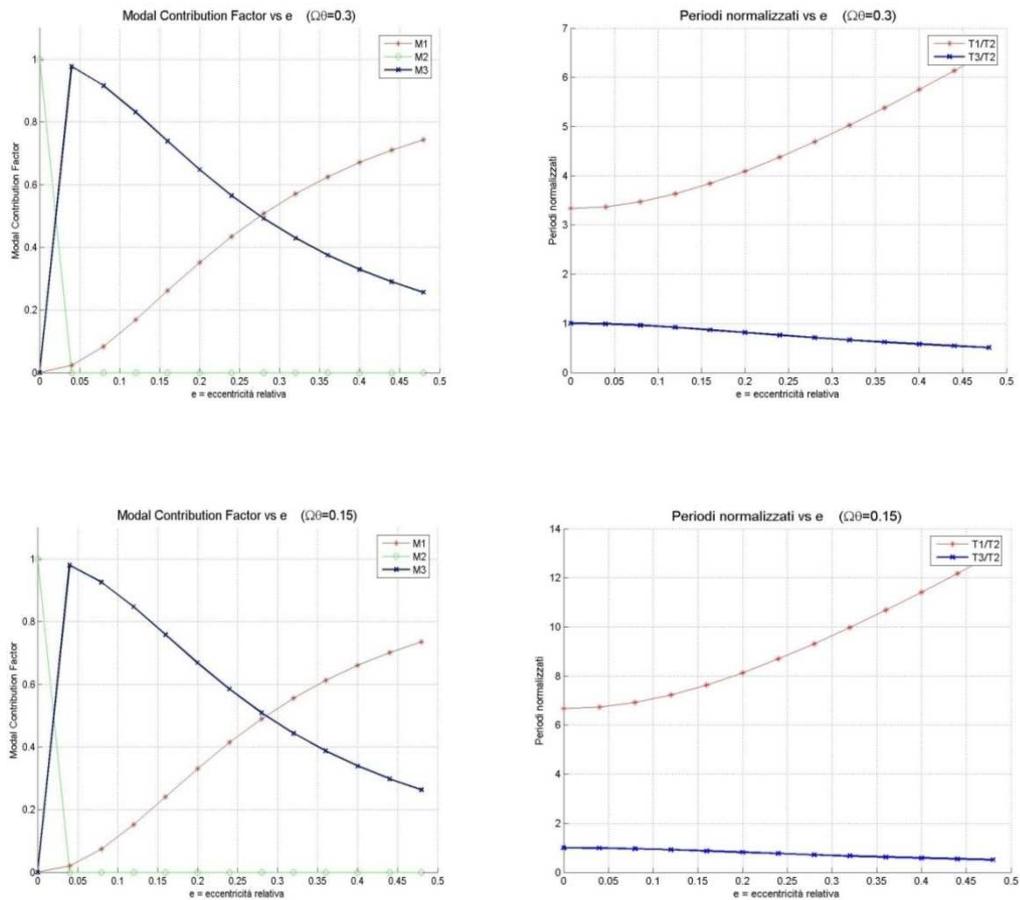


Fig. 1.7 I modal contribution factors ed i periodi normalizzati in funzione di e, Ω_0 .

Dai grafici è possibile ricavare le seguenti informazioni:

- il *modal contribution factor* M_2 è pari ad uno per eccentricità nulla e va a zero non appena questa assume valori diversi da zero;
- il *modal contribution factor* M_1 ha un valore iniziale pari a zero e assume valori crescenti con l'eccentricità, inoltre i contributi maggiori di questo fattore si manifestano nelle strutture torsiorigide;
- il *modal contribution factor* M_3 ha anch'esso un valore iniziale nullo e raggiunge il suo massimo per eccentricità $e < 5\%$ nelle strutture torsioflessibili, mentre non supera lo 0.25 per quelle torsiorigide;
- per valori di eccentricità ricorrenti ($e \leq 0.24$) il comportamento della struttura è regolato da M_3 per $\Omega_0 < 1$ e da M_1 per $\Omega_0 > 1$;

- il rapporto tra i periodi fondamentale e longitudinale T_1/T_2 è crescente con l'eccentricità ed assume valori molto elevati nelle strutture torsioflessibili, per le quali si può avere T_1 più di dieci volte superiore a T_2 ;
- il rapporto T_1/T_2 è molto prossimo all'unità per le strutture torsiorigide e con valori comuni di eccentricità;
- il rapporto tra il periodo più piccolo e quello longitudinale T_3/T_2 è sempre molto basso e diminuisce all'aumentare dell'eccentricità, in particolare i valori più bassi si registrano per le strutture torsiorigide, per le quali la differenza tra i due periodi è più marcata;
- riassumendo il comportamento della struttura è regolato da T_3/T_2 per $\Omega_\theta < 1$ e da T_1/T_2 per $\Omega_\theta > 1$.

1.3.4 Fundamental period shifting

Le strutture torsiorigide presentano dunque un andamento regolare dei periodi normalizzati e il periodo fondamentale è circa uguale a quello longitudinale, per cui anche lo spostamento in corrispondenza del primo periodo è molto prossimo a quello in corrispondenza del periodo longitudinale .

Le strutture torsioflessibili sono caratterizzate invece da un aumento improvviso del rapporto T_1/T_2 , per cui lo spostamento in corrispondenza di T_1 o di $T_2 = T_L$ non possono più essere considerati indifferentemente come per le strutture torsiorigide.

Analizzando l'andamento caratteristico dello spettro degli spostamenti, che a meno di locali irregolarità è possibile ricondurre ad una forma linearizzata, è immediato vedere come da un certo periodo T_D in poi non c'è differenza negli spostamenti se si considera un periodo di vibrazione invece dell' altro, ma per periodi inferiori a T_D questi spostamenti possono essere completamente differenti:

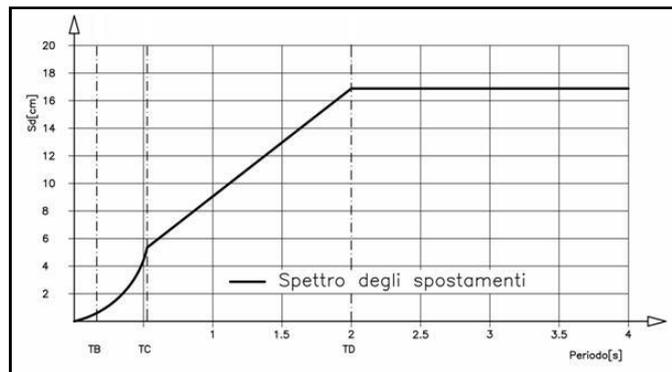


Fig. 1.8 Forma dello spettro degli spostamenti linearizzato.

L'effetto prodotto dalla non coincidenza tra periodo fondamentale e periodo longitudinale nella valutazione dello spostamento viene quindi ad assumere grande importanza; questo fenomeno viene chiamato *fundamental period shifting*, ad indicare che il periodo fondamentale subisce uno shift temporale rispetto a quello longitudinale nelle strutture torsioflessibili quando c'è eccentricità tra il baricentro delle masse e quello delle rigidezze.

L'eccentricità è dunque la grandezza che condiziona maggiormente il comportamento delle strutture asimmetriche, producendo effetti sia nello spostamento longitudinale del centro di massa indipendente dalla rotazione, attraverso il *fundamental period shifting*, che direttamente nella rotazione.

1.4 INTRODUZIONE DELLO SMORZAMENTO

L'analisi della risposta del sistema nel caso di oscillazioni libere in assenza di smorzamento rappresenta una condizione ideale in cui la struttura, perturbata da una deformazione iniziale, non dissipa energia per smorzamento viscoso. Nei casi reali non è quindi possibile fare riferimento alle soluzioni trovate nei paragrafi precedenti ma è necessario determinare nuovamente le soluzioni della (1.4), tenendo conto questa volta della matrice $[C]$. Agendo secondo i criteri dell'analisi modale, però, non si arriva a quel disaccoppiamento delle equazioni del sistema che permette di considerarlo come un insieme di oscillatori semplici, perché in genere $[C]$ non è simmetrica, quindi non si può beneficiare dell'ortogonalità dei modi. Una soluzione è rappresentata dall'assumere uno smorzamento alla

Rayleigh e costruire la classica matrice di smorzamento.

1.4.1 Smorzamento alla Rayleigh

Lo smorzamento alla Rayleigh è il classico smorzamento proporzionale alla matrice delle masse e a quella delle rigidità:

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (1.44)$$

con a_0 e a_1 dimensionalmente pari all'inverso del secondo ed al secondo. Fisicamente questi due contributi possono essere rappresentati dai sistemi mostrati in Fig. 1.9:

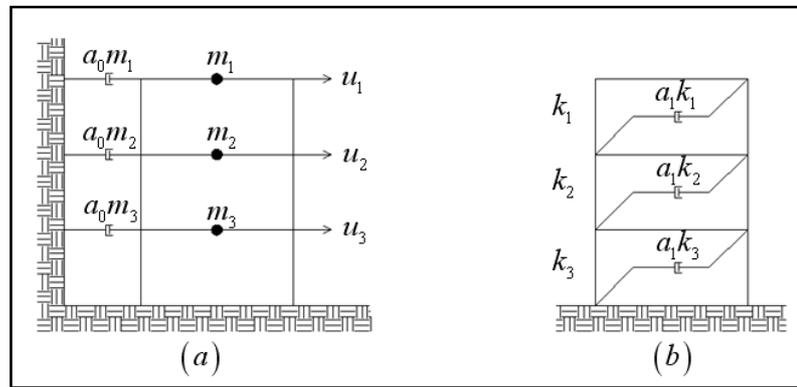


Fig. 1.9 smorzamento proporzionale alle masse; (b) smorzamento proporzionale alle rigidità.

Se il rapporto di smorzamento per l'ennesimo modo è dato dalla:

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (1.45)$$

allora considerando due rapporti di smorzamento specifici per due generici modi i e j , i coefficienti a_0 ed a_1 possono essere determinati dal seguente sistema:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (1.46)$$

Se si assume che entrambi i modi abbiano lo stesso rapporto di smorzamento, i coefficienti assumono la seguente espressione:

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (1.47)$$

e quindi la matrice di smorzamento si calcola sostituendo le (1.41) all'interno della

(1.38)⁴.

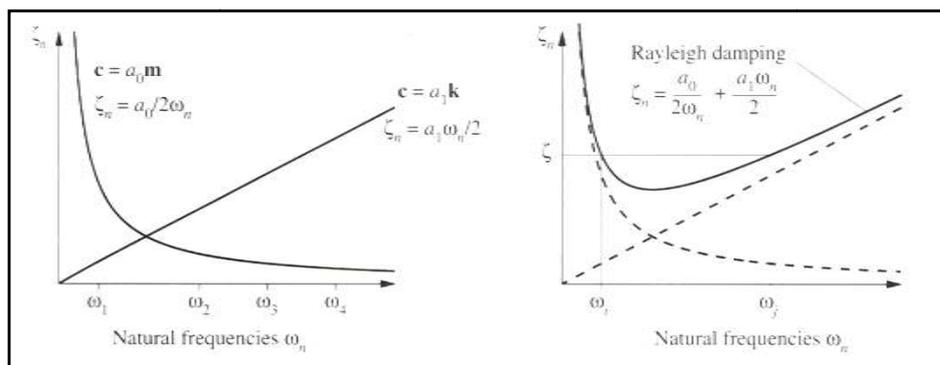


Fig. 1.10 Variazione del rapporto di smorzamento modale con le frequenze naturali

1.5 IL SISTEMA DINAMICO SOTTOPOSTO A FORZANTE SISMICA: L'EQUAZIONE DEL MOTO

L'equazione del moto fin qui definita considera una forzante generica composta da due forze e un momento; in questo studio si intende associare a questa forzante generica un input sismico.

Si considera dunque come forzante il prodotto tra la massa del sistema, considerata efficace in ugual maniera per ognuno dei tre gradi di libertà, e l'accelerazione fornita da uno specifico record sismico. La (1.4) diventa quindi:

⁴ Nella pratica il modo i-esimo e j-esimo con lo stesso rapporto di smorzamento dovrebbero essere scelti per assicurare rapporti di smorzamento ragionevoli per tutti i modi che contribuiscono in modo significativo alla risposta della struttura.

$$\begin{aligned}
& m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \\ \ddot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \\ \dot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} \\
& + m\omega_L^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_y\rho_m\sqrt{12} \\ 0 & 1 & e_x\rho_m\sqrt{12} \\ -e_y\rho_m\sqrt{12} & e_x\rho_m\sqrt{12} & (\Omega_\vartheta^2 + 12(e_x^2 + e_y^2))\rho_m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\vartheta \end{Bmatrix} \quad (1.48) \\
& = m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_m^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_\vartheta(t) \end{Bmatrix} = m \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ \rho_m^2 a_\vartheta(t) \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

In particolare si considera una eccitazione sismica unidirezionale (*uniaxial excitation*) lungo y, per cui il secondo membro dell'equazione del moto si modifica nel modo seguente:

$$\begin{aligned}
& m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \\ \ddot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \\ \dot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} \\
& + m\omega_L^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_y\rho_m\sqrt{12} \\ 0 & 1 & e_x\rho_m\sqrt{12} \\ -e_y\rho_m\sqrt{12} & e_x\rho_m\sqrt{12} & (\Omega_\vartheta^2 + 12(e_x^2 + e_y^2))\rho_m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\vartheta \end{Bmatrix} \quad (1.49) \\
& = m \begin{Bmatrix} 0 \\ a_y(t) \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

Poiché il sistema sviluppa la massima risposta rotazionale, per una data eccentricità trasversale e_x , quando l'eccentricità longitudinale è nulla ($e_y = 0$), si può semplificare ulteriormente l'equazione del moto senza tuttavia modificare l'obiettivo della trattazione cioè quello di valutare lo spostamento massimo del lato flessibile della struttura. L'equazione del moto si specializza quindi nella forma seguente:

$$\begin{aligned}
& m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \\ \ddot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \\ \dot{u}_\vartheta \end{Bmatrix} \\
& + m\omega_L^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & e\rho_m\sqrt{12} \\ 0 & e\rho_m\sqrt{12} & (\Omega_\vartheta^2 + 12e^2)\rho_m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\vartheta \end{Bmatrix} \quad (1.50) \\
& = m \begin{Bmatrix} 0 \\ a_y(t) \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

1.6 PARAMETRI FONDAMENTALI

Con l'obiettivo di ottenere risultati il più possibile generali devono essere considerati sistemi strutturali con caratteristiche tra loro diverse; occorre stabilire quali tra le grandezze che descrivono il comportamento della struttura finora elencate sono indipendenti o possono essere espresse in funzione di altre. Facendo riferimento all'equazione del moto (1.44), la massa m può essere semplificata, in quanto la forzante è il prodotto di una massa per un'accelerazione e la matrice di smorzamento è stata costruita proporzionalmente a quella delle masse e a quella delle rigidezze.

Gli unici termini che compaiono nell'equazione che regola la risposta dinamica del generico sistema per un dato rapporto di smorzamento ζ sono quindi:

- il raggio d'inerzia delle masse ρ_m valutato rispetto al baricentro delle masse C_M ;
- l'eccentricità relativa e ;
- la frequenza angolare $\omega_L = \sqrt{\frac{k}{m}}$ dell'oscillatore semplice equivalente con stessa massa e stessa rigidezza totale della struttura;
- il rapporto tra i raggi d'inerzia delle rigidezze e delle masse $\Omega_\vartheta = \frac{\rho_k}{\rho_m}$.

Con riferimento all'espressione esplicita del raggio d'inerzia delle masse si può osservare che questo è funzione diretta della diagonale equivalente D_e , come del

resto anche la stessa eccentricità relativa e . Fra queste grandezze sussistono infatti le relazioni:

$$D_e = \rho_m \sqrt{12} ; e = \frac{E}{D_e}$$

per cui sostituendo si ottiene:

$$e = \frac{E}{D_e} = \frac{E}{\rho_m \sqrt{12}}$$

Disponendo di un'unica relazione per tre incognite, per determinarne una in modo univoco, occorre assegnare due valori; si sceglie di assegnare dei valori all'eccentricità relativa e , quindi indirettamente alla diagonale equivalente D_e , e di fissare le dimensioni in pianta della struttura ($L \times B$).

Le strutture inoltre si diversificano, come già visto, per i valori del rapporto Ω_g , parametro strutturale funzione di sole proprietà fisiche del sistema, in strutture torsiorigide ($\Omega_g > 1$) e strutture torsioflessibili ($\Omega_g < 1$).

Infine la risposta dinamica ottenuta come soluzione della (1.44) è influenzata dalla pulsazione ω_L quindi dal periodo di vibrazione longitudinale della struttura T_L , per effetto della relazione che sussiste tra le due grandezze ($T_L = \frac{2\pi}{\omega_L}$).

In sintesi i parametri strutturali che influenzano la soluzione della (1.44) sono:

- eccentricità relativa e ;
- rapporto tra i raggi d'inerzia Ω_g ;
- periodo di vibrazione longitudinale T_L ;
- rapporto di smorzamento ξ ;
- diagonale equivalente D_e (definita dai valori fissati della dimensione in pianta $L \times B$).

Come si può osservare non compare fra le caratteristiche strutturali che influenzano la risposta del sistema la massa m . In realtà la massa totale è all'interno della pulsazione ω_L e viene automaticamente fissata assieme alla rigidità quando si fissa il periodo proprio della struttura. Infatti $T_L = \frac{2\pi}{\omega_L} =$

$$2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Un'ultima considerazione spetta alla scelta delle dimensioni in pianta della struttura. Anche in questo caso è necessario fare delle valutazioni di carattere generale e quindi sembrerebbe più opportuno ragionare in termini di fattore di forma, tenendo fissata una delle due dimensioni. Introducendo infatti un fattore di forma Φ e fissando la dimensione longitudinale B è possibile considerare una casistica abbastanza completa.

In definitiva, per una dimensione longitudinale B fissata, i parametri indipendenti che descrivono la struttura sono:

- eccentricità relativa e ;
- rapporto tra i raggi d'inerzia Ω_g ;
- periodo di vibrazione longitudinale T_L ;
- rapporto di smorzamento ξ ;
- diagonale equivalente D_e (che dipende da B e dal fattore di forma Φ).

1.7 INFLUENZA DELL'ECCEMTRICITÀ SULLA ROTAZIONE E SULLA TRASLAZIONE DEL CENTRO DI MASSA

Il sistema dinamico asimmetrico sollecitato da una forzante sismica è soggetto, per effetto dell'eccentricità presente tra baricentro delle masse e baricentro delle rigidzze, ad un movimento di traslazione e ad una rotazione rispetto alla configurazione iniziale, come mostrato in Fig. 1.11:

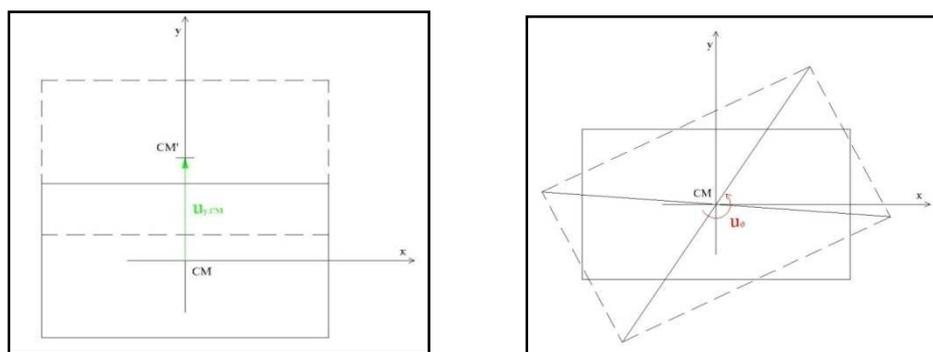


Fig. 1.11 *Traslazione del sistema per effetto dell'eccentricità; (b) rotazione del sistema per effetto dell'eccentricità.*

Questi due effetti possono essere più o meno marcati a seconda delle caratteristiche della struttura, in particolare è facile aspettarsi che la rotazione sia più marcata nelle strutture torsioflessibili piuttosto che in quelle torsiorigide, più difficile è fare previsioni sulle caratteristiche della traslazione.

Per capire come l'eccentricità influenza il comportamento delle strutture asimmetriche soggette a forzante sismica, è stata analizzata l'influenza dell'eccentricità a livello analitico direttamente sulle equazioni del moto, nello studio dei modi di vibrare e a livello fisico.

1.7.1 Effetto dell'eccentricità: l'equazione del moto

Nei paragrafi precedenti è stata proposta l'equazione del moto per il sistema eccentrico. Nel caso di sistema non eccentrico il baricentro delle masse e quello delle rigidezze coincidono e in questo punto sono applicate sia la forza d'inerzia che la reazione della struttura. Poichè non c'è eccentricità tra i due baricentri, il braccio della coppia torcente è nullo e il sistema sarà sottoposto alla sola traslazione nella direzione d'azione del sisma. I gradi di libertà del sistema sono rappresentati dalla traslazione trasversale, da quella longitudinale e dalla rotazione $\{u_x \quad u_y \quad u_\theta\}$, ma solo i primi due vengono attivati.

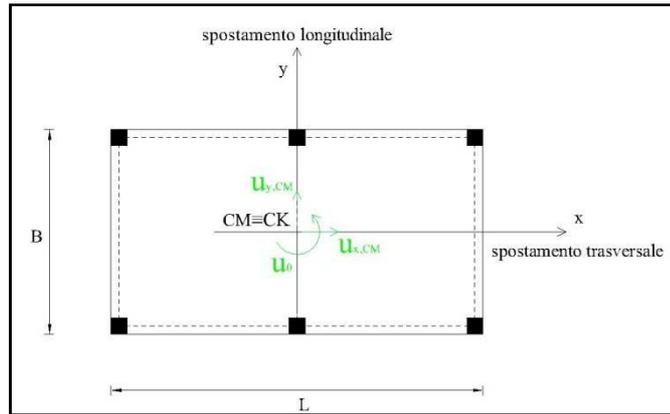


Fig. 1.12 Sistema non eccentrico a tre gradi di libertà: traslazione trasversale, traslazione longitudinale e rotazione.

Le equazioni del moto per questo sistema si semplificano notevolmente rispetto alle (1.44), il terzo grado di libertà non partecipa e non sono presenti i termini relativi all'eccentricità:

$$m \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_y \\ \ddot{u}_\theta \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \\ \dot{u}_\theta \end{Bmatrix} + m\omega_L^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_x(t) \\ p_y(t) \\ p_\theta(t) \end{Bmatrix} \quad (1.51)$$

Le matrici delle masse e di rigidezza assumono in questo caso particolare la forma diagonale, per cui anche la matrice di smorzamento, che è stata costruita come combinazione lineare di $[M]$ e di $[K]$, è diagonale e le equazioni del moto diventano due equazioni differenziali disaccoppiate. I due gradi di libertà che vengono attivati sono indipendenti l'uno dall'altro e possono essere rappresentati mediante due oscillatori semplici equivalenti, ovvero di ugual massa e rigidezza del sistema di partenza.

Nelle strutture eccentriche c'è accoppiamento delle equazioni del moto, per cui i tre movimenti non sono indipendenti tra di loro e si possono avere situazioni in cui due o più gradi di libertà partecipano alla risposta complessiva in una determinata direzione.

1.7.2 Effetto dell'eccentricità: il fundamental period shifting

Nel paragrafo 1.3.4 si è studiato nel dettaglio l'effetto dell'eccentricità nelle strutture torsiorigide e in quelle torsioflessibili.

Il comportamento delle prime è definito dal primo modo di vibrare, che conta per quasi la totalità nella risposta complessiva, e dal periodo fondamentale che è molto vicino a quello longitudinale. Nelle strutture torsioflessibili il primo e il terzo modo contribuiscono a determinare la risposta complessiva, inoltre il periodo fondamentale subisce uno shift temporale rispetto a quello longitudinale, per cui è lecito aspettarsi un comportamento differente rispetto alle altre.

In base a questa osservazione è possibile quindi fare una previsione di come l'eccentricità influenza la traslazione del centro di massa. Le strutture torsioflessibili, per le quali il periodo fondamentale può essere anche dieci volte più grande di quello longitudinale, possono manifestare in alcuni casi delle traslazioni longitudinali del centro di massa molto significative e molto più marcate delle corrispondenti strutture non eccentriche (valutate in corrispondenza di T_L).

Le strutture torsiorigide sono invece contraddistinte dall'aver il periodo fondamentale molto prossimo a quello longitudinale, per cui hanno una traslazione rispetto all'equivalente sistema non eccentrico che non subisce grandi incrementi.

1.7.3 Effetto dell'eccentricità dal punto di vista fisico

Il comportamento specifico delle strutture torsiorigide e di quelle torsioflessibili viene descritto mediante una rappresentazione fisica degli effetti dell'eccentricità sul sistema utilizzando come spostamento di controllo quello del punto d'angolo del lato flessibile (B).

Le strutture torsiorigide non eccentriche, in seguito all'applicazione di una forzante sismica longitudinale, manifestano una traslazione secondo questa direzione proporzionale alla rigidezza del sistema, definita a partire dal periodo di vibrazione, che in questo caso è il periodo longitudinale. Le stesse strutture caratterizzate da un'eccentricità in direzione trasversale, manifestano una traslazione e una rotazione. Dallo studio dei modi di vibrare si è visto che il comportamento di queste strutture è regolato principalmente dal periodo fondamentale, che si è mostrato essere vicino a quello longitudinale; lo

spostamento longitudinale del lato flessibile sarà quindi paragonabile a quello della struttura non eccentrica.

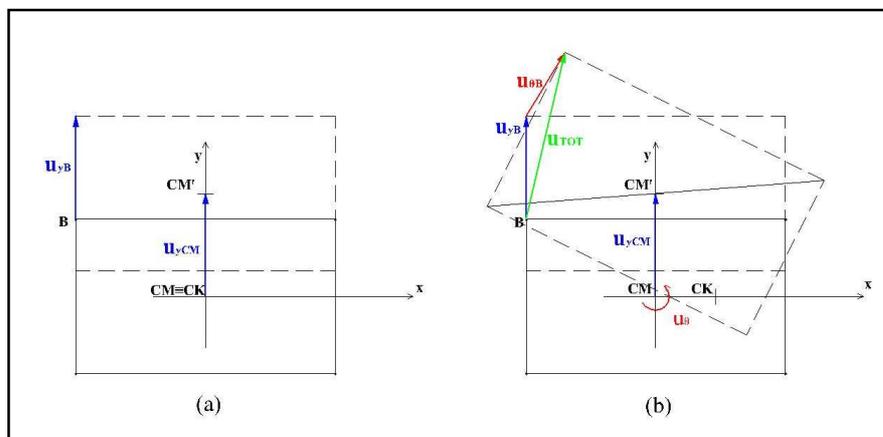


Fig. 1.13 *Traslazione del sistema torsiorigido non eccentrico; (b) rototraslazione del sistema torsiorigido eccentrico.*

Le strutture torsioflessibili eccentriche, quando sono sollecitate da una forzante sismica in direzione y , sviluppano una traslazione che, a causa dello shift temporale, risulta molto più accentuata rispetto al sistema equivalente non eccentrico. In aggiunta a questo spostamento ci sarà anche la rotazione, che si sviluppa in seguito alla presenza di eccentricità tra il baricentro delle masse e quello delle rigidezze.

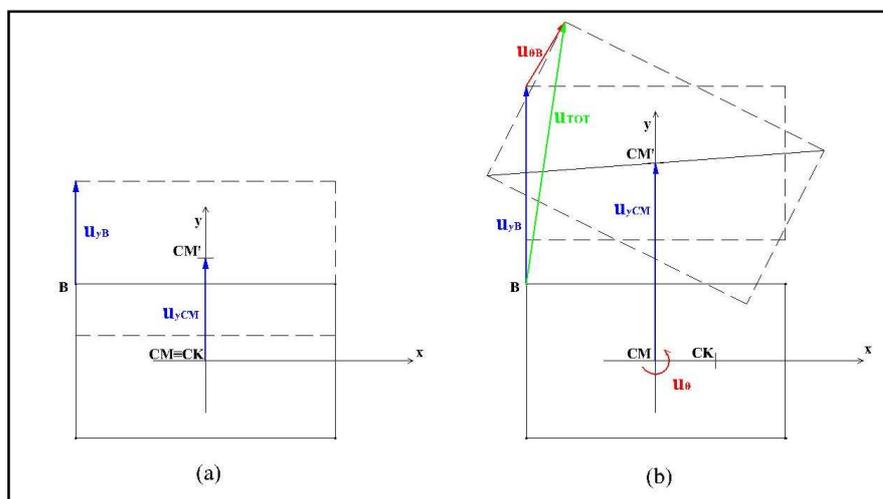


Fig. 1.14 *Traslazione del sistema torsioflessibile non eccentrico; (b) rototraslazione del sistema torsioflessibile eccentrico.*

La presenza di eccentricità influisce quindi sia sulla traslazione che sulla rotazione

del lato flessibile della struttura, in maniera dipendente dalle caratteristiche della struttura. Le strutture torsiorigide presentano uno spostamento totale del lato flessibile dovuto in gran parte all'effetto della traslazione longitudinale, per cui è possibile assumere che lo spostamento longitudinale massimo del sistema a tre gradi di libertà sia molto prossimo a quello della struttura equivalente non eccentrica (ovvero in prossimità del periodo longitudinale).

Le strutture torsioflessibili presentano anch'esse una risposta condizionata prevalentemente dalla traslazione e lo spostamento longitudinale assume valori molto elevati in seguito all'effetto del *fundamental period shifting*. In questo caso la risposta complessiva sarà influenzata dal primo modo di vibrare, che non coincide più con quello longitudinale, quindi di una struttura non eccentrica, e dal terzo; non si possono pertanto fare delle semplificazioni nella valutazione dello spostamento massimo in direzione y come nel caso precedente.

CAPITOLO 2

LA RISPOSTA LONGITUDINALE MASSIMA DI STRUTTURE ECCENTRICHE IN PIANTA

2.1 INTRODUZIONE

La non coincidenza tra baricentro delle masse e centro delle rigidità modifica sia la risposta rotazionale massima che quella longitudinale massima del centro di massa, che si può esprimere dal punto di vista analitico direttamente sulle equazioni del moto e da quello fisico attraverso una rototraslazione del sistema.

In questo capitolo viene studiato il modo in cui l'asimmetria influenza lo spostamento longitudinale massimo del centro massa e i parametri che maggiormente condizionano questa risposta; viene inoltre individuata una combinazione degli spostamenti di tre oscillatori semplici equivalenti, valutati per i tre periodi di vibrazione della struttura, che approssima bene la traslazione in direzione longitudinale del centro di massa. Si giunge infine ad una formulazione semplificata di questa combinazione per le strutture torsiorigide; per tutte le configurazioni vengono proposti gli andamenti del rapporto δ tra lo spostamento longitudinale massimo del centro di massa del sistema a tre gradi di libertà e la combinazione delle risposte degli oscillatori semplici.

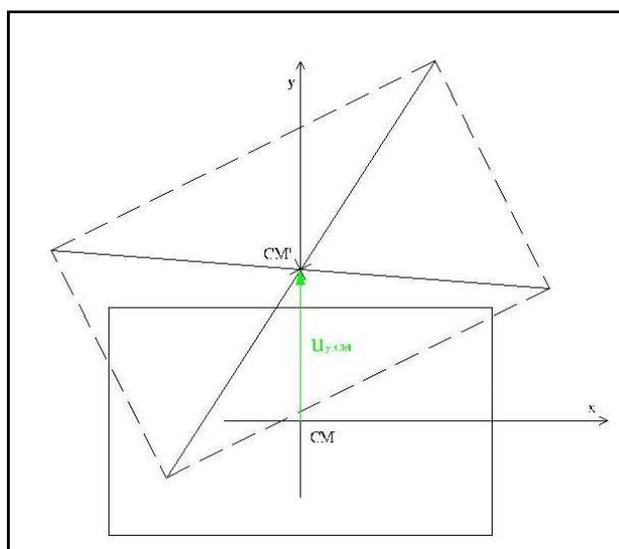


Fig. 2.1 Effetti dell'asimmetria: spostamento longitudinale del centro di massa e rotazione.

2.2 STUDI CONDOTTI DA NAGARAJAIAH

Nagarajaiah già dai primi anni novanta si occupa dello studio dei sistemi multipiano eccentrici ed isolati alla base in termini di rapporto di spostamento del lato flessibile rispetto allo spostamento del centro di massa; da questi studi si trovano indicazioni significative su tale rapporto e sulle grandezze che lo influenzano, ovvero periodo longitudinale, eccentricità e rapporto tra il raggio d'inerzia delle rigidezze rispetto al raggio d'inerzia delle masse.

Attraverso simulazioni numeriche e prove strumentali sono stati ottenuti dei risultati che tutt'ora rappresentano dei punti di riferimento per lo studio del comportamento torsionale delle strutture; le osservazioni più rilevanti ai fini di questo studio sono le seguenti:

- la traslazione del lato flessibile della struttura è maggiore di quella al centro di massa quando sono presenti coppie torcenti;
- il parametro fondamentale che influenza la risposta torsionale delle strutture isolate è l'eccentricità;
- lo spostamento massimo e la rotazione aumentano all'aumentare del periodo longitudinale della struttura T_S ;

- il rapporto tra lo spostamento del lato flessibile e quello al centro di massa della struttura $\overline{U_{cs}}$ e della base $\overline{U_{cb}}$ aumentano all'aumentare dell'eccentricità e al diminuire del parametro γ ;
- i rapporti $\overline{U_{cs}}$ e $\overline{U_{cb}}$ sono prossimi all'unità per strutture torsiorigide, per le quali la risposta torsionale può essere trascurata.

L'ultima osservazione riguardo il rapporto degli spostamenti al centro di massa e al lato flessibile per le strutture eccentriche torsiorigide è stata avvalorata nel precedente capitolo. Nagarajaiah non tratta in modo specifico il comportamento delle strutture torsioflessibili, per le quali non è possibile formulare le stesse conclusioni sul rapporto degli spostamenti del lato flessibile e al centro di massa.

Nel seguito della trattazione verranno quindi studiate nel dettaglio queste strutture, per le quali, tramite i risultati dell'analisi modale, sono già stati individuati i motivi per cui presentano un comportamento singolare.

2.3 NECESSITÀ DI CAPIRE ALTRE CLASSI DI STRUTTURE

Indagini condotte sui valori che possono assumere le strutture reali al variare dei parametri e, Ω_g , hanno individuato i massimi e i minimi per queste due grandezze; gli intervalli a cui si farà riferimento d'ora in poi sono quindi: $0 < e < 0,48$, $0.15 < \Omega_g < 2$. Come mostrato in precedenza, una prima importante distinzione tra le strutture è determinata dalla grandezza Ω_g , per cui si individuano le strutture torsiorigide ($\Omega_g > 1$) e quelle torsioflessibili ($\Omega_g < 1$). In particolare le strutture torsiorigide sono rappresentate dalle strutture a pilastri con più di un elemento irrigidente dislocati in maniera regolare in pianta, mentre quelle torsioflessibili sono le strutture a pilastri con un unico elemento fortemente irrigidente e non centrale.

In Fig. 2.2 sono riportate tutte le strutture effettivamente realizzabili per gli intervalli individuati di e, Ω_g ; nel piano che presenta in ascissa l'eccentricità relativa e in ordinata i valori del parametro Ω_g , ogni struttura è rappresentata da

un punto.

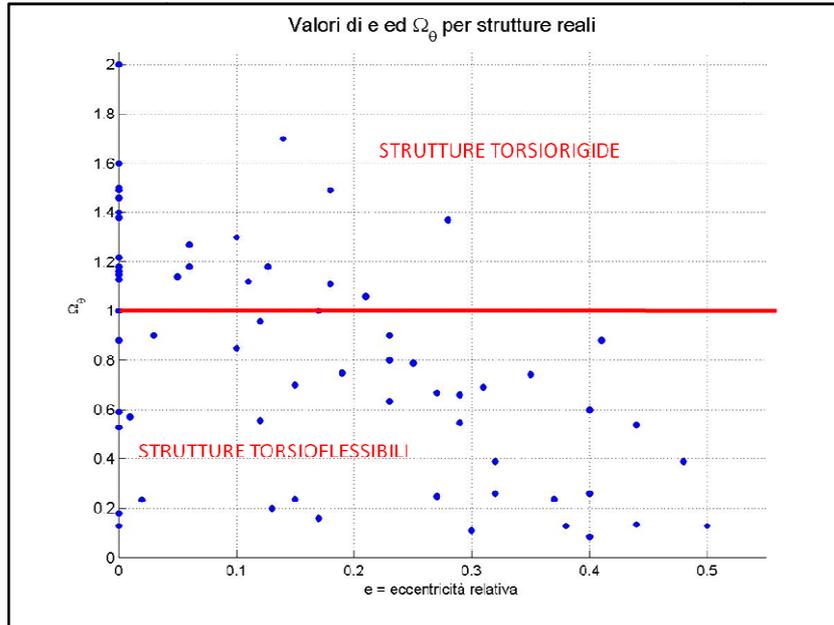


Fig. 2.2 Strutture reali nel piano e, Ω_θ e suddivisione tra strutture torsiorigide e strutture torsioflessibili.

Va notato che, posti i limiti per Ω_θ , non tutte le coppie di valori possibili sono riconducibili a situazioni reali; in particolare solo al di sotto della diagonale che congiunge i punti $(0;2)$ e $(0.5;0.15)$ si trovano strutture reali.

Da un'analisi di come si dispongono le strutture nel grafico è possibile affermare che:

- strutture fortemente torsiorigide non possono sviluppare grandi eccentricità;
- strutture caratterizzate da elevate eccentricità sono necessariamente torsioflessibili;
- strutture non eccentriche possono sviluppare qualsiasi valore di Ω_θ ;
- strutture fortemente torsioflessibili possono sviluppare qualsiasi valore di eccentricità.

I valori del parametro Ω_θ inferiori all'unità significano che il raggio d'inerzia delle masse è un ordine di rigidità maggiore rispetto a quello delle rigidezze; le strutture torsioflessibili sono ad esempio le strutture a fungo, per le quali la massa

è piuttosto centrifugata rispetto al baricentro delle rigidezze, oppure strutture a pilastri con un unico elemento fortemente irrigidente ed eccentrico.

Trattandosi di strutture piuttosto speciali, il loro comportamento si discosta da quello di strutture più regolari ed è per questo che nella valutazione del rapporto tra lo spostamento del lato flessibile e quello al baricentro gli studi di Nagarajaiah individuano un comportamento diverso da quelle torsiorigide.

Per questo motivo si è pensato di allargare lo studio dello spostamento longitudinale massimo anche a queste strutture. Come già accennato le strutture torsioflessibili sono molto sensibili all'effetto dello shift temporale del periodo fondamentale, di conseguenza anche gli spostamenti valutati in corrispondenza di questo periodo e di quello longitudinale possono essere molto diversi. Per queste strutture anche il *modal contribution factor* M_3 conta molto nella risposta complessiva, per cui occorre analizzare in che modo gli spostamenti in corrispondenza di T_1 e di T_3 concorrono a determinare la risposta della struttura a tre gradi di libertà.

2.4 NUOVA FORMULAZIONE DEL RAPPORTO δ

Il rapporto δ nella sua classica formulazione è definito come il rapporto dello spostamento longitudinale al centro di massa e quello del sistema non eccentrico, valutato quindi in prossimità del periodo longitudinale T_L :

$$\delta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{|u_{y,CM}|_{max-ne}} = \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{|u_{sdof,m,T_L}|_{max}} \quad (2.1)$$

Sulla base delle osservazioni già svolte, si è ipotizzato che lo spostamento longitudinale massimo potesse essere approssimato tramite una combinazione degli spostamenti di tre oscillatori semplici equivalenti, quindi di ugual massa e rigidezza del sistema iniziale, valutati in prossimità di ciascun periodo di vibrazione della struttura. Ciascuno spostamento contribuisce alla risposta complessiva in maniera diversa, per cui la risposta totale può essere definita mediante una combinazione delle tre risposte per i corrispondenti *modal contribution factors*.

2.4.1 Combinazione dei modi

Negli anni sono state proposte molte formule per dare una stima della risposta massima delle strutture in termini di massimi modali, alcune più semplici di altre, ma soprattutto alcune risultano più adeguate in alcuni casi e meno in altri; come spesso accade le formule più complicate risultano anche le più accurate. In generale si esprimono queste formule in termini di una risposta generica $\{R(t)\}$, che può rappresentare qualsiasi parametro di risposta, come lo spostamento, la velocità, l'accelerazione o la forza interna. Inoltre $\max \{R(t)\}_r$ rappresenta il vettore che contiene i valori massimi della risposta secondo l' r -esimo modo della struttura, mentre $\max \{R(t)\}$ rappresenta il vettore che contiene i massimi valori stimati della risposta totale.

La somma dei massimi in valore assoluto, ovvero assumere che tutti i massimi della risposta modale accadano contemporaneamente e con lo stesso segno, rappresenta un limite superiore per la risposta massima ma è anche una stima troppo conservativa.

Stimando invece i massimi in senso statistico si ottiene una buona valutazione del valore medio della risposta massima di una struttura soggetta ad un set di input sismici; in questi termini occorre introdurre un coefficiente di correlazione modale ρ , che rappresenta una misura del grado di correlazione fra due risposte:

$$\rho_{mn} = \frac{E[[R(t)]_m[R(t)]_n]}{\sqrt{E[R^2(t)]_m}\sqrt{E[R^2(t)]_n}} \quad (2.2)$$

dove $E[R(t)]_{m,n}$ è il valor medio delle risposte m, n .

Il coefficiente ρ_{mn} assume valori compresi tra zero (quando vi è assenza di correlazione cioè quando variando una risposta l'altra non varia o varia in modo del tutto indipendente) e l'unità (quando vi è correlazione assoluta cioè quando le vibrazioni dei due modi sono in fase, per cui i massimi si esplicano allo stesso momento).

Una delle prime regole utilizzate per la combinazione delle risposte modali è la *SquareRoot of the Sum of the Squares* (SRSS), proposta nel 1953 da L. E. Goodman, E. Rosenblueth e N. M. Newmark. Questa regola si basa

sull'assunzione che non esiste alcuna correlazione significativa tra le risposte massime di due differenti modi, che vengono quindi assunte staticamente indipendenti, e che il coefficiente di correlazione ρ_{mn} può essere assunto uguale a zero per $m \neq n$; il risultato di questa assunzione comporta che la risposta complessiva può essere espressa come:

$$\max\{R(t)\} = \left\{ \sqrt{\sum_{r=1}^N (\max[R(t)]_r)^2} \right\} \quad (2.3)$$

dove N sono i gradi di libertà del sistema.

Questa regola è ampiamente utilizzata nella pratica e per molti anni è stata la regola suggerita dai codici e dalle normative sulle costruzioni per la combinazione delle risposte modali; risulta inoltre abbastanza accurata per le strutture flessibili regolari in pianta e in altezza.

2.4.2 Studio dell'effetto dell'eccentricità sulla risposta longitudinale

Una formulazione generale del rapporto δ può essere ottenuta tramite SRSS del prodotto degli spostamenti, valutati dallo spettro di risposta del sisma, in corrispondenza di ciascun periodo di vibrazione per il corrispondente *modal contribution factor*:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{\sqrt{(Sd(T_1) \cdot MCF_1)^2 + (Sd(T_2) \cdot MCF_2)^2 + (Sd(T_3) \cdot MCF_3)^2}} \quad (2.4) \\ &= \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{|u_{yCM,3_s dof}|_{max}} \end{aligned}$$

Al fine di verificare la validità della (2.4), sono state prese in esame tre diverse strutture; ciascuna di essa è stata sollecitata da un singolo input sismico e ne è stato valutato lo spostamento longitudinale massimo mediante integrazione diretta delle equazioni del moto. È stato inoltre calcolato lo spostamento di ciascun oscillatore semplice attraverso lo spettro di risposta del sisma in corrispondenza dei tre periodi di vibrazione.

L'input sismico selezionato per questa verifica è di tipo *far field* (distanza

dall'epicentro maggiore di 15 km), selezionato per una classe di terreno A ('ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s') ed una $PGA < 0.10g$; vengono riportate di seguito le caratteristiche del sisma ed lo spettro degli spostamenti:

Tabella. 2.1 Input sismico considerato (Peer Strong Motion Database)

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)	dt
			m/s ²	sec
Denali, Alaska	Carl Carlo	03/11/2002	0.0926	0.01

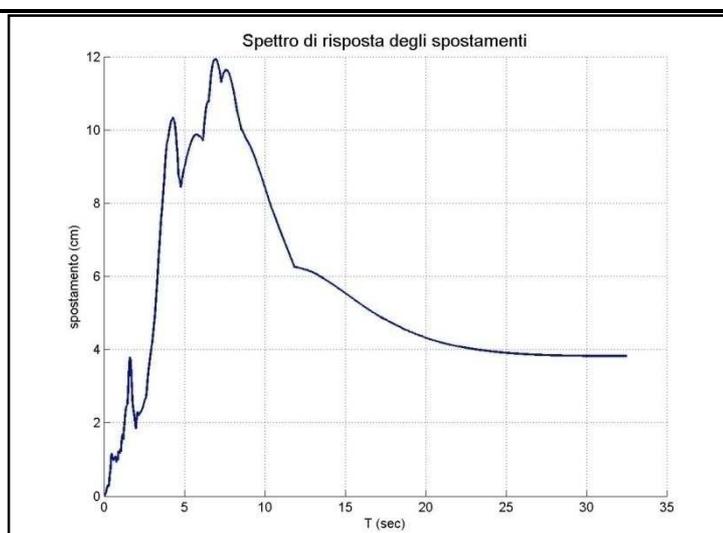


Fig. 2.3 Spettro degli spostamenti per il sisma avvenuto a Denali, Alaska.

Le strutture prese in esame sono una struttura a pilastri torsiorigida, una struttura torsioflessibile e una struttura a ridotta eccentricità con un valore di Ω_g di transizione tra le due classi.

Sono riconducibili al terzo gruppo tutte le strutture geometricamente non eccentriche alle quali la normativa impone un'eccentricità accidentale del 5%. In realtà il valore del 5% è riferito alla "dimensione dell'edificio misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione dell'azione sismica", mentre qui si fa riferimento all'eccentricità relativa valutata a partire dalla diagonale equivalente; negli edifici con $\Phi = 1$, un'eccentricità relativa valutata a partire dalla dimensione del lato pari al 5% equivale ad un'eccentricità del 3.5% se

valutata a partire dalla sua diagonale. Per non appesantire l'esposizione, si parlerà di eccentricità imposta dalla normativa indicando un valore generale pari al 5% anche se a rigore questo sarebbe funzione del fattore di forma.

Le strutture a pilastri occupano una zona ben distinta all'interno delle strutture torsiorigide (), mentre quelle a ridotta eccentricità non hanno un limite per i valori di (), come mostrato in Fig. 2.4.

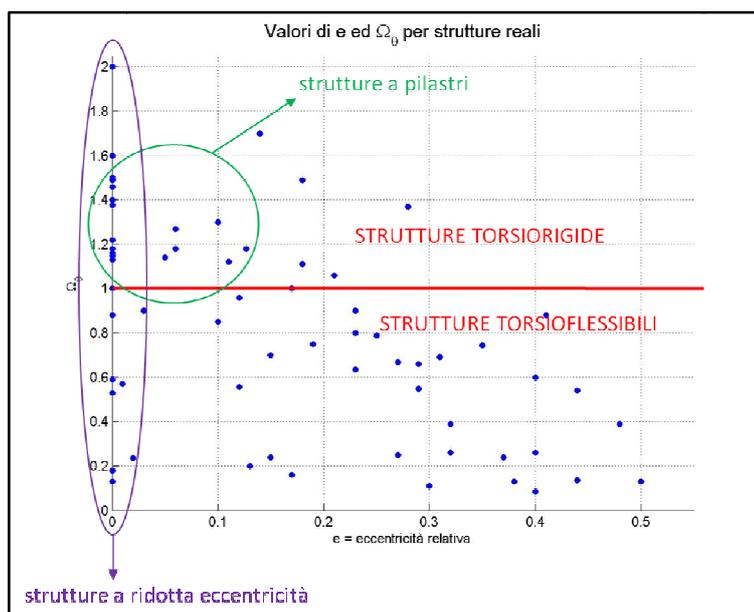


Fig. 2.4 Individuazione delle strutture a pilastri e delle strutture a ridotta eccentricità.

Dall'analisi di ciascuna struttura, soggetta ad input sismico, è stato confrontato lo spostamento longitudinale massimo valutato nei due modi proposti, in modo da verificare la validità della nuova formulazione proposta per il rapporto .

2.4.2.1 Struttura torsiorigida a pilastri

La struttura analizzata in questo esempio presenta un'eccentricità , un rapporto tra i raggi d'inerzia ed un periodo longitudinale .

Dall'analisi modale si osserva che il periodo fondamentale è molto prossimo a quello longitudinale e la risposta totale è descritta quasi unicamente dal primo modo di vibrare ():

$$\begin{array}{ll}
T_1 = 0.4176 & M_1 = 0.94619 \\
T_2 = 0.4000 & M_2 = 0.00000 \\
T_3 = 0.2554 & M_3 = 0.05381
\end{array}$$

Analizzando i *modal contribution factors* si ha che M_2 è nullo e M_3 è molto prossimo allo zero, per cui la SRSS sugli spostamenti può essere approssimata con il termine relativo al primo modo; inoltre $M_1 \cong 1$, per cui lo spostamento longitudinale massimo è molto vicino a quello ottenuto dallo spettro in corrispondenza di T_1 :

$$|u_{y,CM}|_{max} \cong Sd(T_1) \quad (2.5)$$

2.4.2.2 Struttura torsioflessibile

La struttura analizzata in questo esempio presenta un'eccentricità $e = 0.24$, un rapporto $\Omega_g = 0.15$ ed un periodo longitudinale $T_L = 0.4$.

Di queste strutture è stato osservato che il periodo fondamentale subisce uno shift temporale e che il primo e il terzo modo partecipano alla risposta longitudinale complessiva, risultati confermati dall'analisi modale di questa struttura:

$$\begin{array}{ll}
T_1 = 3.4774 & M_1 = 0.4152 \\
T_2 = 0.4000 & M_2 = 0.0000 \\
T_3 = 0.3067 & M_3 = 0.5848
\end{array}$$

Lo spostamento longitudinale viene valutato come combinazione del primo e del terzo modo, dato che il secondo presenta $M_2 = 0$:

$$|u_{y,CM}|_{max} = \sqrt{(Sd(T_1) \cdot MCF_1)^2 + (Sd(T_3) \cdot MCF_3)^2}$$

2.4.2.3 Struttura a ridotta eccentricità

La struttura a ridotta eccentricità analizzata in questo esempio presenta un'eccentricità $e = 0.06$, un rapporto $\Omega_g = 0.9$ (valore limite tra le strutture torsiorigide e quelle torsioflessibili) ed un periodo longitudinale $T_L = 0.4$. Dall'analisi modale si ha che il periodo fondamentale è molto vicino a quello longitudinale, pur presentando una divergenza maggiore rispetto alla struttura a pilastri; il modo che conta di più non è più il primo ma il terzo. Questa struttura presenta quindi nel complesso delle caratteristiche intermedie tra le due classi di

strutture, in particolare:

$$\begin{array}{ll} T_1 = 0.4760 & M_1 = 0.3335 \\ T_2 = 0.4000 & M_2 = 0.0000 \\ T_3 = 0.3735 & M_3 = 0.6665 \end{array}$$

La risposta longitudinale complessiva è data da una combinazione del primo e del terzo modo, dato che il secondo contributo ha il *modal contribution factor* nullo, per cui è espressa dalla (2.6). In generale queste strutture possono appartenere sia alla categoria delle torsiorigide che delle torsioflessibili; risulta pertanto valida sia la formulazione del rapporto δ generale (2.6), che quella semplificata adottata per i pilastri (2.5).

2.4.3 Confronto degli spostamenti longitudinali massimi

In questa sezione viene presentato il confronto diretto sugli spostamenti longitudinali ottenuti tramite integrazione diretta delle equazioni del moto e attraverso combinazione degli spostamenti dei sistemi *sdof* equivalenti attraverso SRSS, per le tre strutture già descritte.

2.4.3.1 Struttura torsiorigida a pilastri

Attraverso i dati della struttura a pilastri si vuole verificare la relazione semplificata (2.5). L'integrazione delle equazioni del moto con metodo di Newmark e regola del trapezio per il sistema a tre gradi di libertà fornisce i seguenti spostamenti in metri nelle tre direzioni:

$$|u_1(t)|_{max} = 0.0000000$$

$$|u_2(t)|_{max} = 0.0068232$$

$$|u_3(t)|_{max} = 0.0004010$$

Lo spostamento in direzione x è nullo, quello in direzione longitudinale è il maggiore dei tre, mentre la rotazione ha un apporto molto contenuto. Gli spostamenti in corrispondenza dei tre periodi di vibrazione ottenuti dallo spettro di risposta del sisma sono i seguenti:

$$Sd(T_1) = 0.0073237$$

$$Sd(T_2) = 0.0067413$$

$$Sd(T_3) = 0.0024851$$

Da un confronto dei risultati, è immediato notare che lo spostamento longitudinale massimo $|u_2(t)|_{max}$ è molto prossimo a quello di un oscillatore semplice valutato in corrispondenza del periodo fondamentale ($Sd(T_1)$), per cui l'approssimazione di cui ci si è avvalsi per questa classe di strutture risulta giustificata:

$$\delta = \frac{|u_2(t)|_{max}}{Sd(T_1)} = \frac{0.0068232}{0.0073237} = 0.9317$$

Anche lo spostamento in corrispondenza del periodo longitudinale è molto prossimo allo spostamento longitudinale massimo, per cui viene confermata la vicinanza tra i primi due periodi di vibrazione, di conseguenza anche dei corrispettivi spostamenti. Per le strutture torsiorigide a pilastri la nuova formulazione del rapporto δ in forma approssimata coincide con la classica espressione:

$$\delta = \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{|u_{y,CM,3_s dof}|_{max}} = \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{|u_{y,s dof,m,TL}|_{max}}$$

2.4.3.2 Struttura torsioflessibile

Lo spostamento longitudinale viene valutato per questa classe di strutture secondo la (2.6) come combinazione del primo e del terzo modo. L'integrazione diretta delle equazioni del moto con metodo di Newmark e regola del trapezio per il sistema a tre gradi di libertà fornisce i seguenti spostamenti in metri nelle tre direzioni:

$$|u_1(t)|_{max} = 0.0000000$$

$$|u_2(t)|_{max} = 0.0282230$$

$$|u_3(t)|_{max} = 0.0083756$$

Lo spostamento in direzione x è nullo, quello in direzione longitudinale è il maggiore dei tre ed è molto più elevato rispetto al caso precedente; il contributo della rotazione è decisamente più grande rispetto al caso di struttura torsiorigida, ma sempre trascurabile rispetto alla traslazione. Leggendo sullo spettro di risposta lo spostamento in corrispondenza dei tre periodi di vibrazione si ottengono i seguenti risultati:

$$u(T_1) = 0.0701960$$

$$u(T_2) = 0.0067413$$

$$u(T_3) = 0.0028244$$

Per questa classe di strutture lo spostamento in corrispondenza del periodo longitudinale non riesce a cogliere il reale comportamento della struttura a causa dell'effetto del *fundamental period shifting* provocato dall'eccentricità. Valutando invece lo spostamento longitudinale mediante la (2.6) si ha:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{|u_2(t)|_{max}}{\sqrt{(Sd(T_1) \cdot MCF_1)^2 + (Sd(T_3) \cdot MCF_3)^2}} \\ &= \frac{0.0282230}{\sqrt{[0.070196 \cdot 0.4152]^2 + [0.0028244 \cdot 0.5848]^2}} = 0.9668 \end{aligned}$$

La nuova espressione dello spostamento longitudinale del centro di massa proposta per cogliere il comportamento delle strutture torsioflessibili risulta quindi verificata.

2.4.3.3 Struttura a ridotta eccentricità

La struttura a ridotta eccentricità con $\Omega_g = 0.9$, come già detto rappresenta un caso intermedio tra i due comportamenti; dato che intervengono nella risposta longitudinale complessiva sia il primo che il terzo modo, la struttura verrà analizzata mediante la (2.6). L'integrazione delle equazioni del moto secondo Newmark e regola del trapezio per il sistema a tre gradi di libertà fornisce i

seguenti spostamenti in metri nelle tre direzioni:

$$|u_1(t)|_{max} = 0.0000000$$

$$|u_2(t)|_{max} = 0.0064036$$

$$|u_3(t)|_{max} = 0.0016395$$

Lo spostamento in direzione x è nullo, quello in direzione longitudinale è il maggiore, come nel caso di struttura torsiorigida, mentre il contributo della rotazione è intermedio tra i due casi già analizzati e comunque trascurabile rispetto alla traslazione longitudinale. Leggendo direttamente sullo spettro di risposta lo spostamento in corrispondenza dei tre periodi di vibrazione si ottengono i seguenti risultati:

$$Sd(T_1) = 0.0115240$$

$$Sd(T_2) = 0.0067413$$

$$Sd(T_3) = 0.0061568$$

Da un'analisi immediata si ha che il primo modo non riesce ad approssimare bene da solo lo spostamento longitudinale, nonostante i primi due periodi di vibrazione siano molto vicini; da questa considerazione e dal fatto che sia il primo che il secondo modo contribuiscono alla risposta definitiva, si ritiene necessario applicare la (2.6) per la valutazione del δ :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{|u_2(t)|_{max}}{\sqrt{(Sd(T_1) \cdot MCF_1)^2 + (Sd(T_3) \cdot MCF_3)^2}} \\ &= \frac{0.0064036}{\sqrt{(0.0115240 \cdot 0.3335)^2 + (0.0061568 \cdot 0.6665)^2}} \\ &= 1.1390 \end{aligned}$$

Si può quindi concludere che le strutture con $\Omega_\vartheta = 0.9$ hanno un comportamento più vicino a quelle torsioflessibili piuttosto che alle altre, per cui viene mantenuta valida la classificazione rigorosa sulla base del parametro Ω_ϑ .

2.5 SIMULAZIONI NUMERICHE

In questa seconda parte del capitolo verranno esposti i risultati ottenuti sulla base di estese simulazioni numeriche, volte a dare una valutazione quantitativa della nuova formulazione del rapporto δ .

2.5.1 Ipotesi alla base dell'indagine numerica

Vengono di seguito riproposte, per completezza, tutte le ipotesi e i parametri fondamentali già esposte nel primo capitolo:

- i tre gradi di libertà del sistema $\{u_x(t) \quad u_y(t) \quad u_\theta(t)\}$ sono misurati a partire da un sistema di riferimento centrato nel baricentro delle masse C_M ;
- l'analisi è condotta in ambito elastico-lineare;
- la rigidità del sistema è uguale nelle due direzioni x e y ;
- la struttura è a singolo piano con dimensioni in pianta $L \times B$;
- gli elementi resistenti (pilastri) sono privi di massa e assialmente indeformabili;
- il solaio è infinitamente rigido nel proprio piano e presenta una distribuzione uniforme delle masse;
- l'eccentricità longitudinale è nulla (sistemi *one-way eccentricity*);
- l'eccitazione sismica è unidirezionale (*uniaxial excitation*).

2.5.2 Parametri strutturali considerati nelle simulazioni

Con l'obiettivo di ottenere risultati il più possibile generali devono essere considerati sistemi strutturali con caratteristiche tra loro diverse. Assume una rilevante importanza, a questo punto, stabilire quali tra le grandezze che descrivono il comportamento della struttura fin qui elencate sono indipendenti o possono essere espresse in funzione di altre. I parametri essenziali per la risoluzione dell'equazione del moto sono:

- e (eccentricità relativa);
- Φ (fattore di forma);

- B (lato lungo y);
- Ω_{ϑ} (rapporto tra il raggio d'inerzia delle rigidità e quello delle masse);
- T_L (periodo di vibrazione longitudinale);
- ζ (rapporto di smorzamento).

2.5.3 Strutture analizzate

L'obiettivo delle analisi numeriche è quello di valutare il rapporto δ , per cui nelle analisi verranno fatti variare i parametri dai quali dipende il rapporto, ovvero:

- e ;
- Ω_{ϑ} ;
- T_L ;

L'eccentricità relativa e è stata fatta variare tra un minimo pari a 0.04 e un massimo pari a 0.48, assumendo complessivamente 13 valori: 0.00, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24, 0.28, 0.32, 0.36, 0.40, 0.44, 0.48.

Il parametro Ω_{ϑ} assume 7 diversi valori in modo da studiare sia le strutture torsiorigide che quelle torsioflessibili: 0.15, 0.3, 0.6, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0.

Il periodo longitudinale T_L varia 0.2 s e 2.5 s, assumendo 7 valori: 0.2s, 0.4s, 0.8s, 1.2s, 1.6s, 2.0s, 2.5s.

Il rapporto di smorzamento ζ è stato considerato costante pari al 5 %, perché già in precedenti trattazioni è stato messo in evidenza come nello studio di questo fenomeno fare variare il rapporto di smorzamento non fornisca risultati sensibilmente diversi. Per questo in seguito non verrà più menzionata la dipendenza da questo parametro, in quanto, sebbene teoricamente presente, risulta poco influente. Per quanto riguarda Φ (fattore di forma) e B (lato lungo y), sono stati posti rispettivamente pari a 1 e 10m; entrambi non influiscono sulla valutazione di δ ma risultano necessari per la completa definizione dell'equazione del moto.

Nel complesso quindi sono state considerate 637 strutture diverse, che nascono da tutte le possibili terne di valori delle tre grandezze e , Ω_{ϑ} , T_L .

2.5.4 Input sismici

Per ognuno dei 637 casi strutturali considerati è stata valutata la soluzione dell'equazione del moto relativamente a 1000 diversi record di accelerazioni sismiche. Ciò si è reso necessario in seguito alla necessità di disporre di un campione abbastanza ampio su cui poter condurre considerazione di tipo statistico. Per questo, considerando la grande variabilità dell'input (e di conseguenza della risposta) si è scelto di formare un campione costituito da 1000 sismi diversi. Gli input sismici sono stati selezionati in base a:

- distanza dall'epicentro (*near field* per una distanza minore di 15 km e *far field* per una distanza maggiore di 15 km);
- accelerazione massima al suolo ($PGA < 0.10g$, $0.10g < PGA < 0.20g$, $0.20g < PGA < 0.30g$, $PGA > 0.30g$);
- categoria del terreno (secondo le quattro classi proposte dal D.M. Min. NTC 14.01.2008).

I dettagli dei record utilizzati sono riportati in modo esteso in appendice.

In definitiva sono state condotte 637000 simulazioni numeriche ottenute associando ciascuno dei precedenti input sismici ad ogni struttura.

2.6 VALUTAZIONE DEL RAPPORTO δ

Per ogni valore di Ω_{θ} e per ogni periodo di vibrazione longitudinale T_L si sono realizzati i grafici del rapporto δ in funzione dell'eccentricità relativa e .

I risultati vengono proposti attraverso curve di regressione e curve di livello; le curve di livello vengono proposte separatamente per le due classi di strutture analizzate (torsiorigide e torsioflessibili) e per il caso particolare delle strutture a ridotta eccentricità. Questa rappresentazione risulta particolarmente utile poiché permette di avere in modo immediato il valore della grandezza d'interesse, a partire dalle tre grandezze che caratterizzano il sistema.

La valutazione del rapporto δ è stata effettuata tramite la media matematica dei risultati ottenuta sui 1000 input sismici a cui ogni struttura è stata sottoposta:

$$\delta = \mu_\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (2.6)$$

Dove δ_i rappresenta il parametro calcolato per il sisma i -esimo e n è il numero dei sismi considerati.

2.6.1 Curve di regressione generali

Al valor medio di δ valutato sui sismi è stata poi aggiunta la curva di secondo grado che meglio approssima nel senso dei minimi quadrati (*least squares fitting*) l'andamento delle medie. Ciò ha consentito di disporre, per ogni coppia (Ω_g, T_L) , di un'equazione predittiva del valore assunto da μ_δ (anche se in realtà potrebbe essere indicato lo stesso δ visto che la regressione condotta sui singoli valori e quella sulle medie coincidono) al variare dell'eccentricità relativa, del tipo:

$$\mu_\delta \text{ stimato} \rightarrow \widehat{\mu}_\delta = ae^2 + be + c \quad (2.7)$$

con a, b, c parametri associati alla regressione.

Definiti i valori di μ_δ , sono state condotte due curve di regressione, una lineare a cui è stato poi associato l'errore standard $s_{\delta|e}$, anch'essa condotta in modo tale da rendere minima la somma dei quadrati delle distanze dei punti dalle curve, e quella quadratica più precisa.

Di seguito si riportano i grafici relativi a tutte le strutture analizzate al variare dell'eccentricità relativa e ; si omette il caso di $T_L = 2.5s$, data la forte analogia con il caso di $T_L = 2s$.

Dai grafici riportati in Figg. 2.5-2.11 si può osservare che:

- il rapporto δ si discosta dall'unità all'aumentare dell'eccentricità relativa;
- la pendenza delle rette che interpolano i risultati diminuisce all'aumentare dell'eccentricità ed è più marcata nel caso di $\Omega_g < 1$;
- la formula proposta per il δ non coglie bene l'andamento dello spostamento longitudinale massimo del sistema a tre gradi di libertà ($\delta < 0.5$) nel caso di strutture estremamente torsioflessibili ($\Omega_g = 0.15$) ed eccentricità molto elevate ($e = 0.48$), che però rappresenta un

caso limite difficilmente realizzabile nella realtà;

- il rapporto δ viene influenzato negativamente dall'aumento del periodo longitudinale nel caso di strutture torsioflessibili;
- il rapporto δ è molto prossimo all'unità nel caso di strutture torsiorigide e in questo caso lo standard error è estremamente ridotto se non nullo;
- nel caso di $\Omega_g = 1.1$ i risultati denotano che si è ancora in una situazione di passaggio, in quanto gli estremi superiore e inferiore, che corrispondono rispettivamente alla situazione di torsiorigide e di torsioflessibili, presentano dei valori meno variabili e prossimi all'unità;
- il valore dell'intercetta della curva sull'asse delle ordinate non è sempre 1, nonostante per eccentricità nulla il rapporto δ assuma sempre questo valore. Questo è dovuto al fatto che si è scelto di utilizzare una curva di secondo grado per approssimare i valori medi, per cui nel caso di punti variamente distribuiti non è in grado di cogliere bene l'andamento; per avere una curva più precisa bisognerebbe aumentare il grado dell'equazione, che comporta però una lettura meno agevole dei risultati analitici.

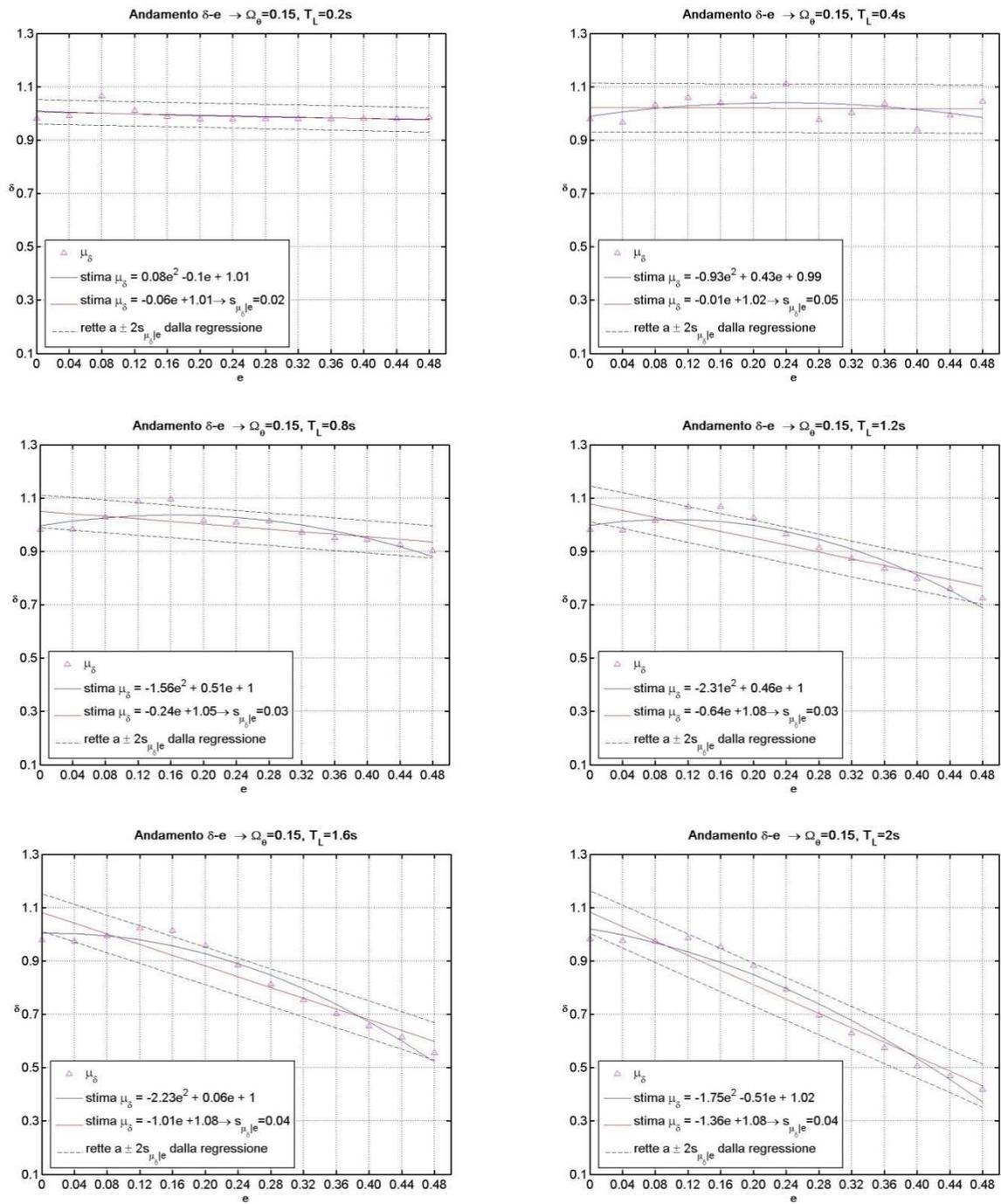


Fig. 2.5 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente δ per un valore di $\Omega_\theta=0.15$ e per diversi valori di T_L .

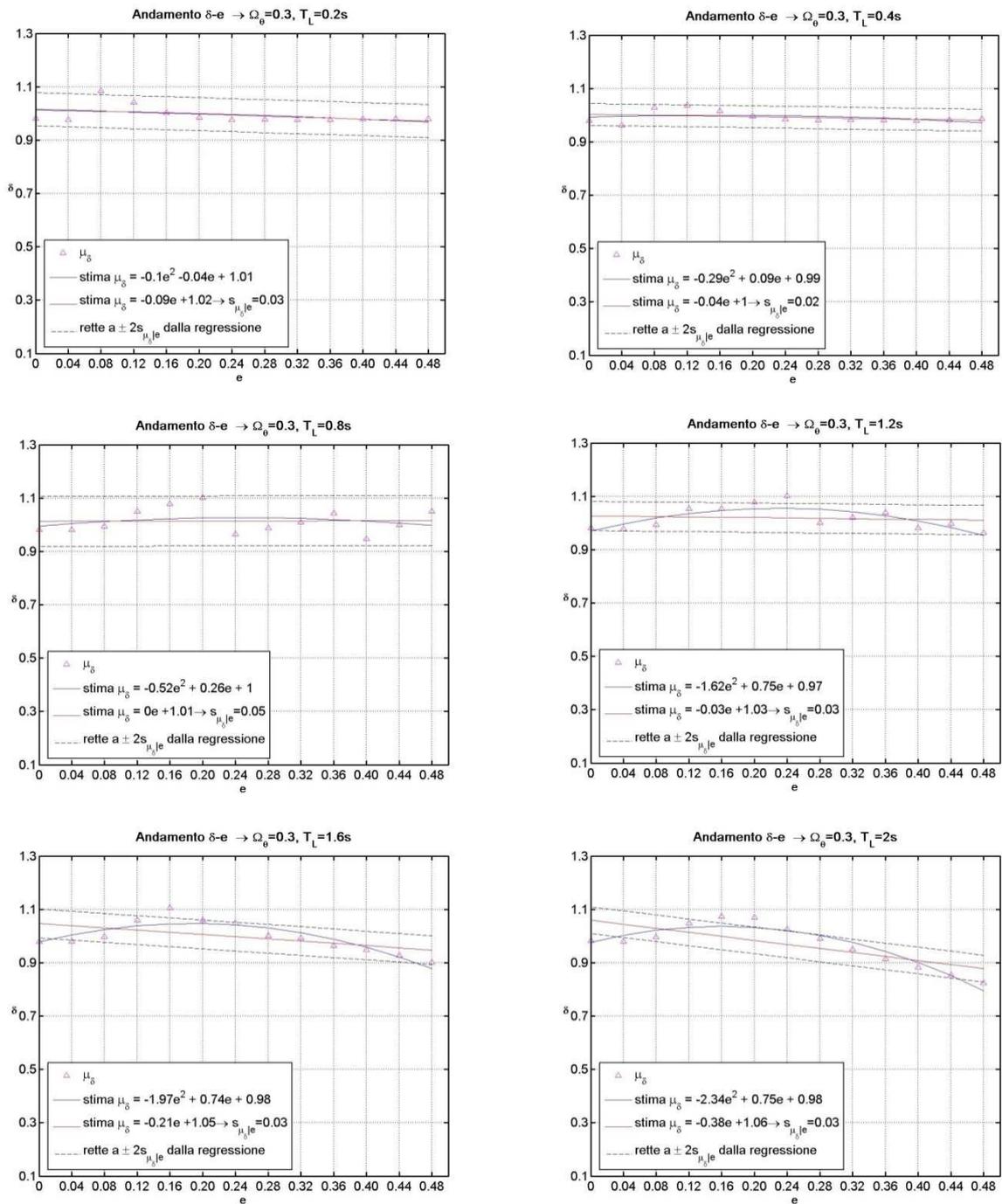


Fig. 2.6 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente δ per un valore di $\Omega_0=0.3e$ per diversi valori di T_L .

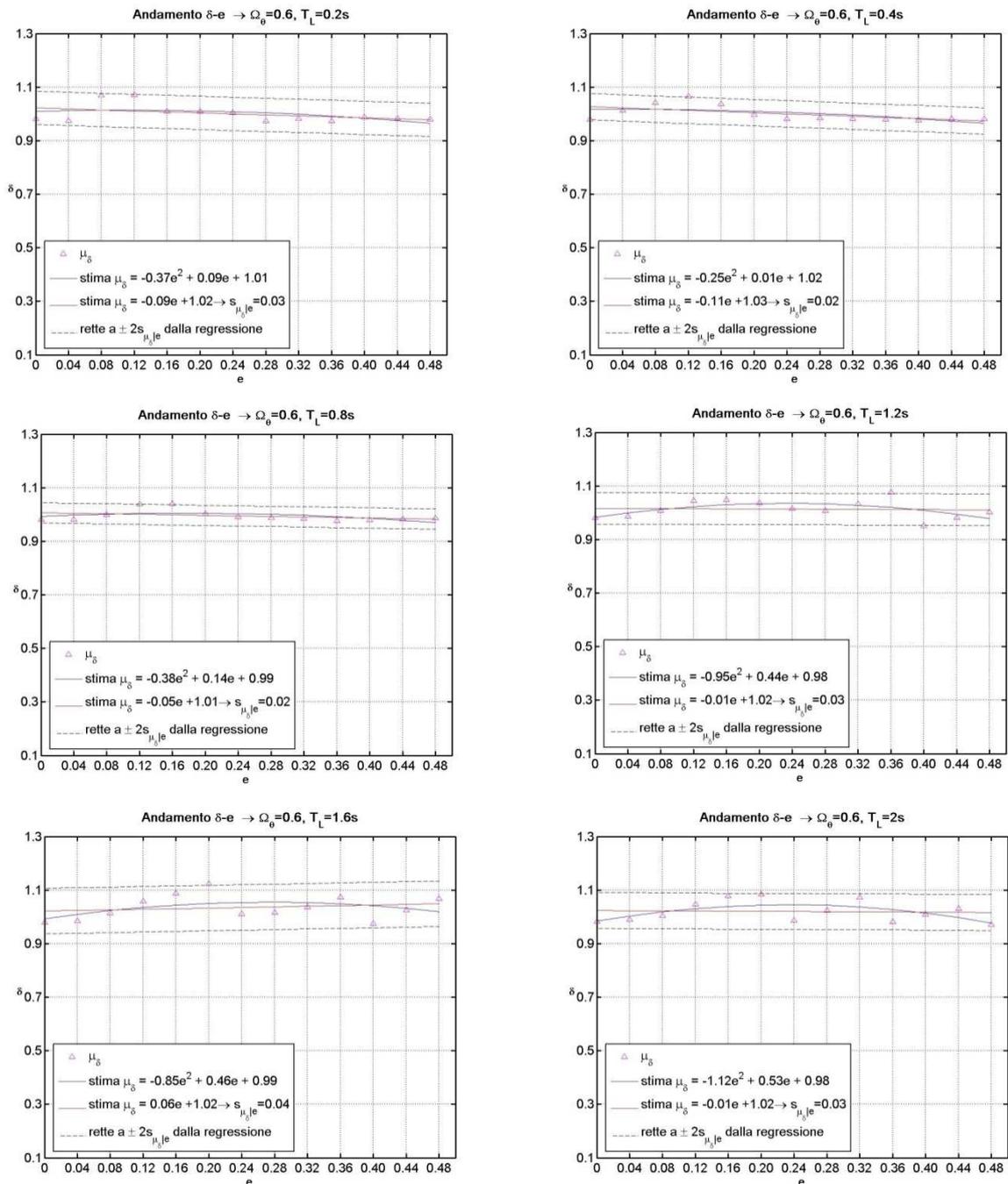


Fig. 2.7 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente δ per un valore di $\Omega_0=0.6e$ per diversi valori di T_L .

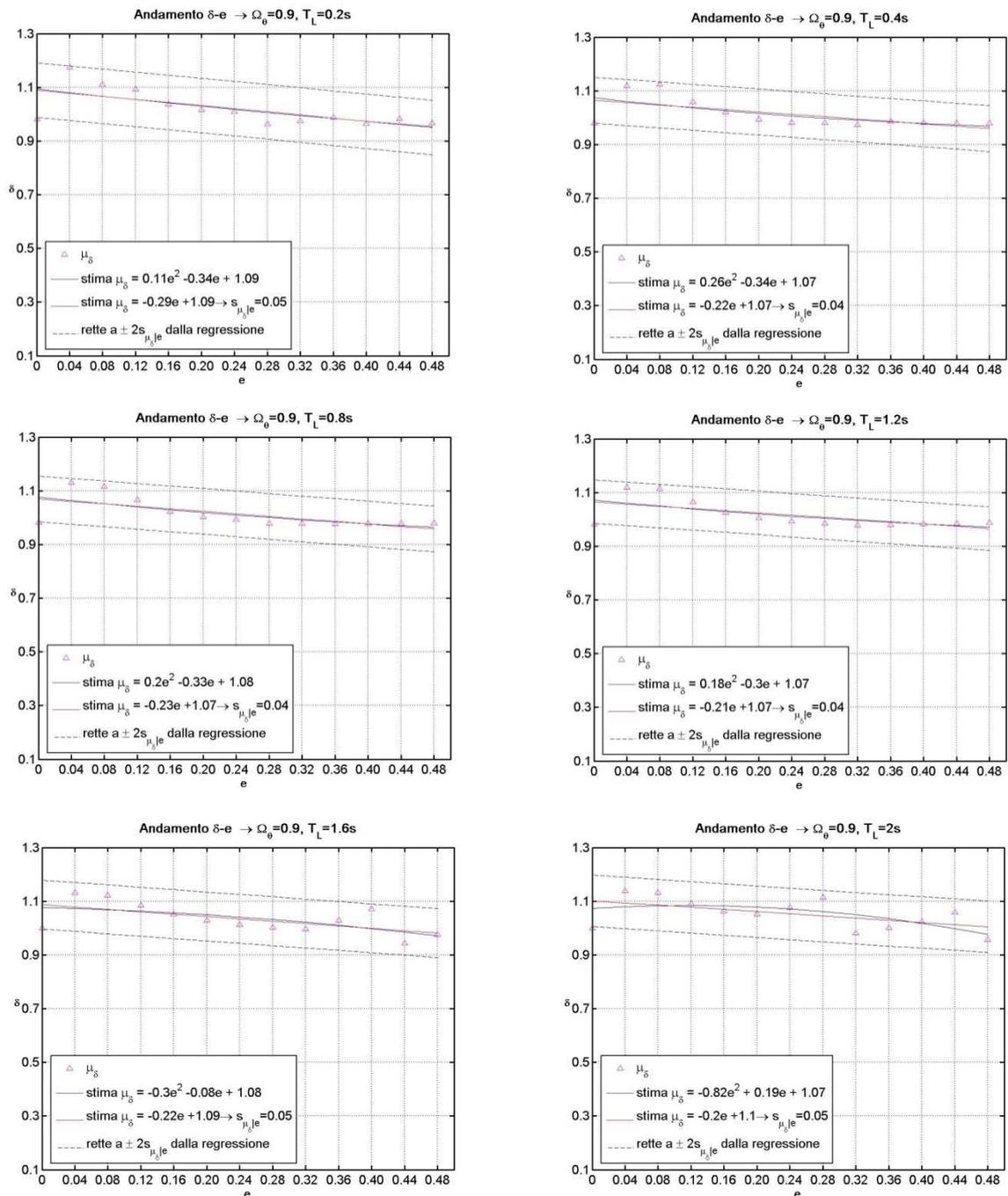


Fig. 2.8 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente δ per un valore di $\Omega_\theta=0.9$ e per diversi valori di T_L .

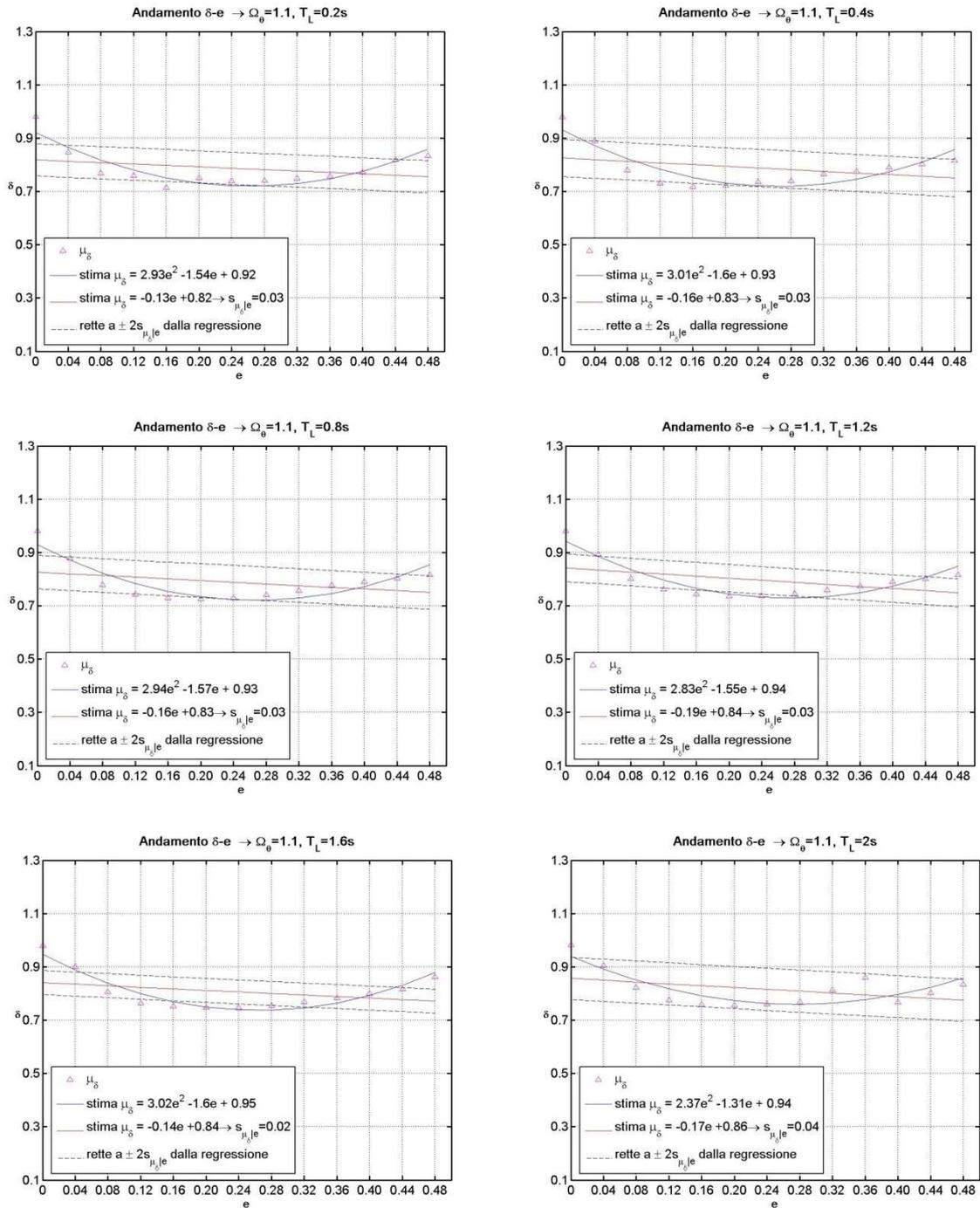


Fig. 2.9 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente δ per un valore di $\Omega_0=1.1$ e per diversi valori di T_L .

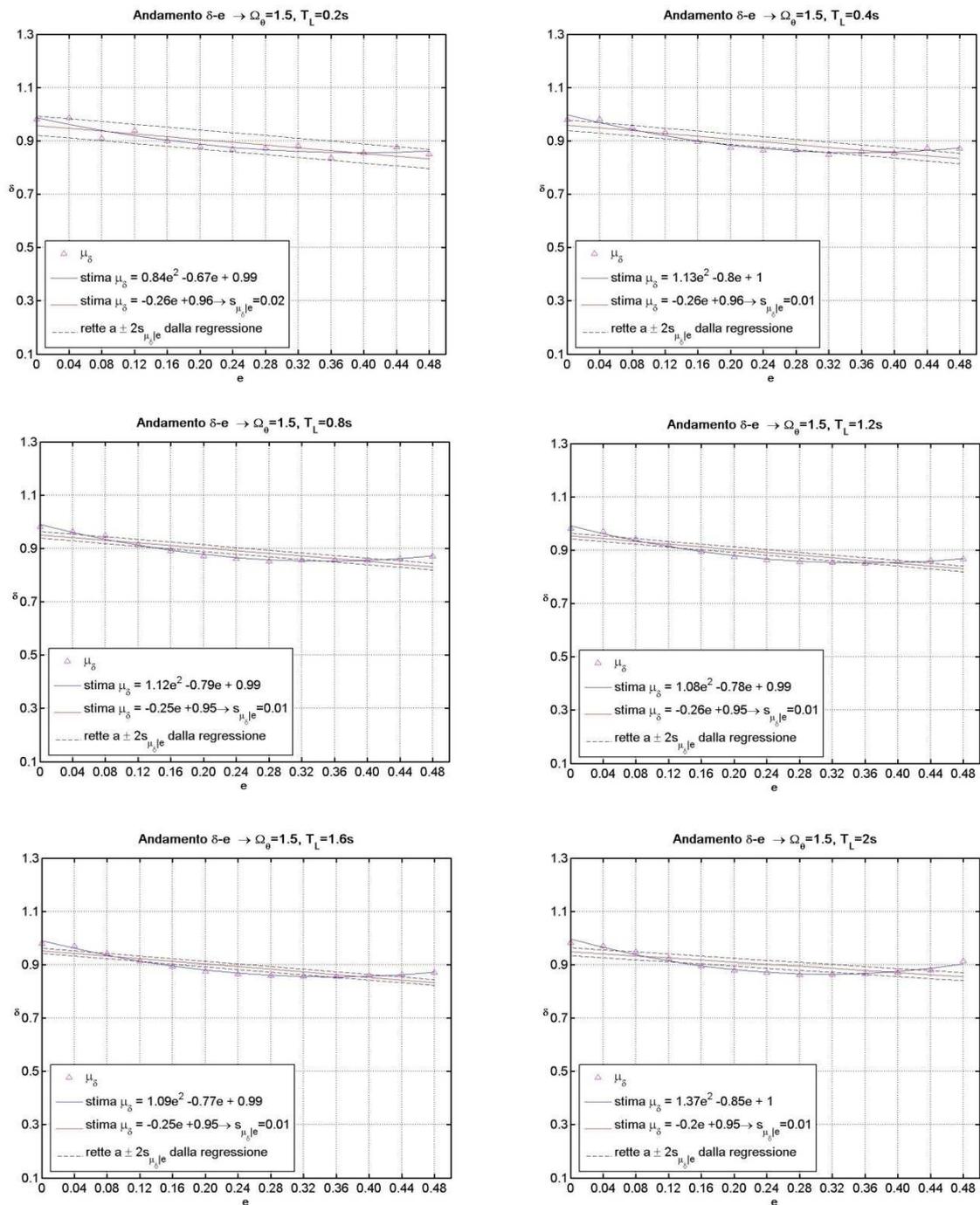


Fig. 2.10 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente δ per un valore di $\Omega_\theta=1.5$ e per diversi valori di T_L .

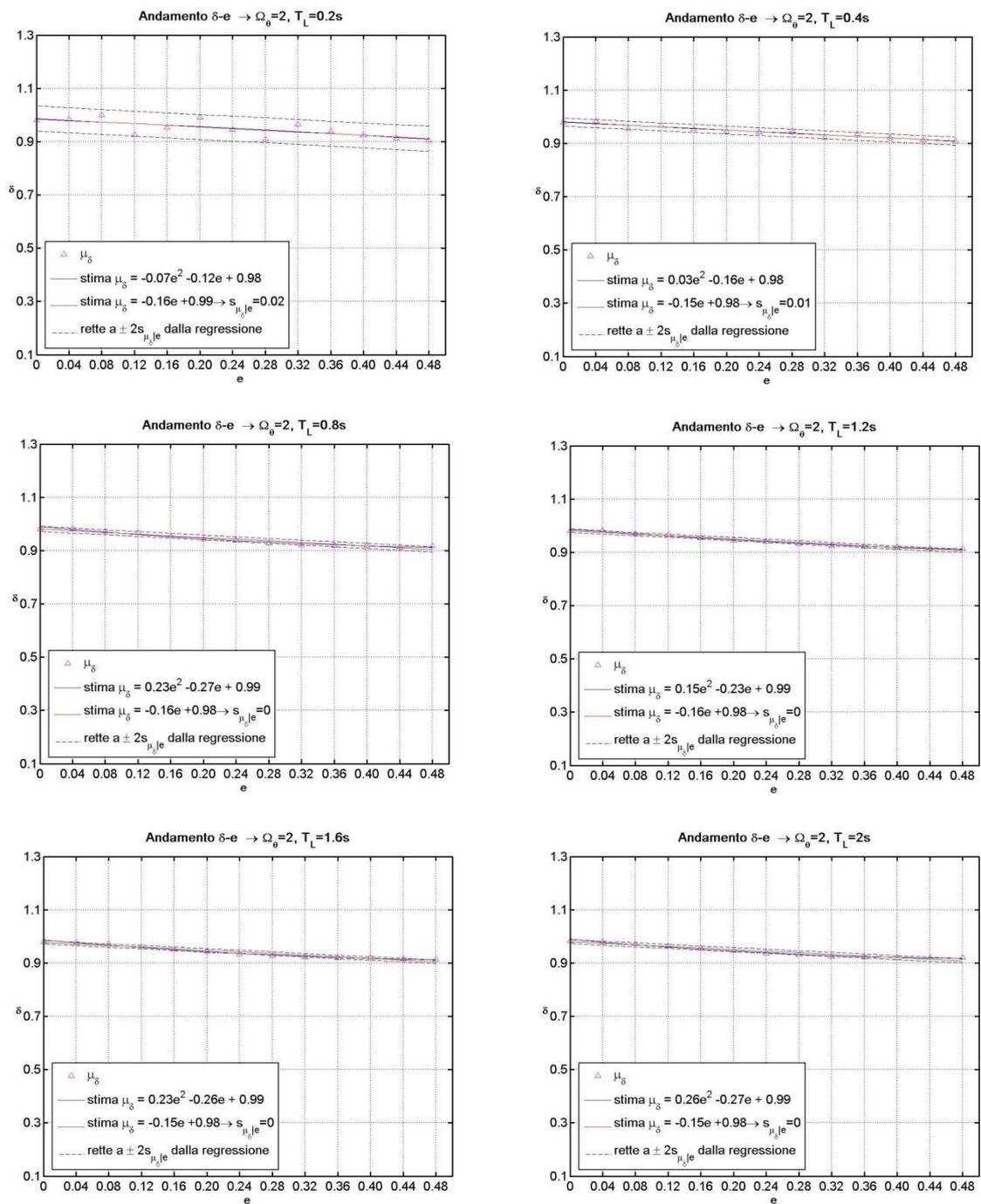


Fig. 2.11 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente δ per un valore di $\Omega_0=2$ e per diversi valori di T_L .

2.6.2 Curve di livello per le strutture torsiorigide

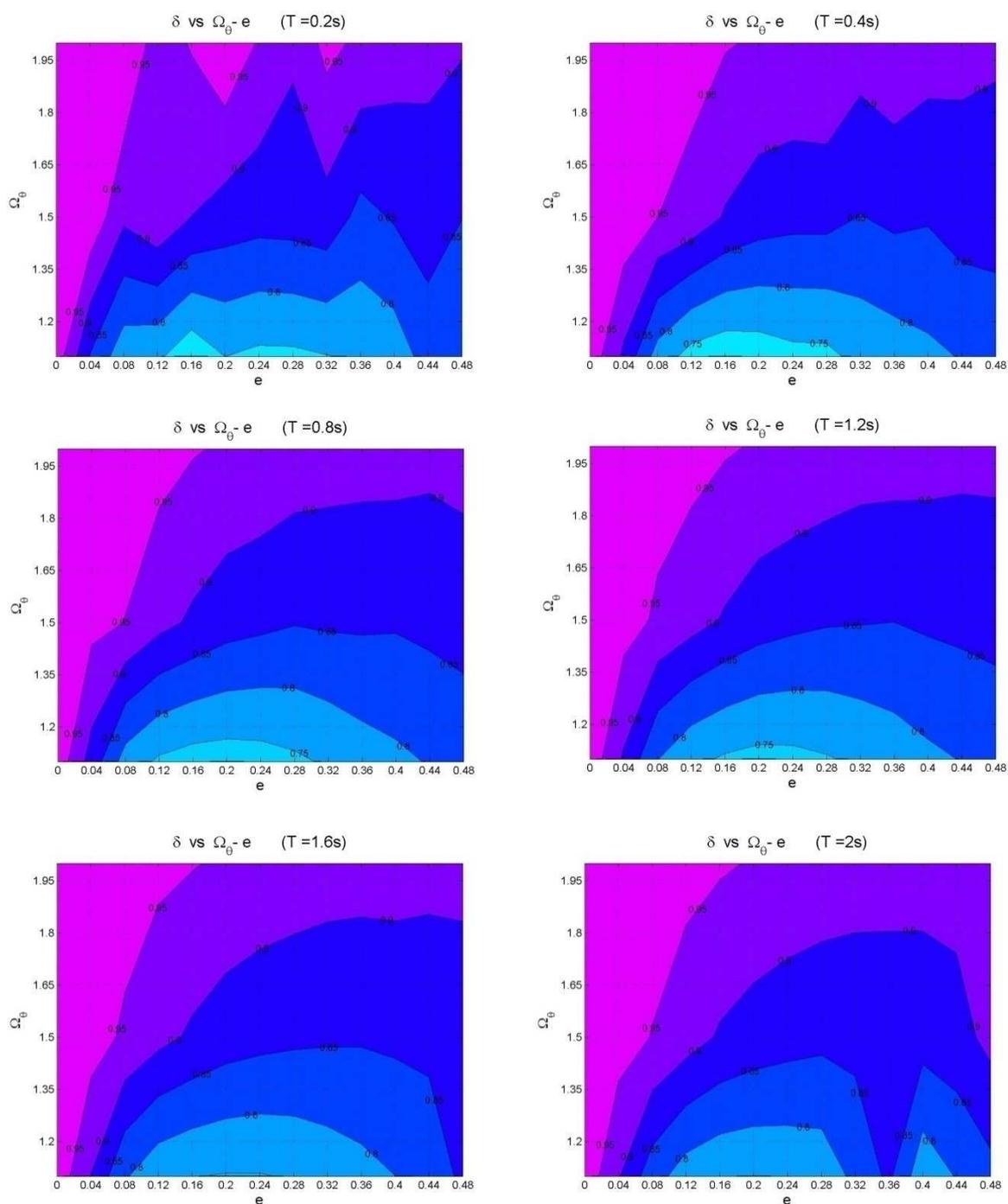


Fig. 2.12 Strutture torsiorigide: variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_θ del coefficiente δ per diversi valori di T_L .

Per le strutture torsiorigide si può concludere che:

- il rapporto δ è sempre compreso tra 0.75 e 0.95;
- il rapporto δ diminuisce al diminuire di Ω_g ;
- il rapporto δ diminuisce all'aumentare dell'eccentricità;
- considerando valori tipici per le strutture a pilastri ($0 < e < 0.2$; $0.9 < \Omega_g < 1.7$) si ha che lo spostamento del centro di massa è molto vicino a quello in corrispondenza del periodo fondamentale, che può anche essere approssimato con il periodo longitudinale. In definitiva quindi lo spostamento del centro di massa del sistema eccentrico è pressoché uguale a quello dell'equivalente sistema non eccentrico, per cui per queste strutture si può applicare l'ipotesi di "ugual spostamento";
- attraverso la nuova formulazione del rapporto δ si raggiungono valori più vicini all'unità rispetto alla precedente espressione che presentava al denominatore lo spostamento del sistema equivalente non eccentrico.

2.6.3 Curve di livello per le strutture torsioflessibili

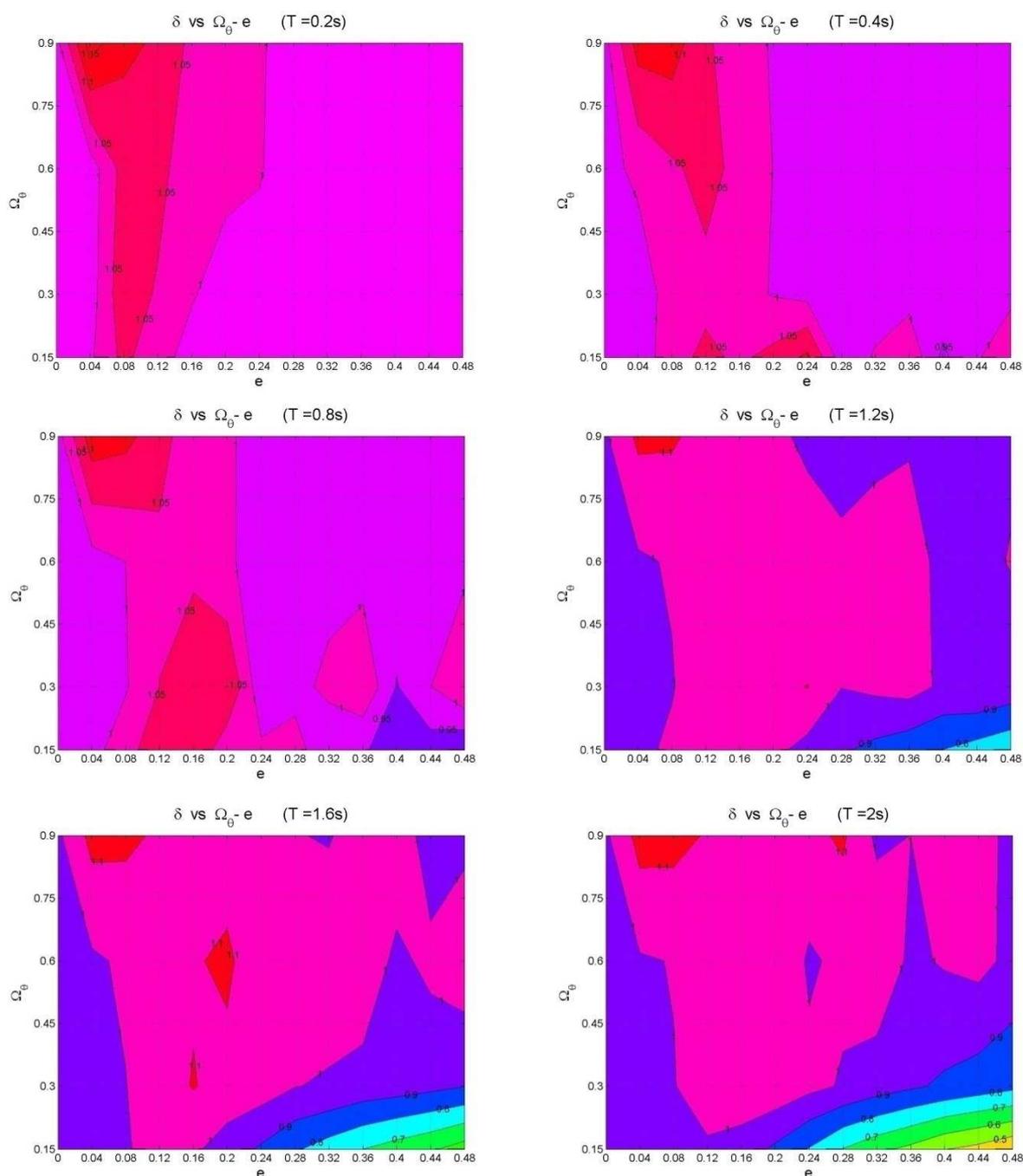


Fig. 2.13 Strutture torsioflessibili: variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_θ del coefficiente δ per diversi valori di T_L .

Per le strutture torsioflessibili si può concludere che:

- il rapporto δ è sempre compreso tra 1.125 e 0.5, in particolare quest'ultimo valore si verifica per eccentricità estremamente elevate e contemporaneamente valori di Ω_g molto bassi, condizioni difficilmente realizzabili nella realtà;
- il rapporto δ diminuisce quando si ha insieme una diminuzione di Ω_g , un aumento di eccentricità e di periodo longitudinale;
- il rapporto δ è molto vicino all'unità, per cui risulta ampiamente verificata la nuova formulazione proposta in questo studio, secondo cui lo spostamento del centro di massa della struttura eccentrica è pari alla combinazione dei tre spostamenti in corrispondenza dei periodi di vibrazione della struttura, ottenuti dallo spettro di risposta degli input, per il corrispondente *modal contribution factor*;
- per queste strutture fin'ora non era stato possibile riscontrare valori del rapporto δ prossimi all'unità, come già discusso nei precedenti capitoli; in questa sezione viene ampiamente verificata la nuova espressione su un esteso set di indagini.

2.6.4 Curve di livello per le strutture a ridotta eccentricità

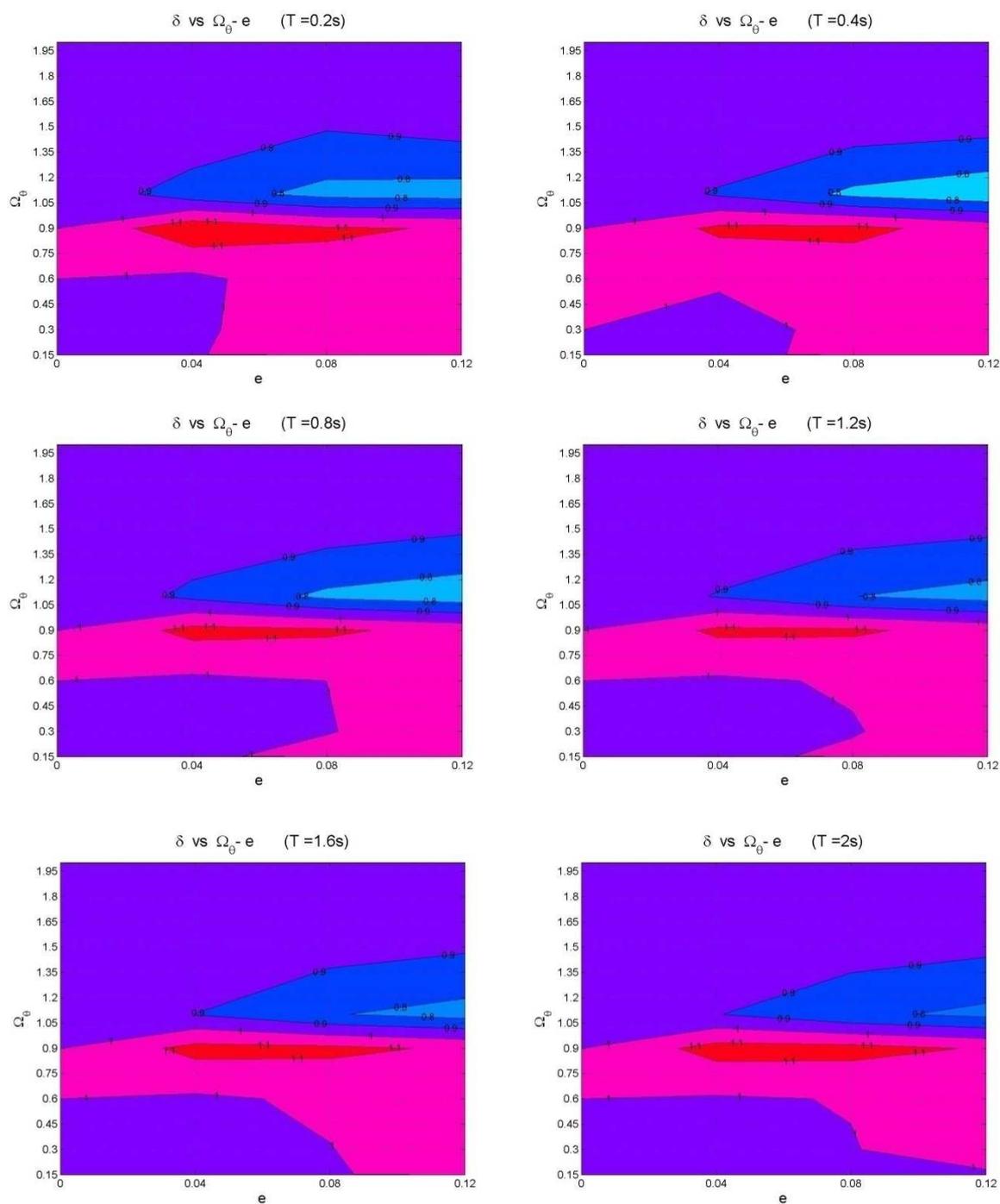


Fig. 2.14 Strutture a ridotta eccentricità: variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_θ del coefficiente δ per diversi valori di T_L .

Per le strutture a ridotta eccentricità si può concludere che:

- il rapporto δ è sempre compreso tra 0.75 e 1;
- il rapporto δ non varia molto con l'eccentricità;
- il rapporto δ assume valori minimi per $1 < \Omega_g < 1.2$ ed eccentricità limite per questa tipologia di strutture ($e = 0.10 \div 0.12$);
- il rapporto δ non subisce sostanziali variazioni all'aumentare del periodo longitudinale;
- per queste strutture è possibile affermare che lo spostamento del centro di massa della struttura eccentrica è pari alla combinazione dei tre spostamenti in corrispondenza dei periodi di vibrazione della struttura, ottenuti dallo spettro di risposta degli input, per il corrispondente *modal contribution factor*;
- anche per questa classe di strutture i risultati sono molto più vicini all'unità con la nuova formulazione rispetto ai precedenti esiti.

CAPITOLO 3

LA RISPOSTA ROTAZIONALE MASSIMA DI STRUTTURE ECCENTRICHE IN PIANTA: MESSA A PUNTO DEL METODO ALPHA

3.1 INTRODUZIONE

Nel primo capitolo si è mostrato come un sistema dinamico asimmetrico, caratterizzato da eccentricità longitudinale nulla ($e_y = 0$), perturbato da uno spostamento iniziale in direzione y , inizi a vibrare, sia per effetto di una componente di oscillazione longitudinale $u_y(t)$, che per effetto di una rotazione $u_\theta(t)$. Poiché i valori massimi delle rotazioni si registrano quasi in prossimità dei massimi degli spostamenti longitudinali e questo risulta valido sia per strutture prive di smorzamento che per quelle dotate di smorzamento, si è sviluppata l'idea che il rapporto tra la rotazione massima e lo spostamento longitudinale massimo in oscillazioni libere sia una caratteristica fondamentale del sistema.

L'accoppiamento delle due risposte in oscillazioni libere ha quindi portato alla definizione di un parametro adimensionale, chiamato *ALPHA*, proporzionale al rapporto tra la massima rotazione ed il massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse [Trombetti e Conte, 2005; Trombetti et al., 2008]:

$$\alpha \stackrel{\text{def}}{=} \rho_m \cdot \frac{|u_{\theta, free vibration}|_{max}}{|u_{y, CM, free vibration}|_{max}} \quad (3.1)$$

Al denominatore della (3.1) compare il massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse in vibrazioni libere.

3.2 IL PARAMETRO *ALPHA* PER OSCILLAZIONI LIBERE NON SMORZATE

Nel caso di oscillazioni libere non smorzate è possibile ottenere un'espressione esplicita del parametro *ALPHA* a partire dalla sua definizione. Facendo riferimento ai massimi degli spostamenti ottenuti nel primo capitolo mediante analisi modale (1.30)-(1.32), è possibile infatti esprimere la (3.1) in funzione di sole proprietà fisiche del sistema, in particolare di e e di Ω_θ :

$$\alpha_u = \frac{4 \cdot e \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{(\Omega_\theta^2 + 12 \cdot e^2 - 1)^2 + 48 \cdot e^2}} \quad (3.2)$$

Strutture caratterizzate da valori di α_u elevati saranno quindi predisposte a sviluppare grandi rotazioni nelle oscillazioni libere conseguenti ad uno spostamento iniziale in direzione y , mentre le strutture caratterizzate da valori di α_u più modesti tenderanno ad avere una risposta dinamica regolata principalmente dalle oscillazioni longitudinali. Riportando in un grafico $e - \Omega_\theta$ l'andamento di α_u , si può notare come a partire dalle stesse perturbazioni iniziali (spostamento in direzione longitudinale), i sistemi caratterizzati dalla non coincidenza tra baricentro delle masse e baricentro delle rigidzze possono sviluppare comportamenti torsionali più o meno marcati a seconda del valore del parametro Ω_θ :

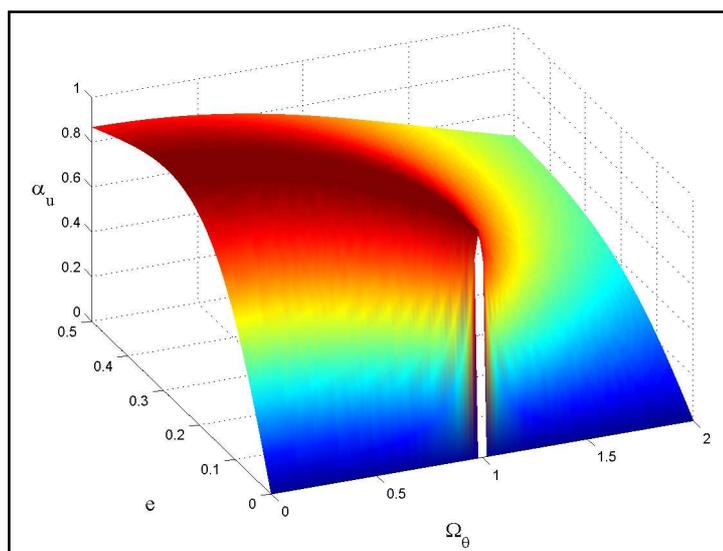


Fig. 3.1 Variazione del parametro α_u in funzione di e, Ω_θ .

Risulta evidente come le strutture torsioflessibili, caratterizzate da un valore di $\Omega_\theta < 1$, anche per piccole eccentricità sviluppano rotazioni elevate, mentre nelle strutture torsiorigide, caratterizzate da valori di $\Omega_\theta > 1$, la rotazione sia molto più contenuta. Dal grafico si può notare inoltre che affinché una generica struttura eccentrica sviluppi un comportamento torsionale molto accentuato è necessario che le due grandezze principali del sistema (e, Ω_θ) assumano contemporaneamente valori in intervalli opportuni.

Infine l'equazione (3.2) mostra che il valore di α_u è compreso tra zero ed uno ($0 < \alpha_u < 1$), per cui la massima rotazione che può subire una qualsiasi struttura asimmetrica non smorzata in oscillazioni libere è:

$$|u_\theta|_{max} = \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{\rho_m} = \frac{|u_{y,CM}|_{max} \sqrt{12}}{D_e} \quad (3.3)$$

3.3 RAPPORTO TRA LA MASSIMA ROTAZIONE ED IL MASSIMO SPOSTAMENTO LONGITUDINALE IN VIBRAZIONI FORZATE

Nel paragrafo precedente è stato definito il parametro *ALPHA*, che esprime il rapporto fra la massima rotazione e il massimo spostamento longitudinale in vibrazioni libere di un sistema dinamico caratterizzato da eccentricità trasversale del baricentro delle rigidezze rispetto a quello delle masse. Risulta ora interessante indagare i valori assunti dal rapporto α_u in vibrazioni forzate, ovvero l'equivalente del parametro *ALPHA* per strutture soggette ad input sismici. A questo proposito viene definita la grandezza *R*:

$$R = \rho_m \cdot \frac{|u_\vartheta|_{max}}{|u_{yCM}|_{max}} \quad (3.4)$$

Sono state condotte, al variare dei parametri strutturali e degli input sismici, diverse simulazioni numeriche finalizzate all'ottenimento di un coefficiente correttivo che consenta di valutare tale rapporto proprio a partire dal parametro strutturale α_u , che rappresenta una proprietà fisica del sistema.

Considerando le espressioni dello spostamento longitudinale del baricentro delle masse e della rotazione in oscillazioni libere (1.30)-(1.32), si può osservare come l'ampiezza della rotazione dipenda dall'inverso di ρ_m , mentre lo spostamento longitudinale non ne è influenzato. Nella formulazione di *R*, il termine ρ_m si semplifica e scompare la dipendenza sia da *B* che da Φ , poiché vale la relazione:

$$\rho_m = B \sqrt{\frac{1 + \Phi^2}{12}} \quad (3.5)$$

Per cui il rapporto *R* è funzione di:

- *e* (eccentricità relativa);
- Ω_ϑ (rapporto tra il raggio d'inerzia delle rigidezze e quello delle masse);
- T_L (periodo di vibrazione longitudinale).

3.4 VALUTAZIONE DEL RAPPORTO R

Per ogni valore di Ω_θ e per ogni periodo di vibrazione longitudinale T_L si sono realizzati i grafici di R in funzione dell'eccentricità relativa e , valutando il valor medio di R relativamente ai 1000 input sismici, come:

$$\mu_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (3.6)$$

dove n è il numero di sismi considerati e R_i il valore del rapporto per il singolo sisma. Al valor medio sui sismi è stata aggiunta la curva di secondo grado che approssima nel senso dei minimi quadrati l'andamento delle medie. Ciò ha consentito di disporre, per ogni coppia dei parametri (Ω_θ, T_L) , di un'equazione predittiva del valore assunto da μ_R (potrebbe essere indicato lo stesso R come già dichiarato) al variare dell'eccentricità relativa:

$$\mu_R \text{ stimato} \rightarrow \widehat{\mu}_R = ae^2 + be + c \quad (3.7)$$

con a, b, c parametri associati alla regressione.

Di seguito si riportano i grafici relativi a tutte le strutture analizzate al variare dell'eccentricità relativa e ; per comodità si omette il caso di $T_L = 2.5s$, data la forte analogia con il caso di $T_L = 2s$.

Dai grafici riportati in Figg. 3.2-3.8 si può osservare che:

- il rapporto R tende a variare sempre più in modo lineare (con pendenza positiva) all'aumentare della rigidezza torsionale della struttura (all'aumentare di T_L), inoltre per $\Omega_\theta \rightarrow 2$ il suo valore diminuisce, confermando la tendenza di tali strutture ad avere una risposta rotazionale contenuta;
- la curva di regressione di secondo grado non riesce ad interpolare bene i risultati per Ω_θ bassi (strutture torsioflessibili) e bassi periodi longitudinali; inoltre in questi casi l'intercetta di tale curva sull'asse delle ordinate non coglie il reale andamento di R , che per eccentricità nulla deve essere pari a zero, come confermato dal valor medio sui sismi.

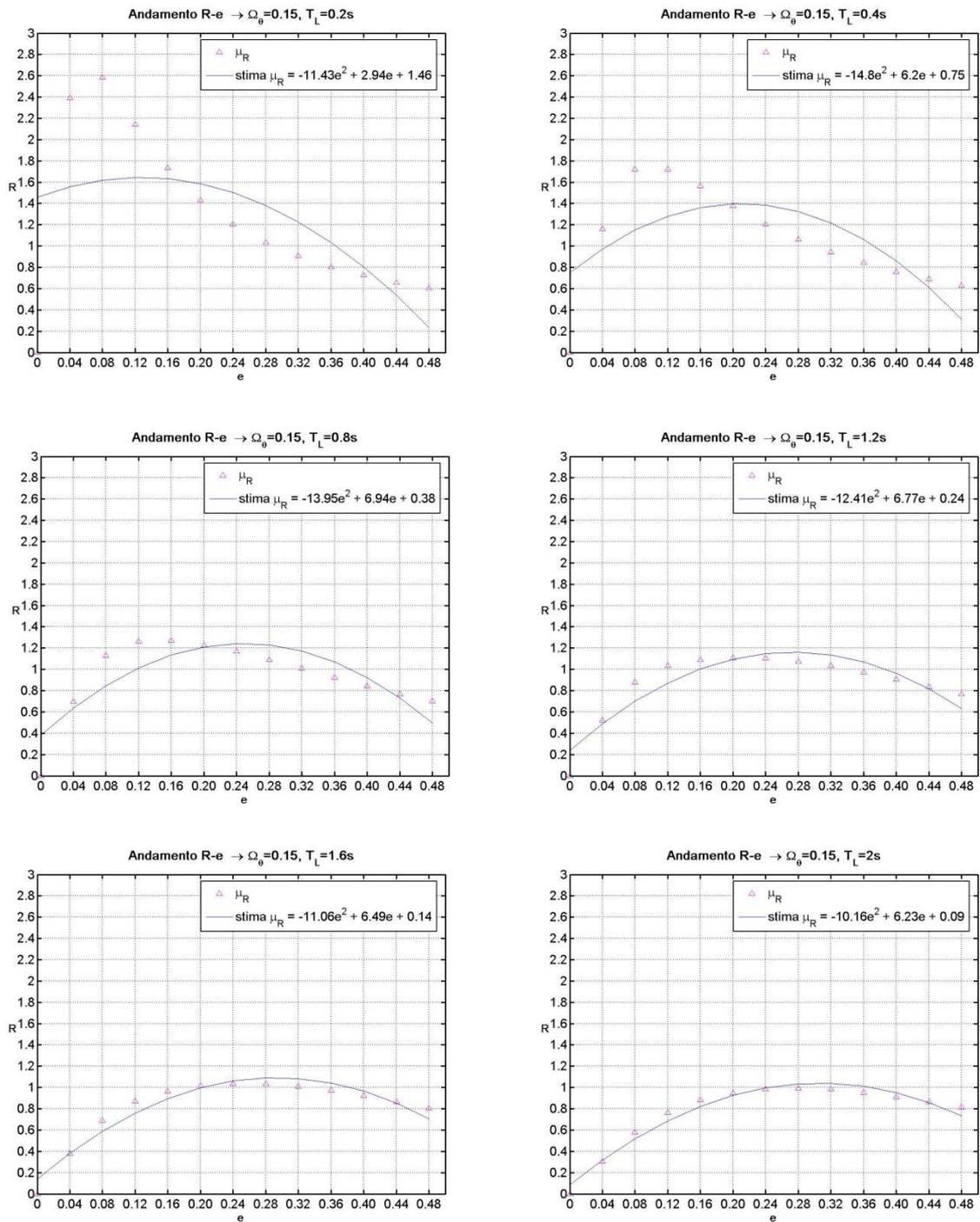


Fig. 3.2 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente R per un valore di $\Omega_\theta=0.15$ e per diversi valori di T_L .

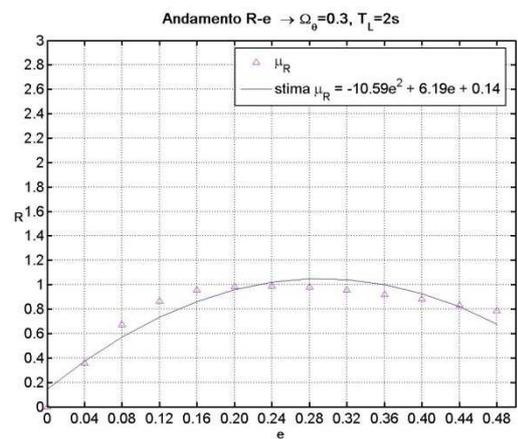
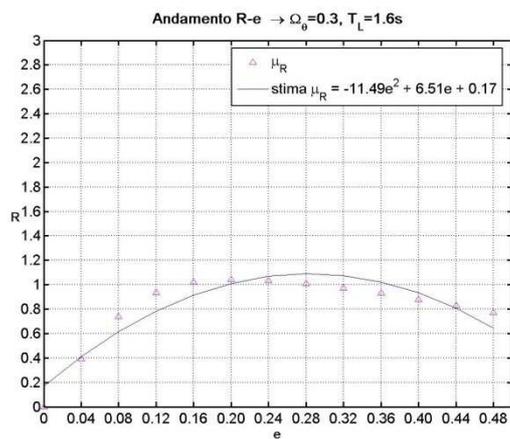
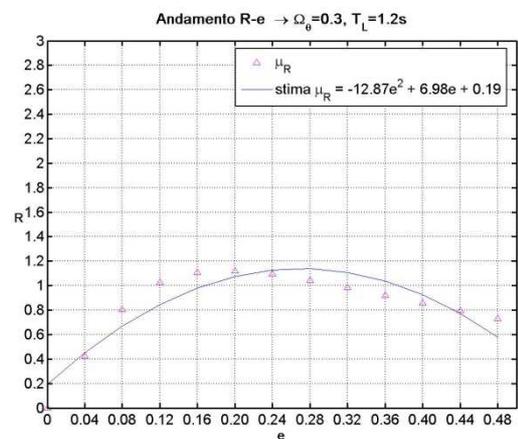
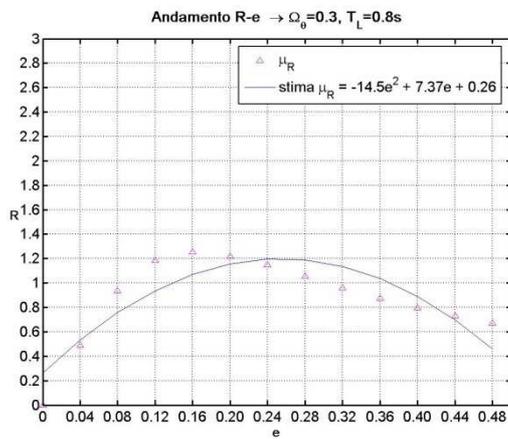
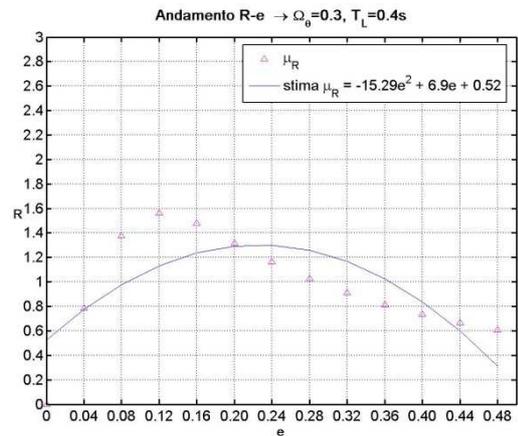
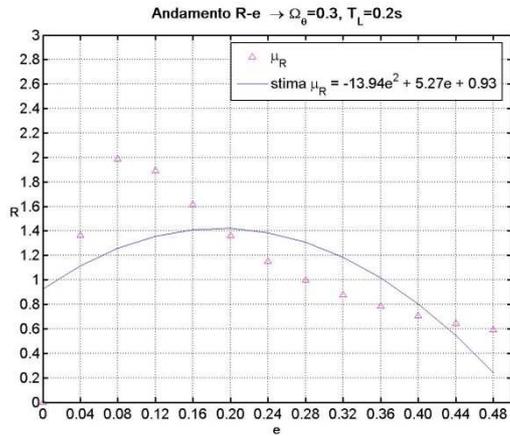


Fig. 3.3 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente R per un valore di $\Omega_\theta=0.3$ e per diversi valori di T_L

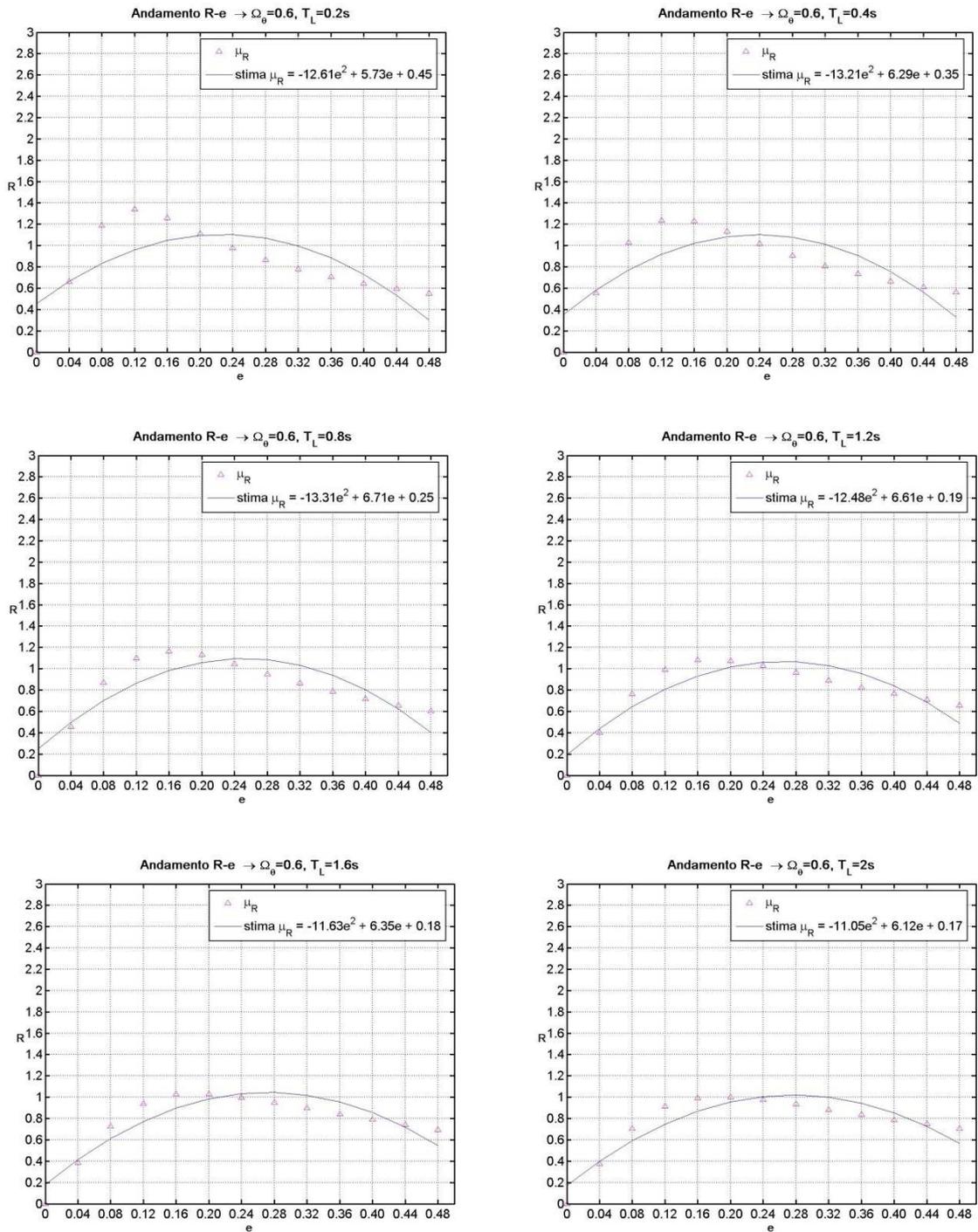


Fig. 3.4 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente R per un valore di $\Omega_0=0.6$ e per diversi valori di T_L .

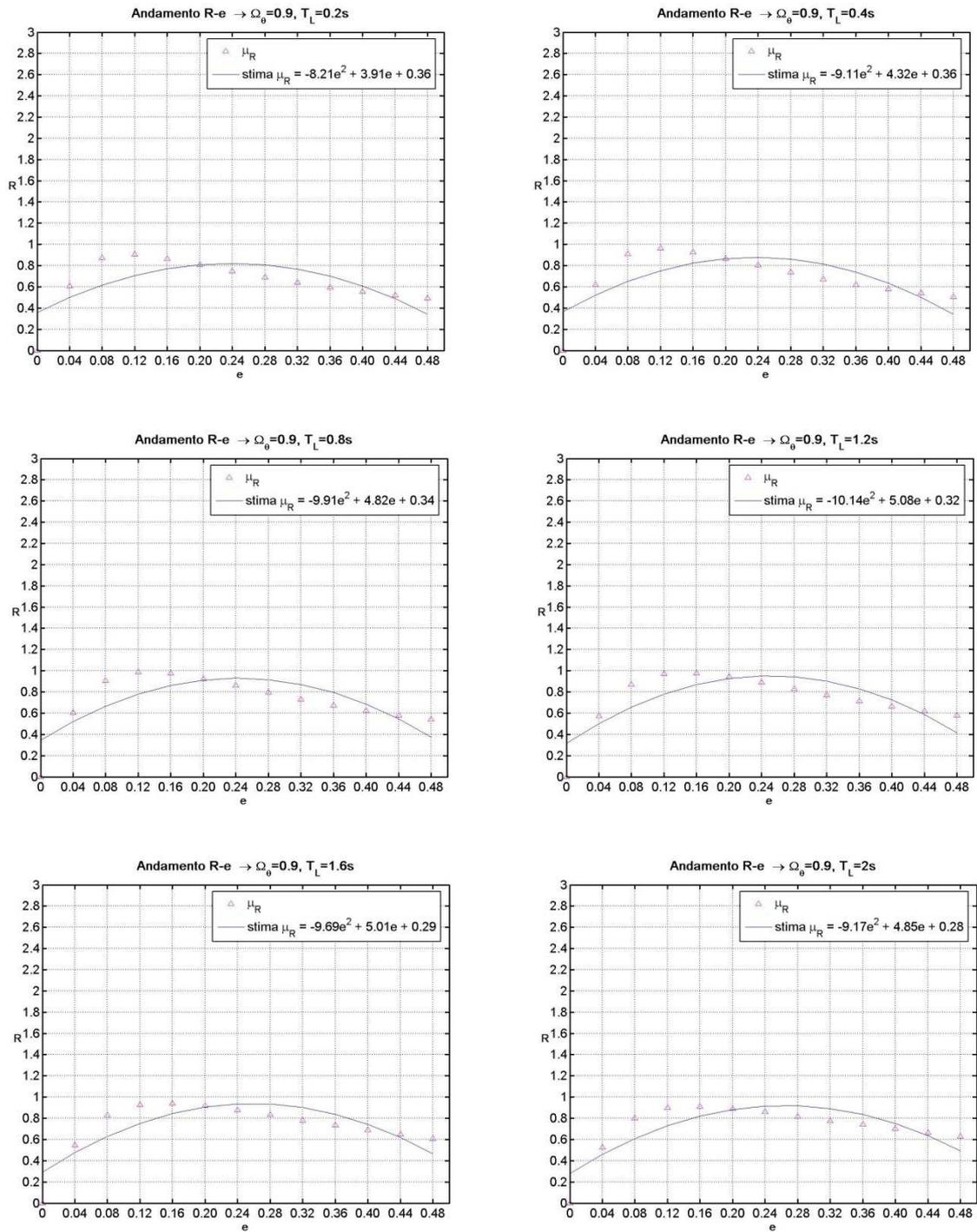


Fig. 3.5 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente R per un valore di $\Omega_0=0.9$ e per diversi valori di T_L .

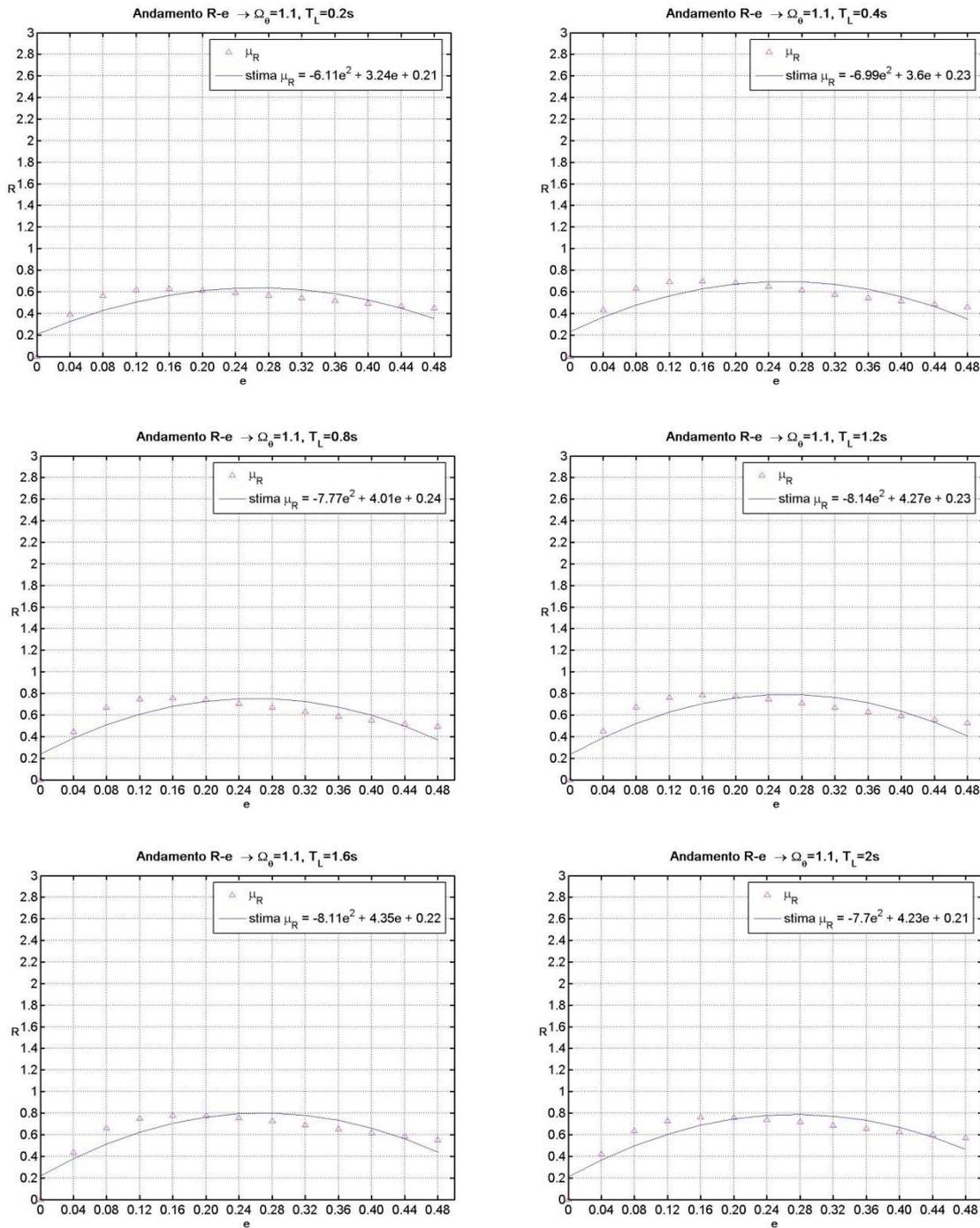


Fig. 3.6 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente R per un valore di $\Omega_0=1.1$ e per diversi valori di T_L .

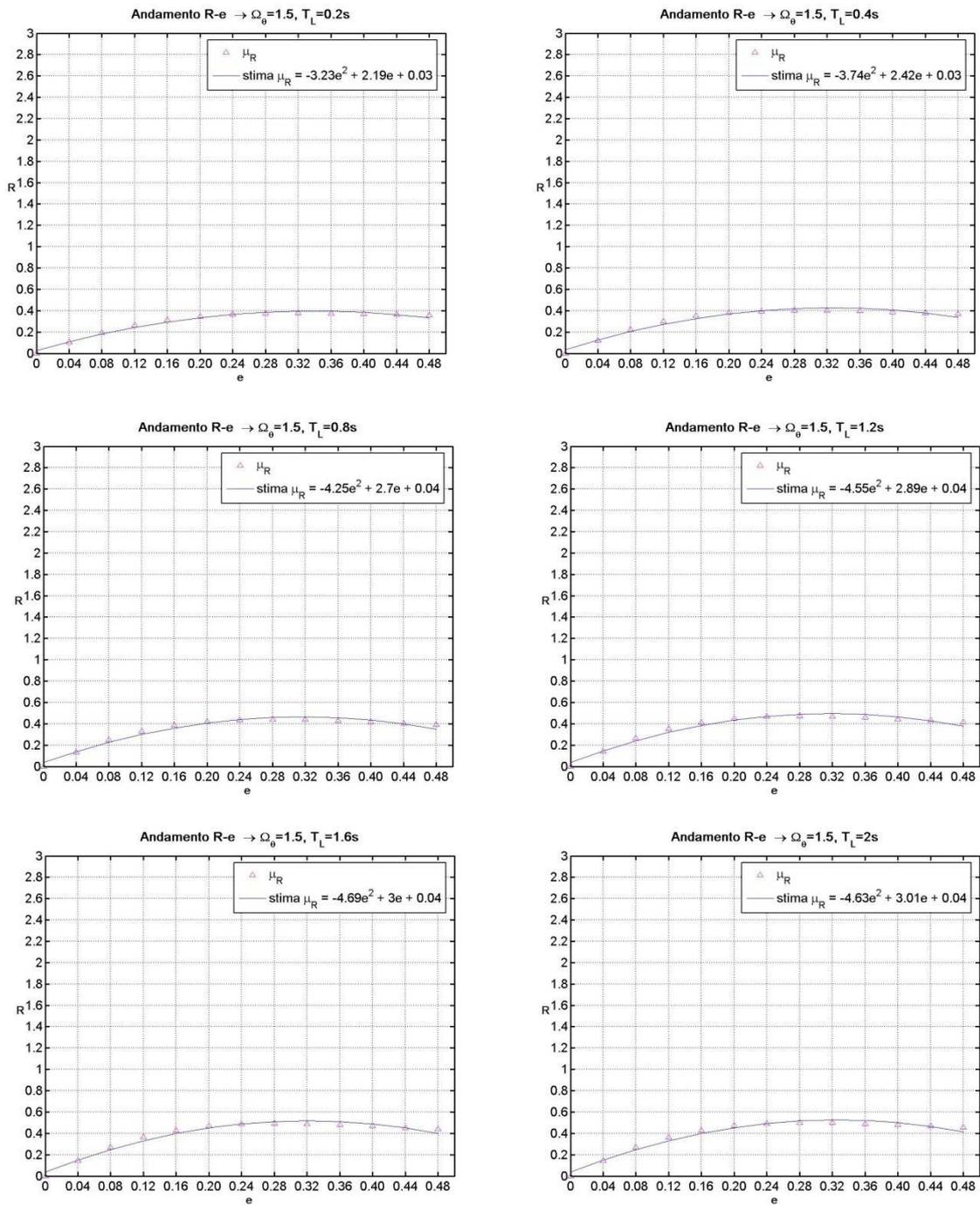


Fig. 3.7 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente R per un valore di $\Omega_0=1.5$ e per diversi valori di T_L .

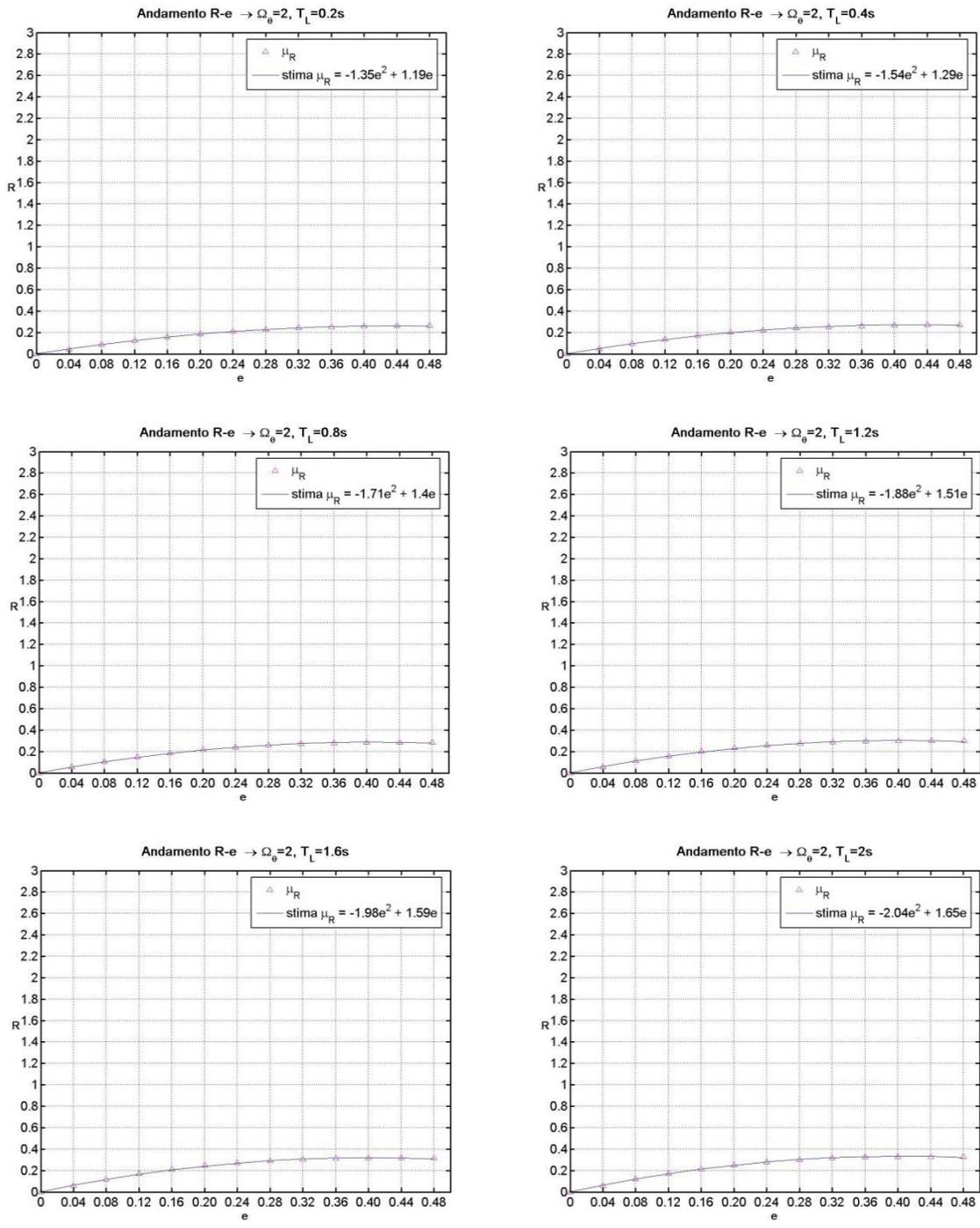


Fig. 3.8 Variazione con l'eccentricità relativa del coefficiente R per un valore di $\Omega_\theta=2$ e per diversi valori di T_L .

Vengono proposti dei grafici sintetici di R al variare di Ω_θ per dare una visione d'insieme di come il rapporto si modifica al variare di questa grandezza.

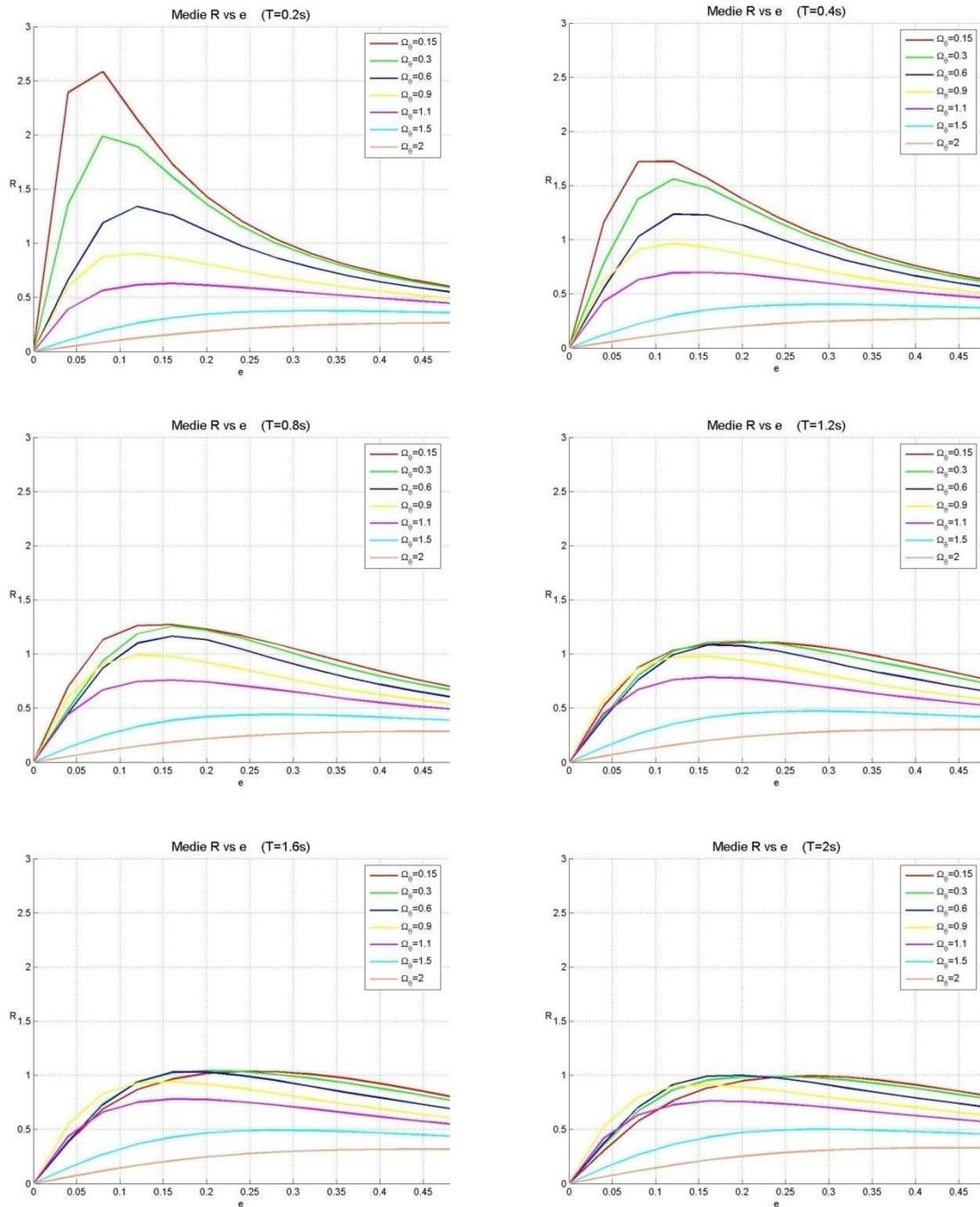


Fig. 3.9 Variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_θ del coefficiente R per diversi valori di T_L .

Dai grafici di Fig. 3.9 si può osservare che:

- il rapporto R è compreso tra 0 e 2.6 e il massimo valore si ha per un basso periodo longitudinale, un ridotto rapporto Ω_g e bassa eccentricità, ovvero per strutture molto rigide e fortemente torsioflessibili;
- per strutture con $\Omega_g < 1.5 R$ presenta un massimo compreso tra il 10% e il 26% di eccentricità indipendentemente dal periodo longitudinale;
- per strutture con $\Omega_g > 1.5 R$ è sempre crescente o al più costante e minore di 0.5 indipendentemente dal periodo longitudinale;
- il rapporto R generalmente decresce all'aumentare di Ω_g e per $\Omega_g > 0.6$ è sempre minore di 1;
- per $\Omega_g > 0.9$ si può considerare trascurabile la dipendenza da T_L ;

3.5 IL METODO ALPHA PER LA STIMA DELLE ROTAZIONI

Al fine di valutare R tramite α_u è stato introdotto un parametro, il parametro A , definito come il rapporto tra R ed α_u :

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \frac{R}{\alpha_u} \quad (3.8)$$

I parametri α_u , R sono funzione di e di Ω_g , per cui anche A dipende dalle stesse grandezze. La determinazione di questo parametro che, moltiplicato per α_u , fornisce una stima del rapporto R , consente di valutare la massima rotazione a cui è soggetta una struttura eccentrica sollecitata da un input sismico, a partire dalle sole caratteristiche del sistema.

$$|u_g|_{max} = A \cdot \frac{\alpha_u}{\rho_m} \cdot |u_{y,CM}|_{max} \quad (3.9)$$

L'espressione (3.9) non fornisce nella forma proposta un semplice strumento predittivo della massima rotazione del sistema eccentrico, a causa del termine relativo allo spostamento longitudinale massimo, che è funzione dell'eccentricità relativa. Per semplificare la valutazione della massima rotazione del sistema è stato introdotto il rapporto δ , in modo da non avere più quantità che dipendono

dal sistema eccentrico:

$$|u_{\vartheta}|_{max} = A \frac{\alpha_u}{\rho_m} \delta \cdot |u_{y_{CM,3_s dof}}|_{max} \quad (3.10)$$

In particolare per le strutture torsiorigide la rotazione massima è stata valutata a partire dall'espressione semplificata dello spostamento longitudinale massimo:

$$|u_{\vartheta}|_{max} = A \frac{\alpha_u}{\rho_m} \delta \cdot Sd(T_1) \quad (3.11)$$

mentre per le strutture torsioflessibili è stata utilizzata l'espressione generale:

$$\begin{aligned} & |u_{\vartheta}|_{max} \\ & = A \frac{\alpha_u}{\rho_m} \delta \sqrt{(Sd(T_1) \cdot MCF_1)^2 + (Sd(T_2) \cdot MCF_2)^2 + (Sd(T_3) \cdot MCF_3)^2} \quad (3) \end{aligned}$$

È stato inoltre verificato che nel caso di eccentricità solo trasversale ed eccitazione sismica agente nella sola direzione x , il secondo modo di vibrare è caratterizzato dal *modal contribution factor* corrispondente nullo, per cui sotto queste ipotesi la (3.12) si semplifica:

$$|u_{\vartheta}|_{max} = A \frac{\alpha_u}{\rho_m} \delta \sqrt{(Sd(T_1) \cdot MCF_1)^2 + (Sd(T_3) \cdot MCF_3)^2} \quad (3.13)$$

Di seguito sono state condotte delle verifiche numeriche sulla capacità predittiva del metodo *ALPHA* per la stima della massima rotazione dei sistemi eccentrici soggetti ad input sismici. Sono stati rappresentati nello stesso grafico l'andamento della rotazione massima del sistema valutata mediante integrazione diretta dell'equazione del moto e quello della rotazione ottenuta attraverso la formulazione del *METODO ALPHA* (3.11), (3.13), al variare delle grandezze che descrivono il sistema.

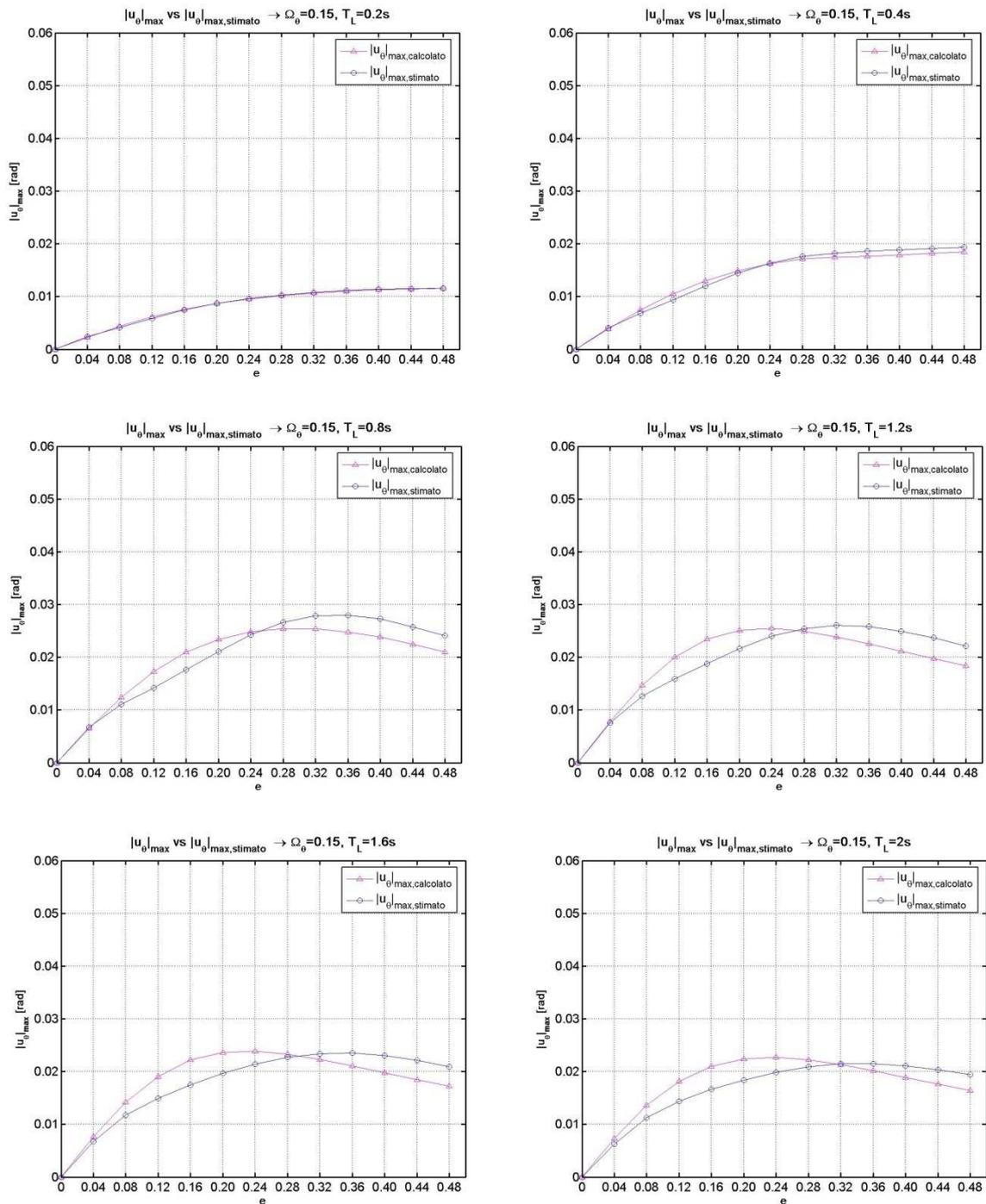


Fig. 3.10 Andamento con l'eccentricità relativa della massima rotazione valutata tramite indagini numeriche e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=0.15$ al variare di T_L .

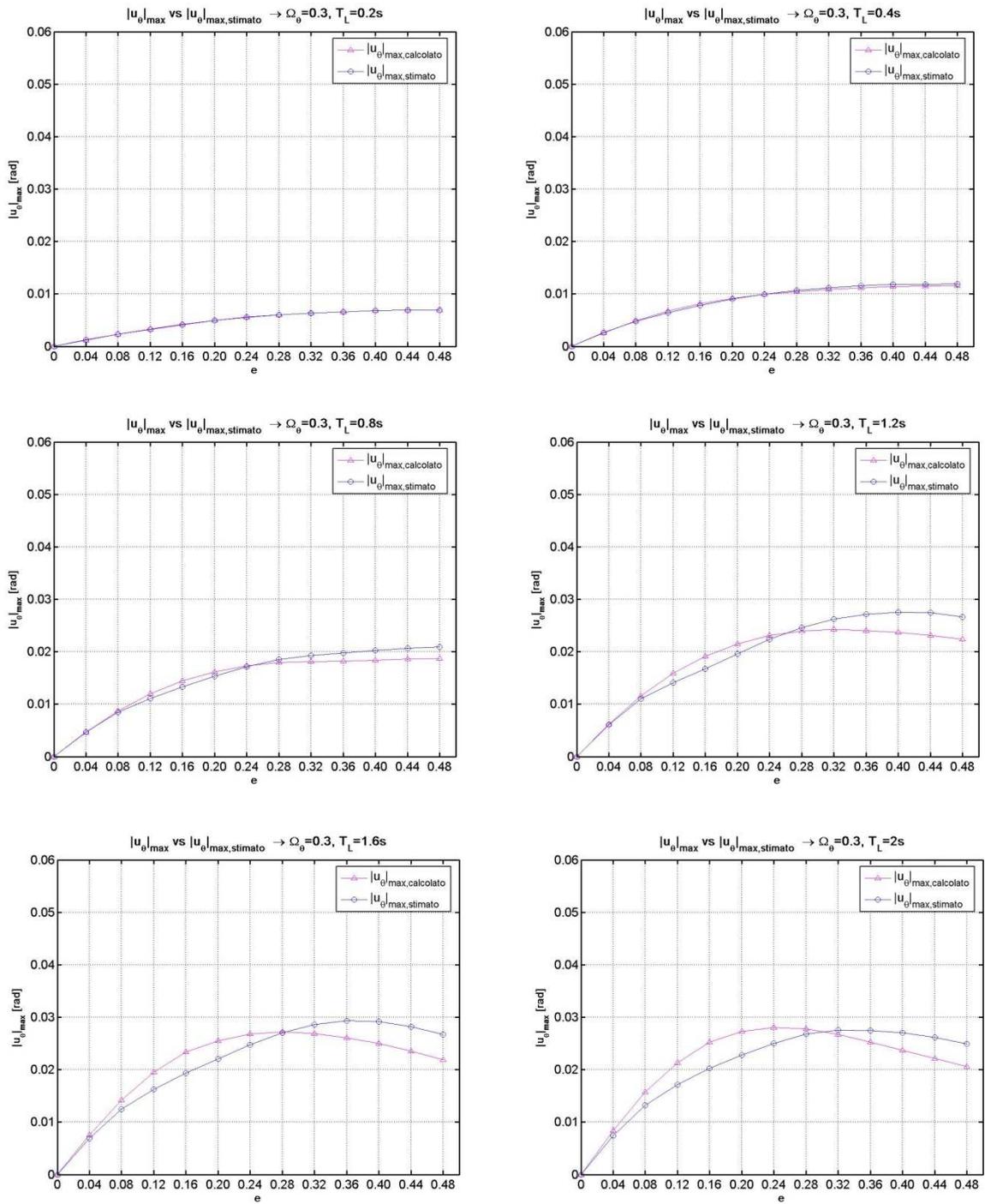


Fig. 3.11 Andamento con l'eccentricità relativa della massima rotazione valutata tramite indagini numeriche e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=0.3$ al variare di T_L .

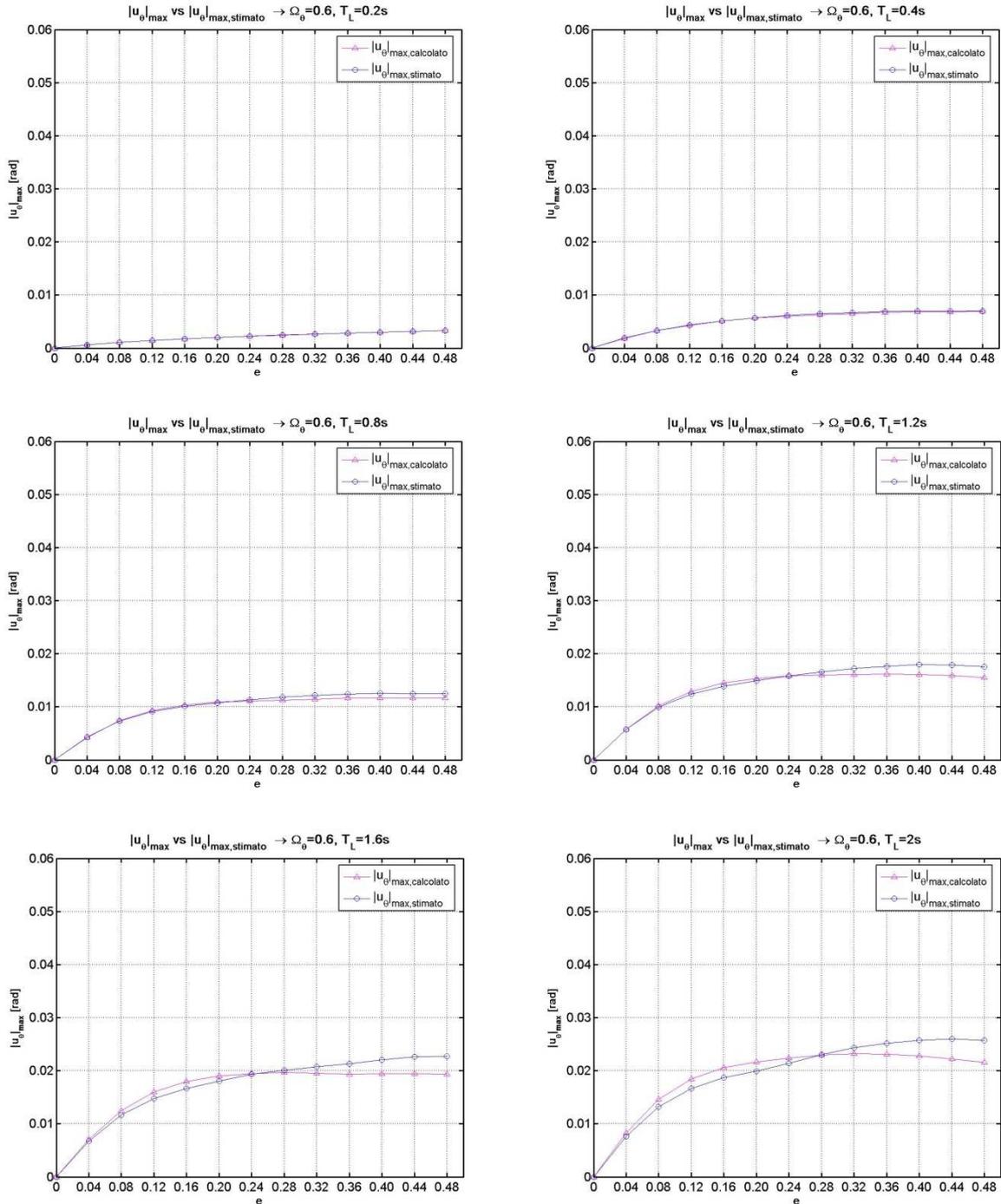


Fig. 3.12 Andamento con l'eccentricità relativa della massima rotazione valutata tramite indagini numeriche e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_0=0.6$ al variare di T_L .

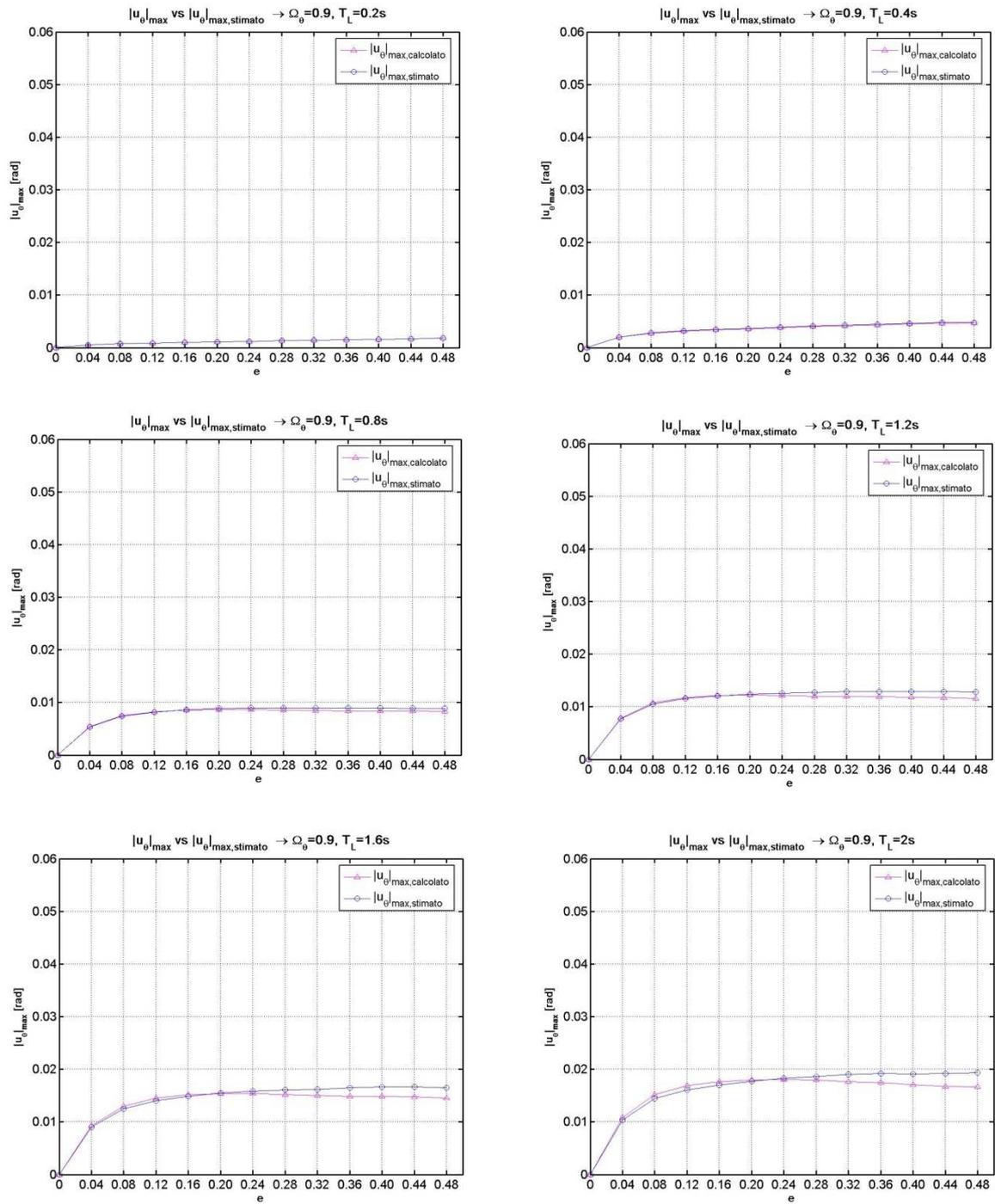


Fig. 3.13 Andamento con l'eccentricità relativa della massima rotazione valutata tramite indagine numeriche e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_0=0.9$ al variare di T_L .

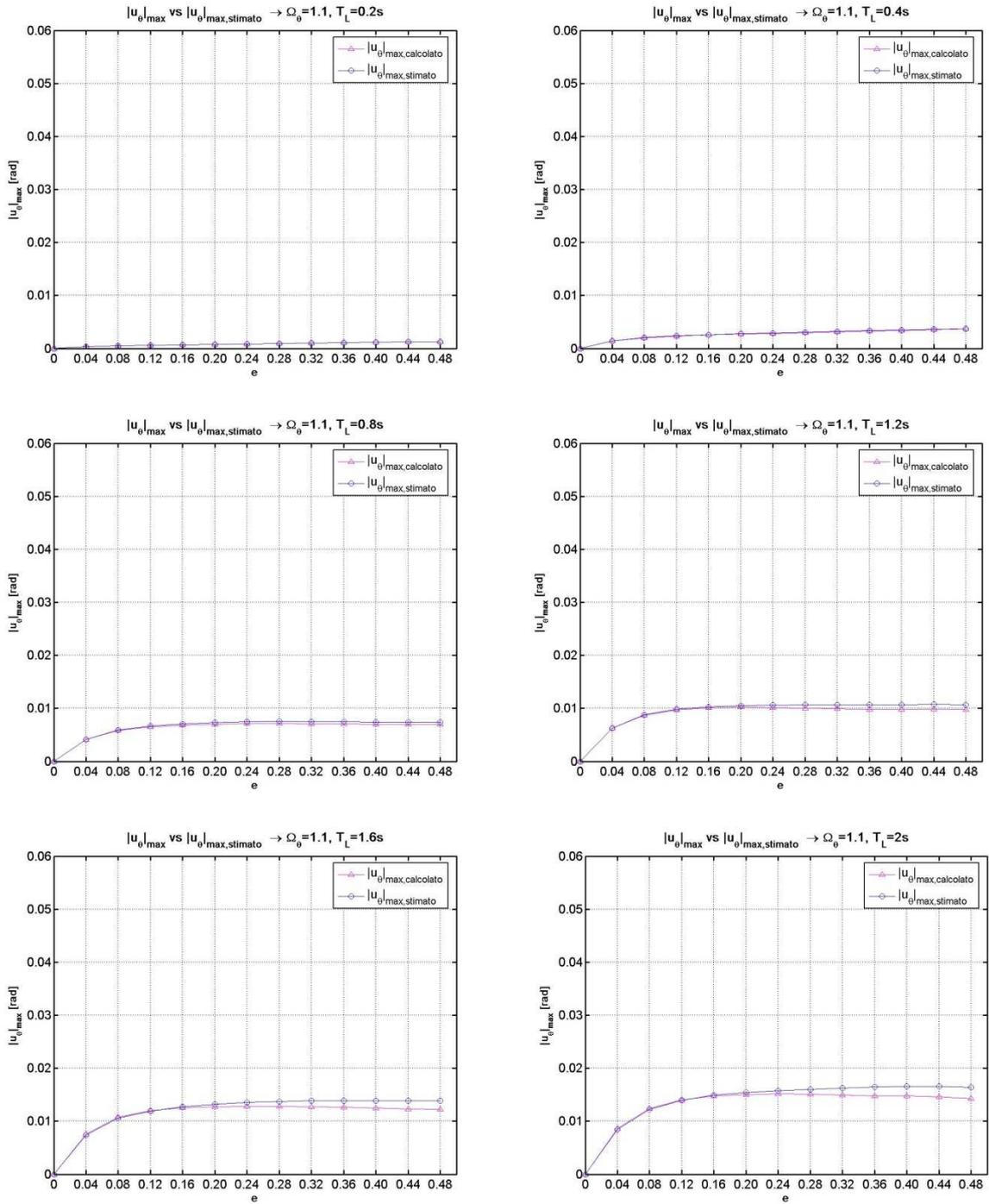


Fig. 3.14 Andamento con l'eccentricità relativa della massima rotazione valutata tramite indagini numeriche e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_0=1.1$ al variare di T_L .

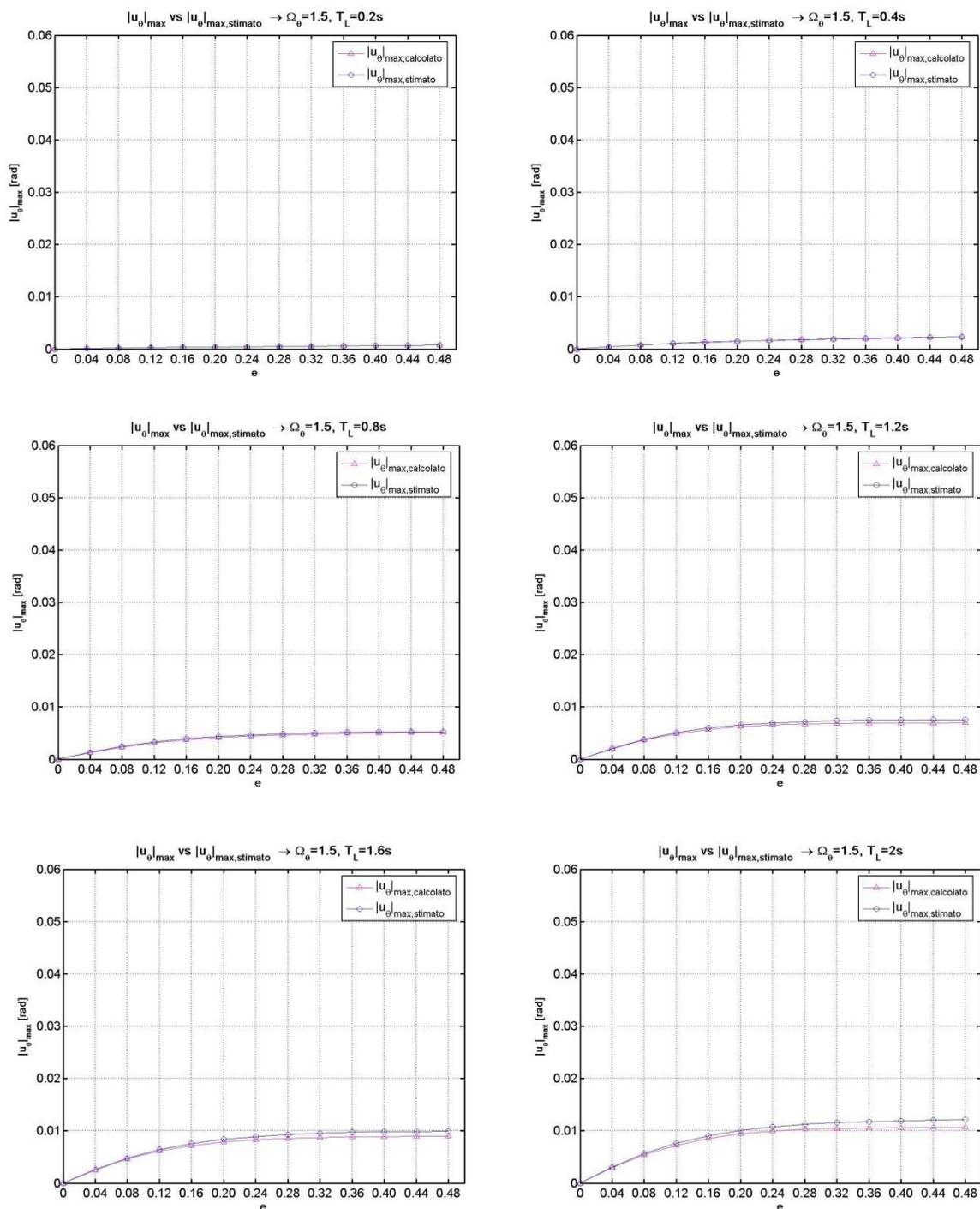


Fig. 3.15 Variazione con con l'eccentricità relativa della massima rotazione valutata tramite indagini numeriche e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_{\theta}=1.1$ al variare di T_L .

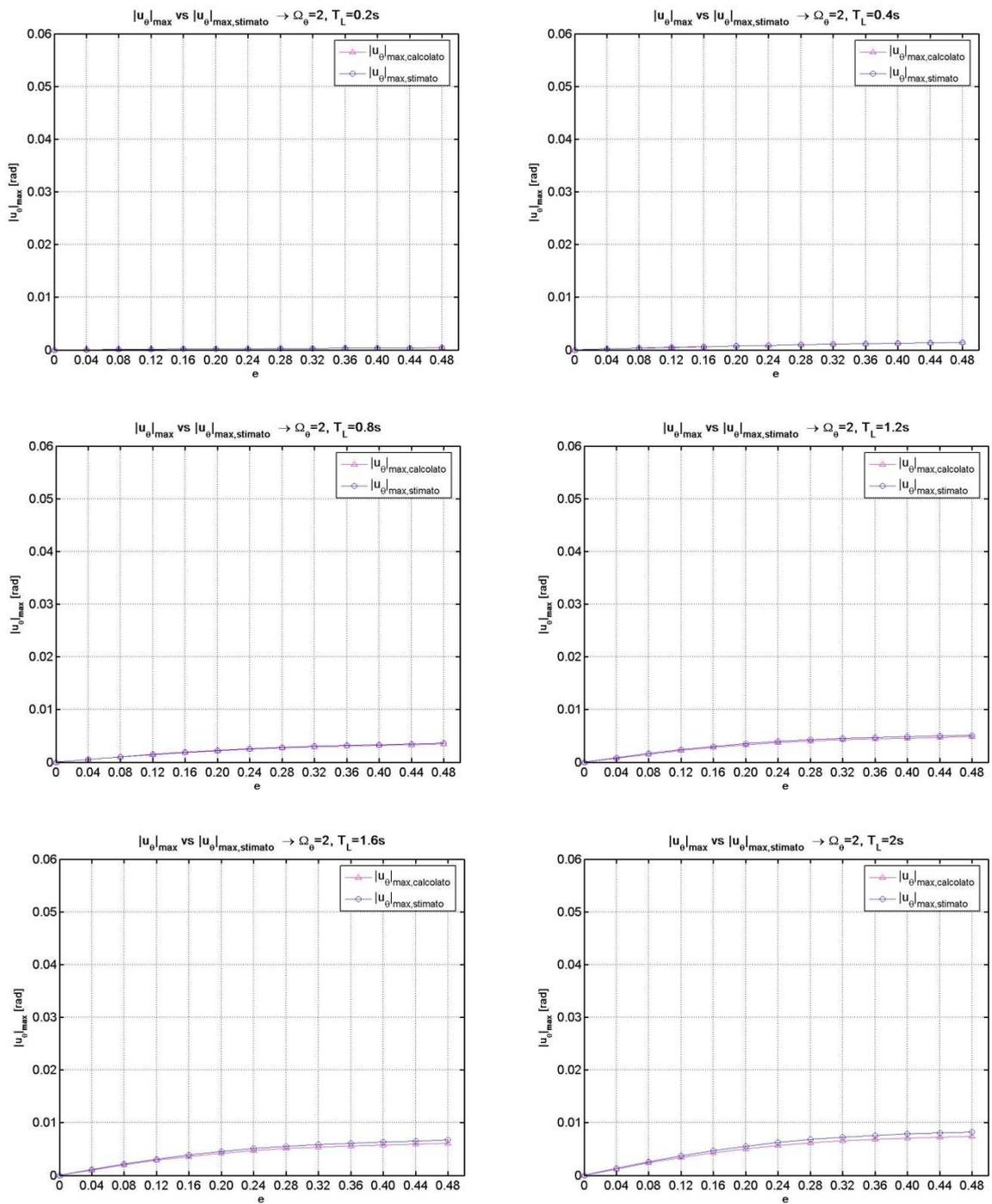


Fig. 3.16 Andamento con l'eccentricità relativa della massima rotazione valutata tramite indagini numeriche e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=2$ al variare di T_L .

Dai grafici si può osservare che:

- in generale la curva che rappresenta la rotazione valutata attraverso indagini numeriche e quella stimata con le formule per gran parte coincidono, per cui è possibile affermare che il *METODO ALPHA* per la stima delle rotazioni è un buono strumento predittivo;
- la rotazione aumenta all'aumentare del periodo longitudinale (diminuisce così la rigidità della struttura) e all'aumentare dell'eccentricità;
- nel caso di strutture molto torsioflessibili ($0.15 < \Omega_{\theta} < 0.3$) la rotazione massima è compresa tra 0.01rad e 0.03rad;
- dal valore di $\Omega_{\theta} = 0.6$ in poi la rotazione massima diminuisce, sempre di più al crescere di questo parametro;
- per $1.5 < \Omega_{\theta} < 2$ e periodi longitudinali bassi la rotazione è molto prossima allo zero.

3.6 VALUTAZIONE DEL PARAMETRO A

È stata fatta una valutazione baricentrica anche per il parametro A , ottenuta come media sui 1000 sismi considerati:

$$\mu_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (3.14)$$

dove n è il numero dei sismi e A_i rappresenta il valore del parametro per il singolo sisma. I risultati vengono proposti sia sotto forma di curve di regressione, in modo da avere una stima della differenza tra i valori osservati e quelli teorici attraverso lo standard error, che sotto forma di curve di livello, per avere una lettura immediata dei risultati.

3.6.1 Curve di regressione generali

Dai grafici precedenti relativi alla variazione di R_i con l'eccentricità relativa si sono ottenuti, mediante la (3.8), gli andamenti del parametro A in funzione di e . In ciascun grafico è stata poi tracciata la retta di regressione lineare, nel senso dei minimi quadrati, ed è stato calcolato l'errore standard $s_{\mu_A|e}$.

Anche per il parametro correttivo A le curve di regressione sono delle stime, il cui errore standard associato consente di verificarne l'affidabilità, per cui anche in questo caso si fa riferimento ad un valore stimato:

$$\mu_A \text{ stimato} \rightarrow \widehat{\mu}_A = ae + b \quad (3.15)$$

Dove a, b sono i coefficienti della regressione lineare.

Dai grafici riportati in Figg. 3.17-3.23 si può osservare che:

- $\widehat{\mu}_A$ sui 1000 sismi considerati è sempre inferiore ad 1 per $\Omega_g > 1$ ed ogni valore di eccentricità, ovvero che $\mu_R < \alpha_u$;
- la pendenza della retta $\widehat{\mu}_A$ tende ad appiattirsi all'aumentare del periodo longitudinale ed è molto più marcata nel caso di strutture torsioflessibili;
- le strutture torsioflessibili possono avere valori di $\widehat{\mu}_A > 1$, in particolare per valori di Ω_g ed eccentricità ridotte;
- A è massimo per T_L, Ω_g, e minimi, ovvero per strutture molto rigide, fortemente torsioflessibili e poco eccentriche. Per queste strutture il rapporto tra la massima rotazione e il massimo spostamento longitudinale risulta essere molto più grande in oscillazioni forzate piuttosto che in oscillazioni libere;
- per le strutture molto torsioflessibili ($\Omega_g = 0.3$ e $\Omega_g = 0.6$) la variazione del parametro A con l'eccentricità relativa dipende fortemente dal periodo di vibrazione longitudinale;
- per valori di $\Omega_g \geq 0.9$ il parametro A dipende molto poco dall'eccentricità per tutti i periodi di vibrazione considerati;
- per le strutture molto torsiorigide ($\Omega_g = 1.5$ e $\Omega_g = 2$) c'è poca variazione del parametro A con l'eccentricità e con il periodo di vibrazione longitudinale;
- lo standard error è elevato per le strutture molto torsioflessibili e contemporaneamente con un periodo di vibrazione molto basso e diminuisce all'aumentare di queste due grandezze.

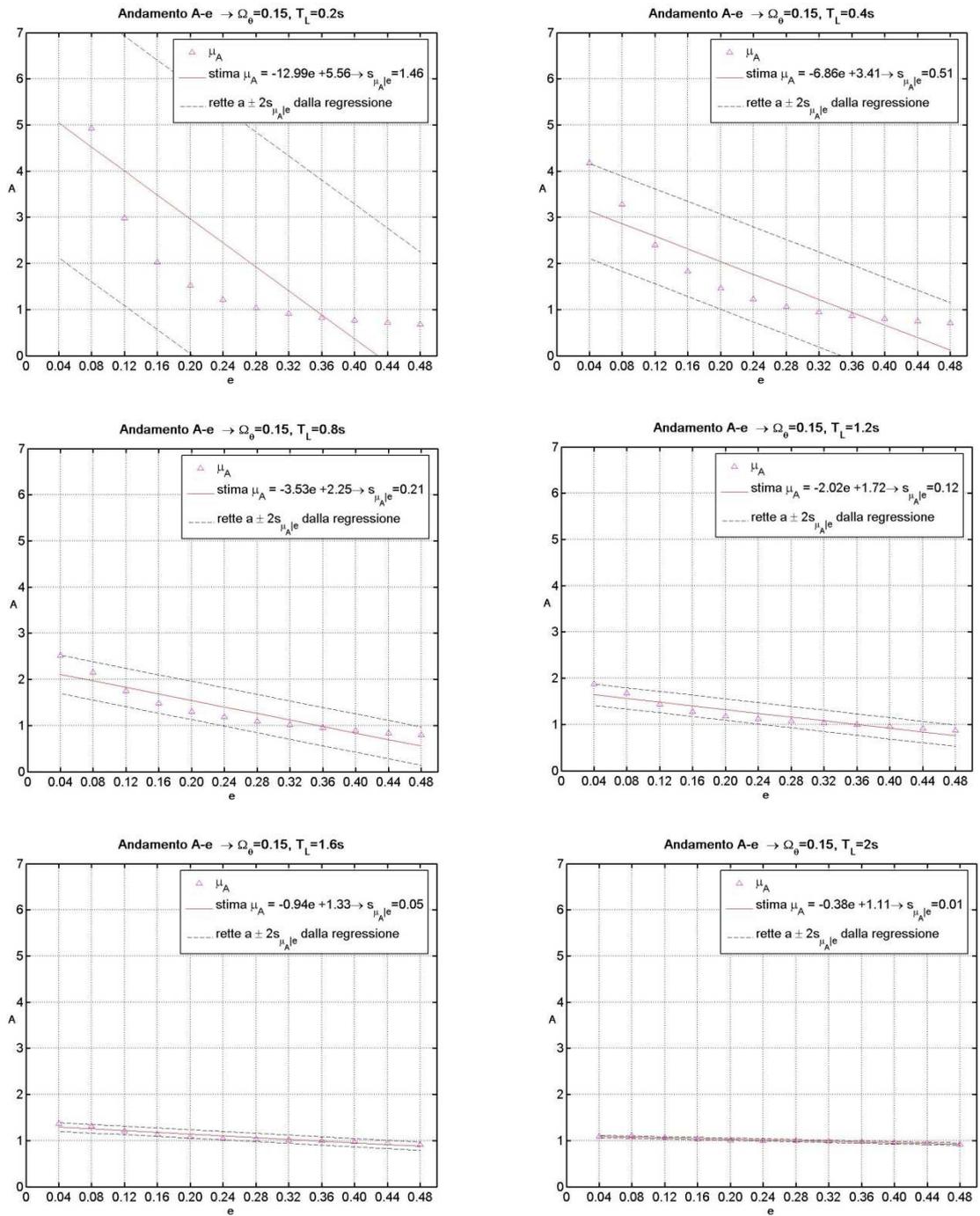


Fig. 3.17 Variazione con l'eccentricità relativa del parametro A per un valore di $\Omega_0=0.15$ e per diversi valori di T_L .

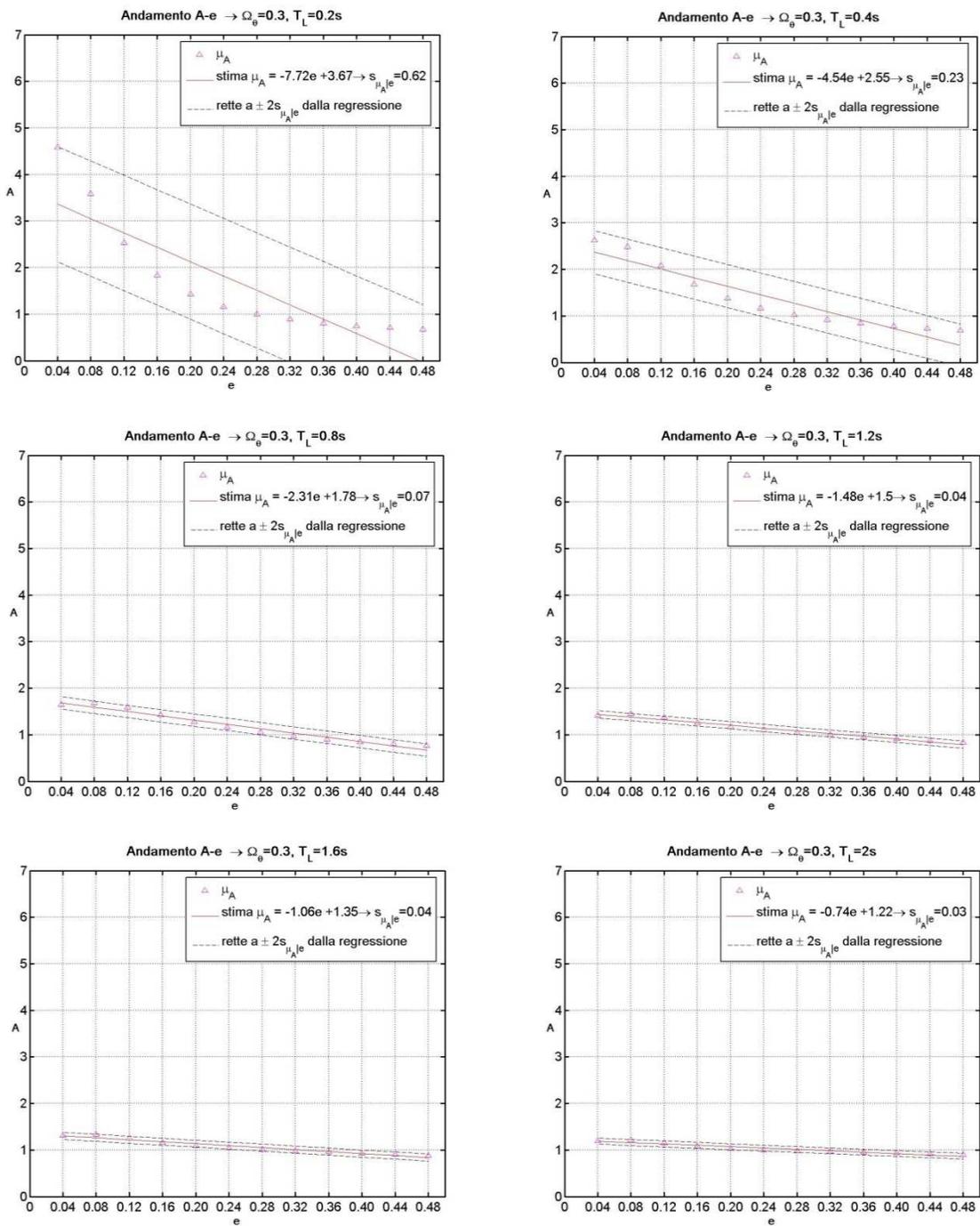


Fig. 3.18 Variazione con l'eccentricità relativa del parametro A per un valore di $\Omega_0=0.3$ e per diversi valori di T_L .

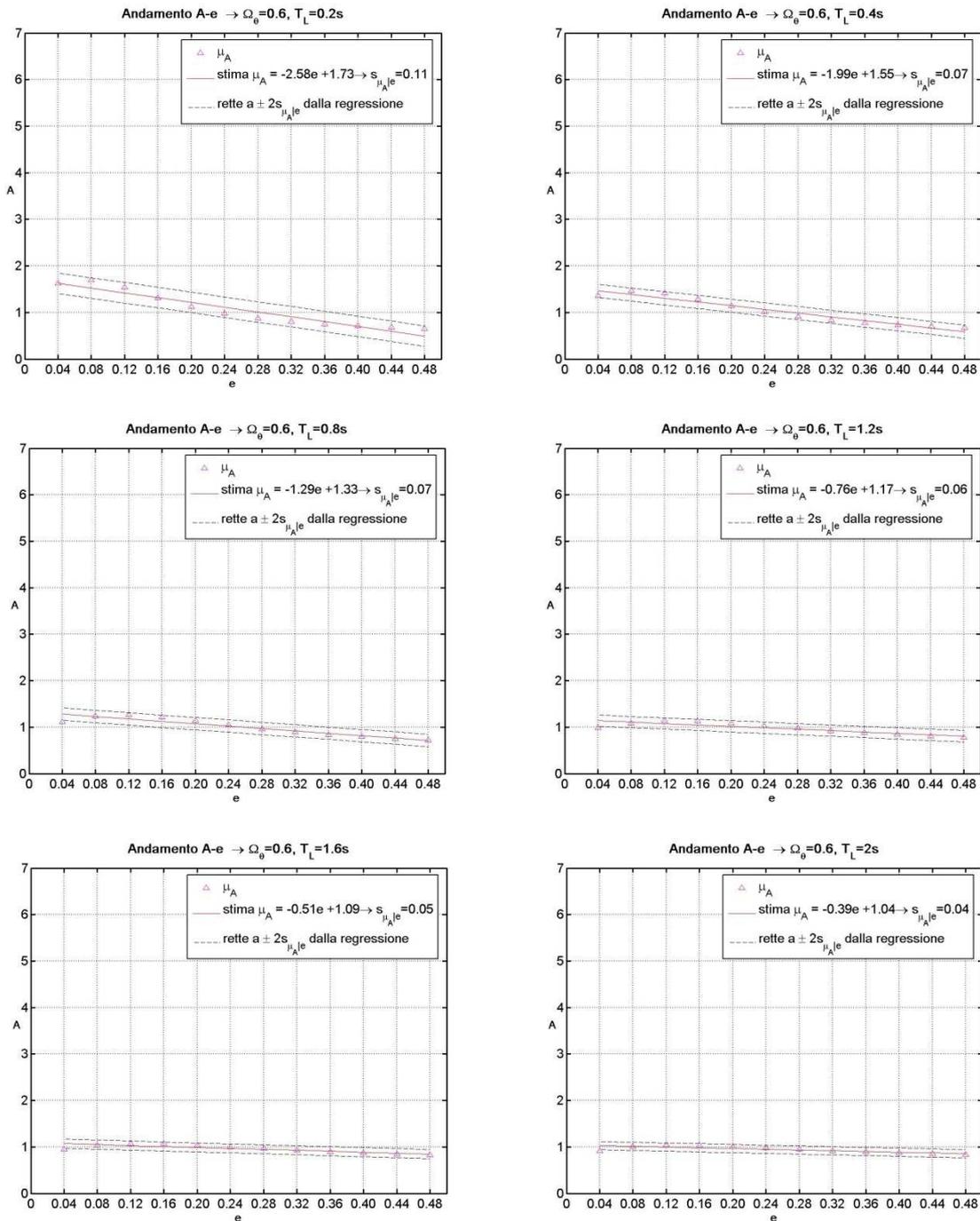


Fig. 3.19 Variazione con l'eccentricità relativa del parametro A per un valore di $\Omega_0=0.6$ e per diversi valori di T_L .

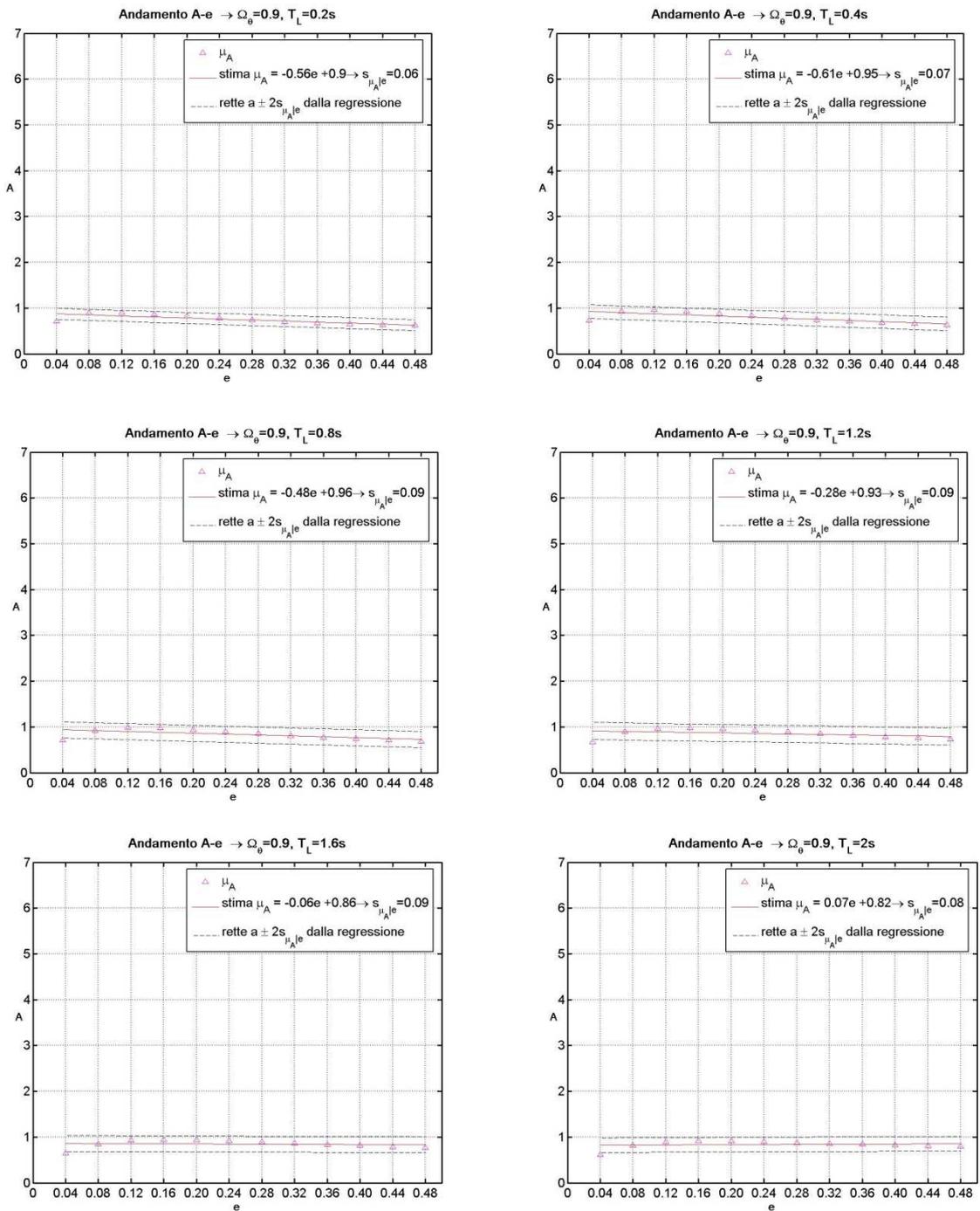


Fig. 3.20 Variazione con l'eccentricità relativa del parametro A per un valore di $\Omega_0=0.9$ e per diversi valori di T_L .

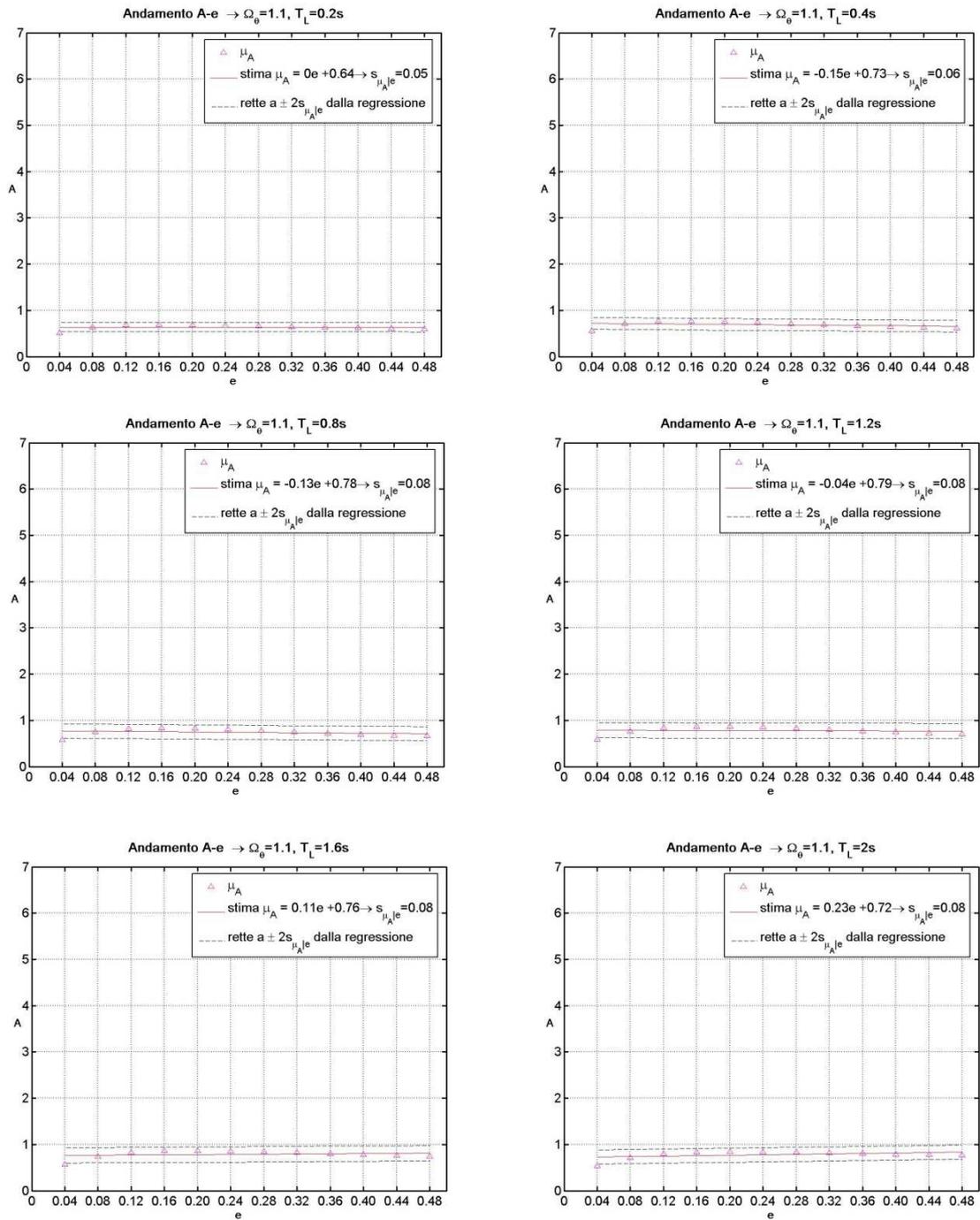


Fig. 3.21 Variazione con l'eccentricità relativa del parametro A per un valore di $\Omega_0=0.9$ e per diversi valori di T_L .

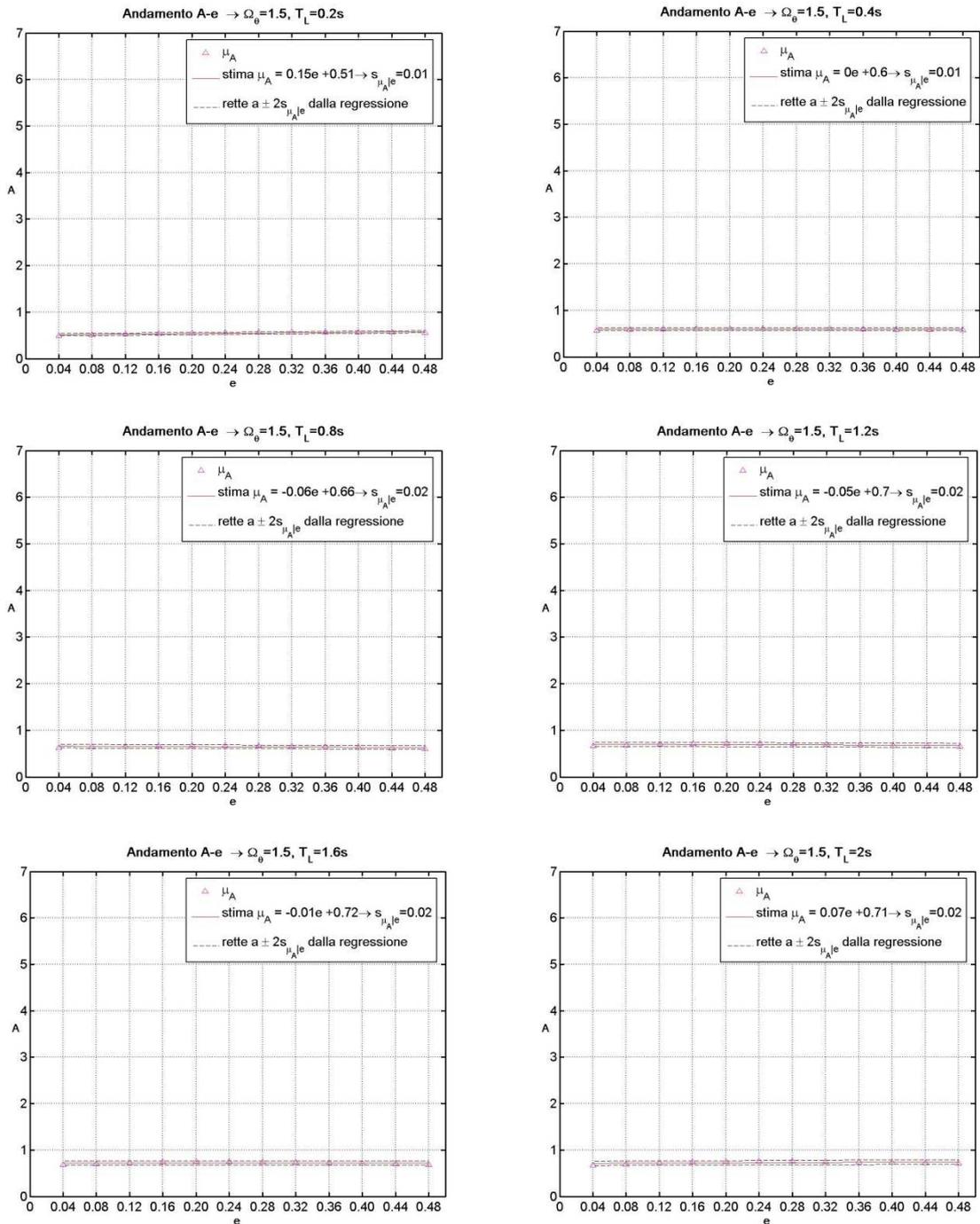


Fig. 3.22 Variazione con l'eccentricità relativa del parametro A per un valore di $\Omega_0=1.1$ e per diversi valori di T_L .

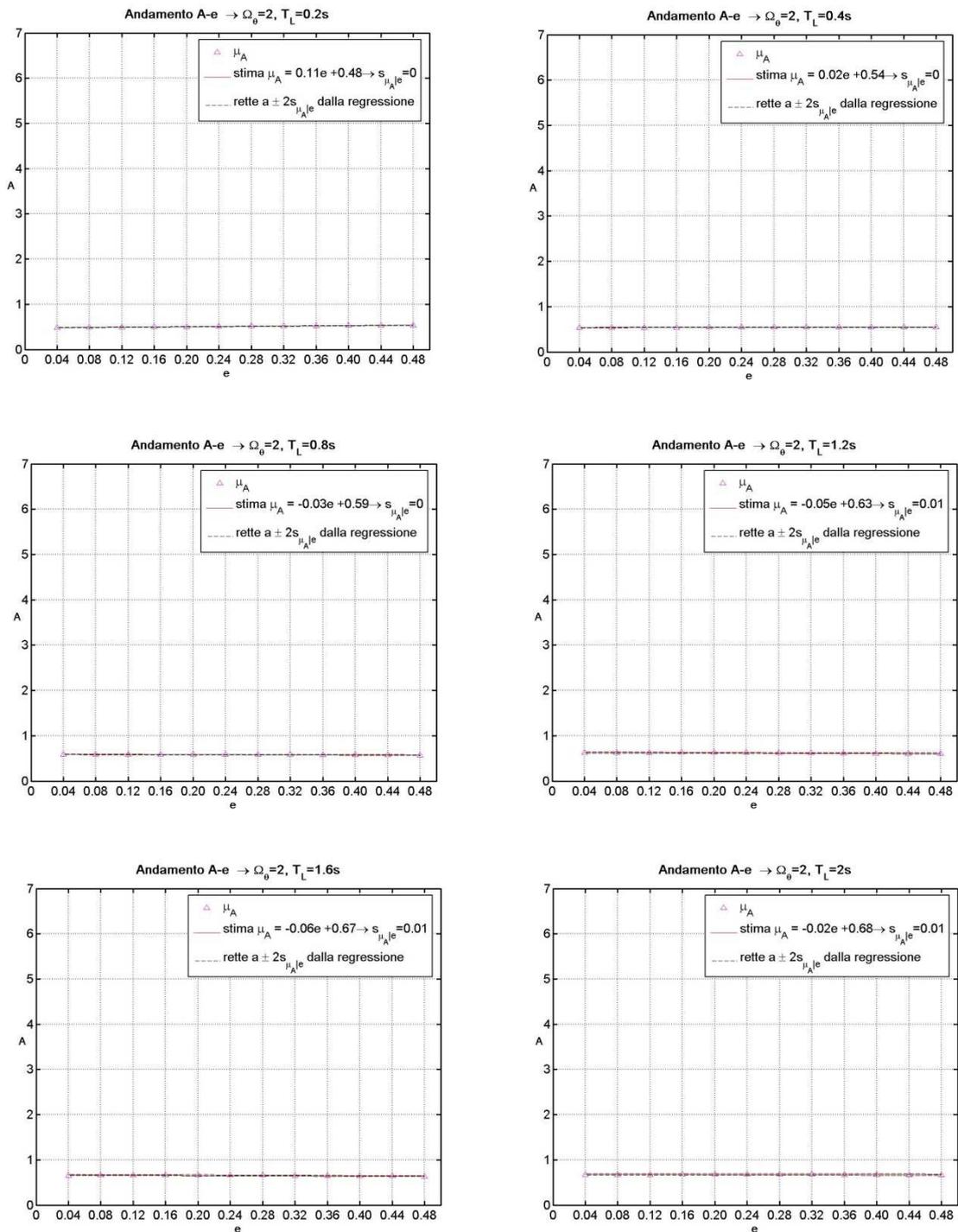


Fig. 3.23 Variazione con l'eccentricità relativa del parametro A per un valore di $\Omega_0=2$ e per diversi valori di T_L .

3.6.2 Curve di livello per le strutture torsiorigide

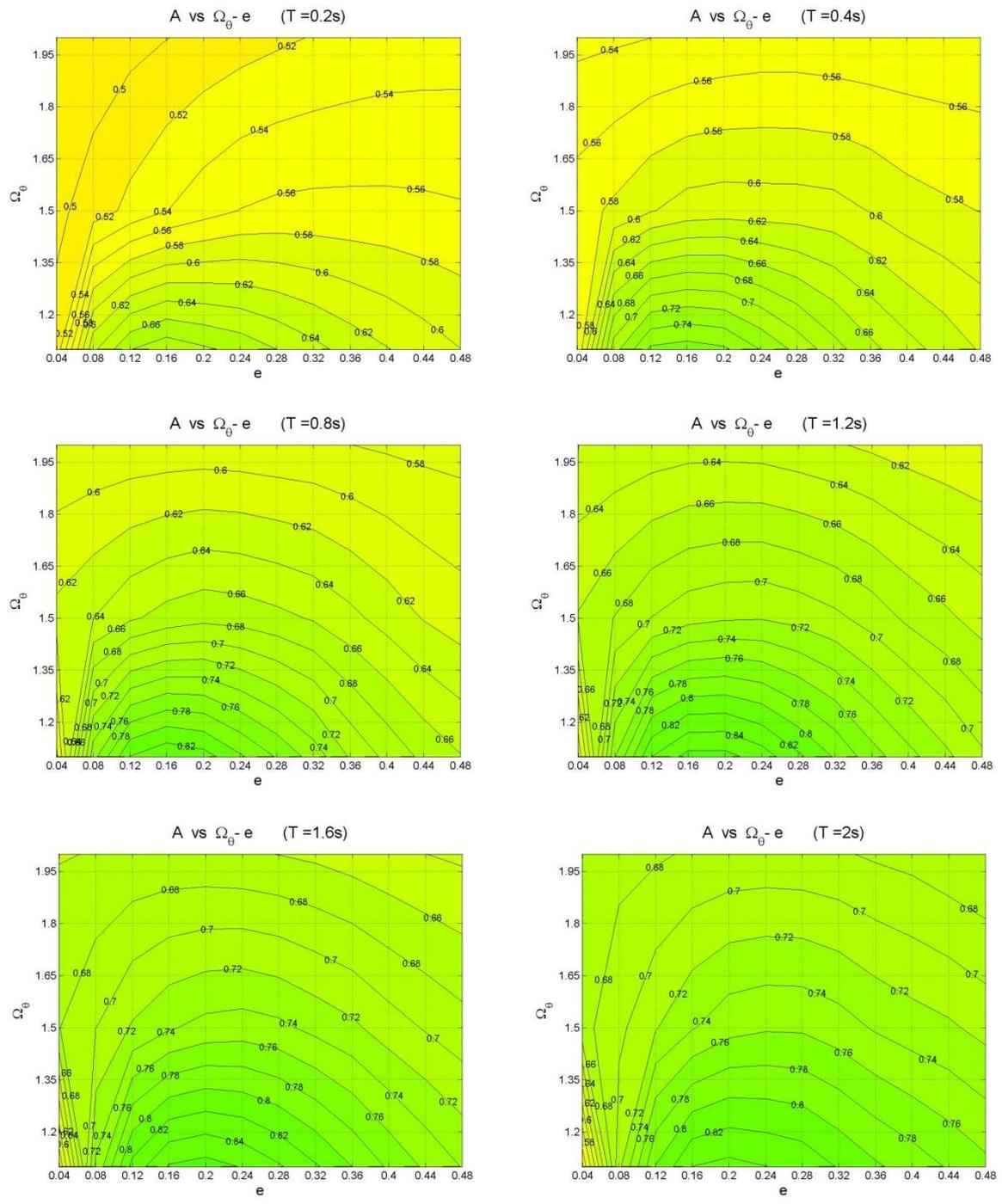
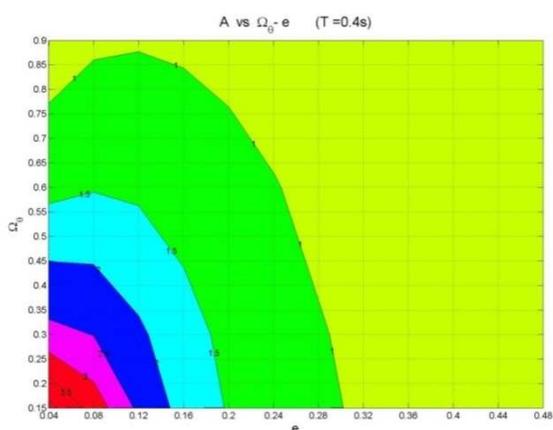
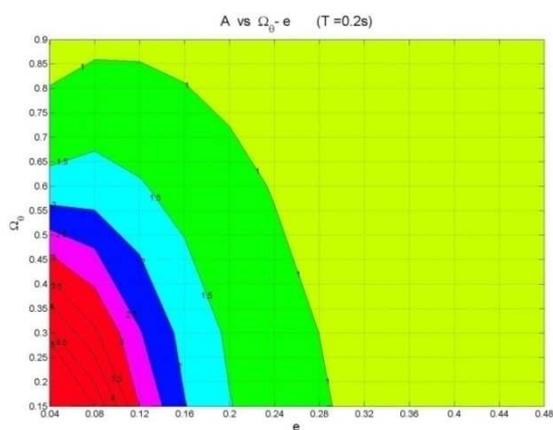


Fig. 3.24 Strutture torsiorigide: variazione con l'eccentricità relativa e e con Ω_0 del parametro A per diversi valori di T_L .

Per le strutture torsiorigide si può concludere che:

- il parametro A è sempre compreso tra 0.5 e 0.84;
- il parametro A diminuisce all'aumentare di Ω_y e al diminuire dell'eccentricità;
- i valori del parametro A possono essere considerati pressoché costanti e pari a $0.7 \div 0.75$; in precedenti lavori svolti sulla media di 20 input sismici erano stati ottenuti gli stessi risultati, che ora perciò vengono confermati su un campione molto più ampio di record.

3.6.3 Curve di livello per le strutture torsioflessibili



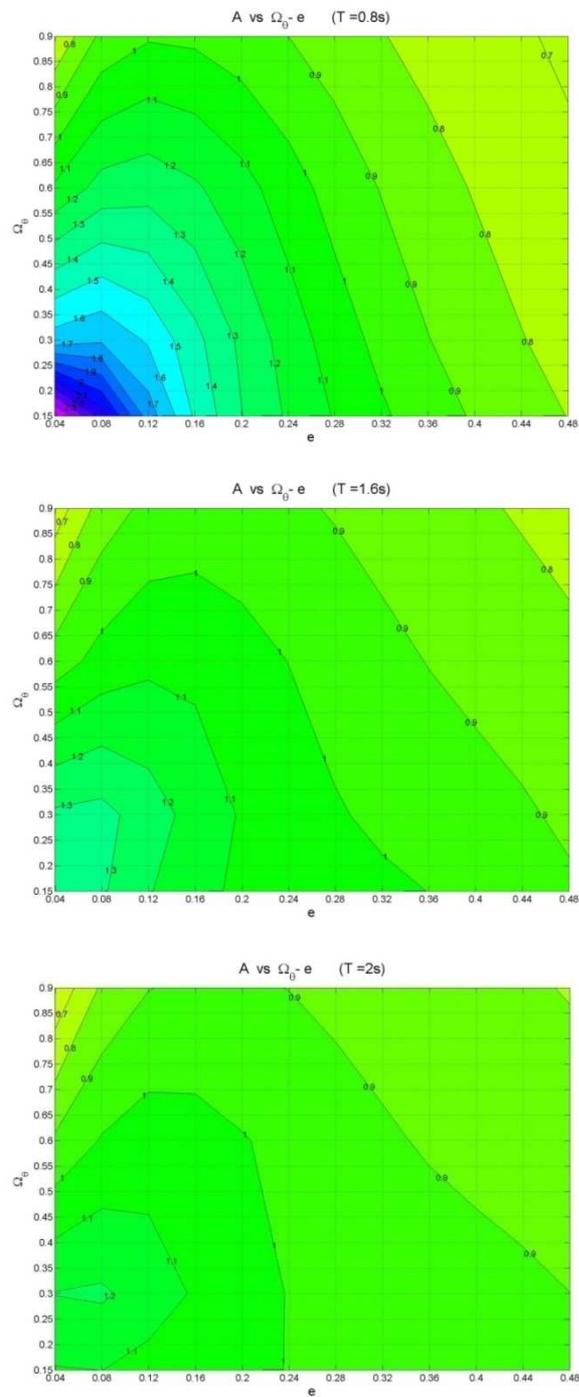
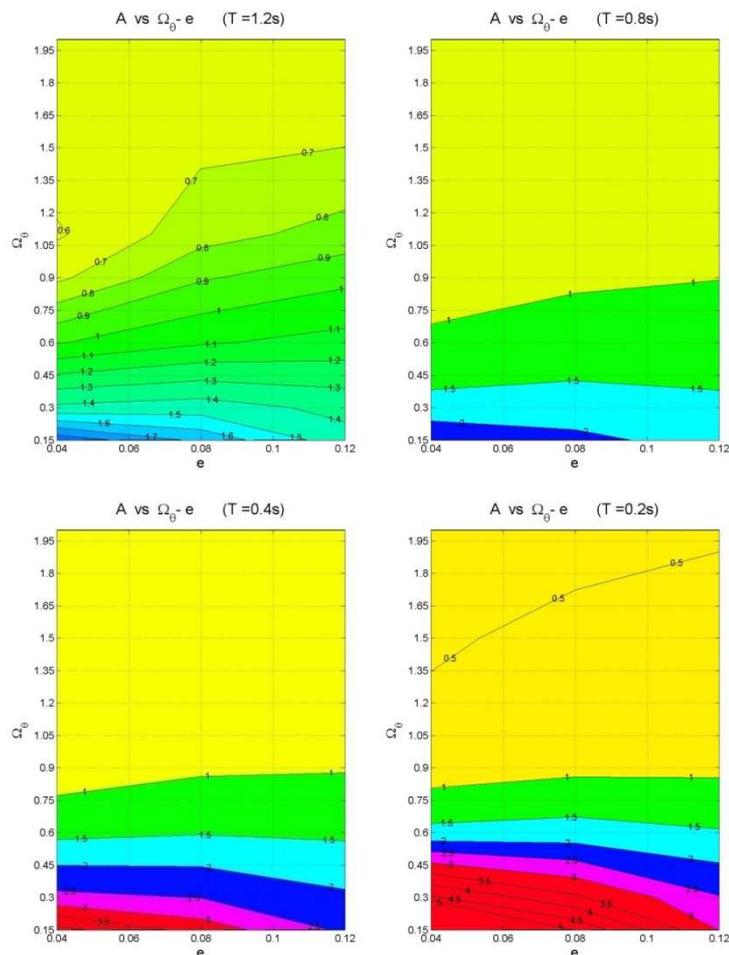


Fig. 3.25 Strutture torsioflessibili: variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_0 del per diversi valori di T_L parametro A .

Per le strutture torsioflessibili si può concludere che:

- il parametro A è sempre compreso tra 0.7 e 6;
- il parametro A diminuisce all'aumentare dell'eccentricità e di Ω_θ ;
- per periodi superiori a 1.6s non c'è grande variabilità di A con le grandezze del sistema ed è compreso tra 0.8 e 1.3;
- questi risultati confermano gli esiti precedenti, ottenuti sulla media di 20 input sismici limitatamente alla classe di strutture molto torsioflessibili ($0.15 < \Omega_\theta < 0.3$), tranne nel caso di $\Omega_\theta = 0.15$, $e = 0.04$, $T_L = 0.2$ per cui si hanno dei valori massimi più bassi.

3.6.4 Curve di livello per le strutture a ridotta eccentricità



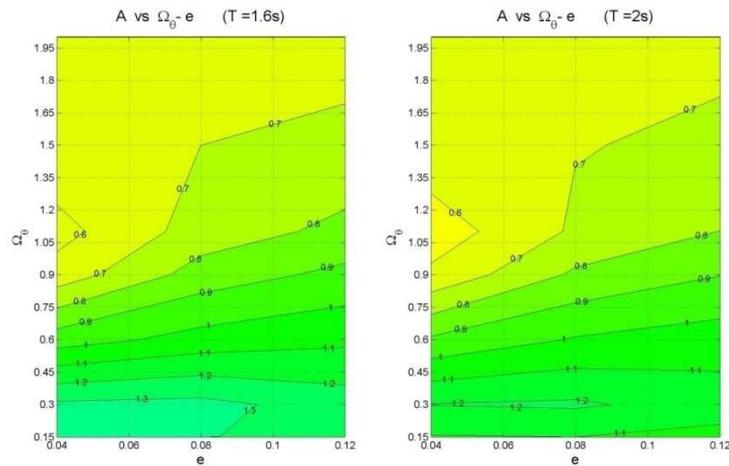


Fig. 3.26 Strutture a ridotta eccentricità: variazione con l'eccentricità relativa e con $\Omega\theta$ del per diversi valori di TL parametro A.

Per le strutture a ridotta eccentricità si può concludere che:

- il parametro A è sempre compreso tra 0.5 e 6;
- il parametro A è sostanzialmente funzione solo di Ω_g , poichè nel ristretto intervallo di eccentricità considerato non si riscontrano profonde variazioni;
- per periodi superiori a 1.2s A è sempre minore di 1.7;
- per valori di $\Omega_g > 0.8$, A è sempre minore di 1;
- per queste strutture erano già stati ottenuti risultati analoghi sulla base delle analisi svolte sulla media di 20 input sismici, per cui anche in questo caso vengono confermati tali esiti.

CAPITOLO 4

APPLICAZIONE DEL METODO ALPHA PER LA STIMA DEL MASSIMO SPOSTAMENTO LONGITUDINALE DEL LATO FLESSIBILE

4.1 INTRODUZIONE

Nel capitolo precedente si è fornita un'espressione per la stima della massima rotazione del sistema eccentrico soggetto ad un generico input sismico, a partire dalle sole proprietà fisiche della struttura.

In questa parte della trattazione l'obiettivo è quello di valutare il massimo spostamento longitudinale della parte flessibile della struttura, ovvero il lato a maggior distanza dal baricentro delle rigidità C_K e di fornirne una semplice espressione a partire dalle caratteristiche strutturali del sistema. La conoscenza di questo valore permette infatti di stabilire in che percentuale influisce l'eccentricità della struttura, per determinati valori di Ω_θ , sullo spostamento longitudinale massimo a cui può essere soggetto il sistema; viene quindi proposta una semplice rappresentazione di carattere generale, nella quale attraverso l'eccentricità relativa e e il parametro Ω_θ si definisce l'incremento di spostamento.

Facendo riferimento alla Fig. 2.1, sotto l'ipotesi di forzante sismica agente solo in direzione y , il lato flessibile della struttura risulta essere BC e il suo opposto, ovvero il lato AB, risulta essere il lato rigido.

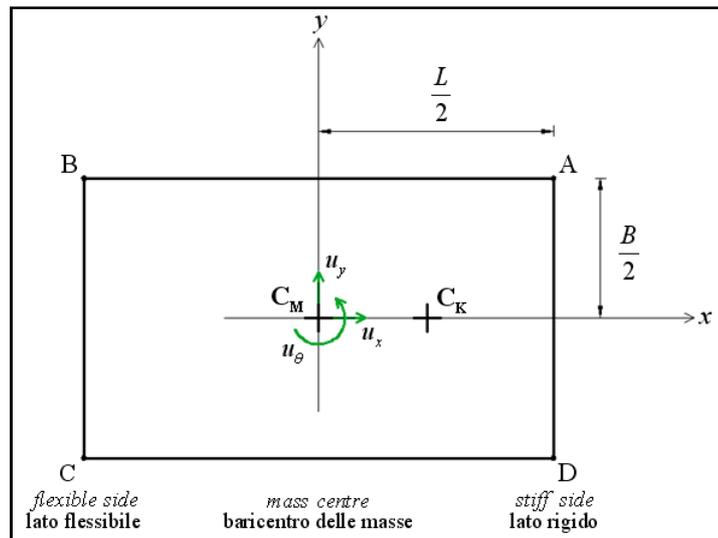


Fig. 4.1 Sistema asimmetrico dinamico caratterizzato da eccentricità longitudinale nulla.

Il lato BC è il lato flessibile della struttura per la sua maggiore distanza rispetto al baricentro delle rigidezze (centro di rotazione della struttura); sotto l' ipotesi di sistemi *one-way eccentricity* soggetti ad eccitazione sismica unidirezionale, si può evitare di indagare la storia temporale degli spostamenti trasversali $u_x(t)$ del baricentro delle masse, che risultano identicamente nulli per le ipotesi fatte.

La rotazione attorno al baricentro delle rigidezze, sotto l'ipotesi di piccole rotazioni, non da componenti di spostamento lungo x .

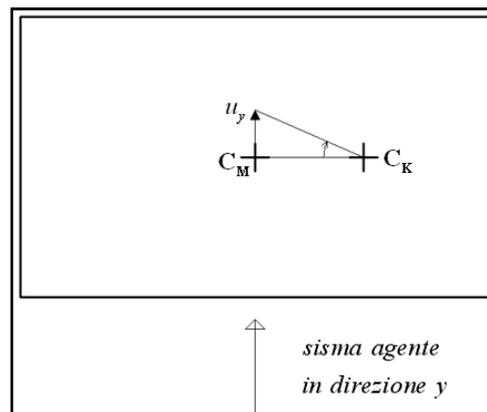


Fig. 4.2 Rotazione della struttura intorno al baricentro delle rigidezze per piccole rotazioni.

A questo punto è immediato valutare lo spostamento del lato flessibile BC, come:

$$\begin{cases} u_{xB}(t) = -u_{\vartheta}(t) \cdot \frac{B}{2} = u_{xA}(t) \\ u_{yB}(t) = u_{yCM}(t) - u_{\vartheta}(t) \cdot \frac{L}{2} \end{cases} \quad (0.1)$$

$$\begin{cases} u_{xC}(t) = u_{\vartheta}(t) \cdot \frac{B}{2} = -u_{xA}(t) \\ u_{yC}(t) = u_{yCM}(t) - u_{\vartheta}(t) \cdot \frac{L}{2} = u_{yB}(t) \end{cases} \quad (0.2)$$

Con riferimento al solo spostamento longitudinale $u_{yB}(t)$, coincidente con $u_{yC}(t)$, risulta di interesse progettuale e di verifica la conoscenza del suo valore massimo, piuttosto che della sua storia temporale; viene quindi valutato il massimo della seconda delle (4.1):

$$|u_{yB}|_{max} = \max \left(\left| u_{yCM}(t) - u_{\vartheta}(t) \cdot \frac{L}{2} \right| \right) \quad (0.3)$$

La (4.3) ha il limite di essere la composizione di due risposte dipendenti dal tempo, per cui non rappresenta una formula semplice da impiegare nella valutazione del massimo spostamento del lato flessibile; inoltre anche la risposta $|u_{yB}|_{max}$ sarà funzione del tempo stesso e perderebbe di generalità.

4.2 APPROCCIO CON I VALORI MASSIMI DELLE RISPOSTE LONGITUDINALI E ROTAZIONALI

Una diversa strada per la determinazione del massimo spostamento longitudinale del lato flessibile della struttura può essere fornita dalla semplice composizione dei valori massimi delle risposte del sistema riferite al baricentro delle masse. Fisicamente infatti lo spostamento sarebbe dato dal massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse più lo spostamento conseguente alla massima rotazione del sistema:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM}|_{max} + |u_{\vartheta}|_{max} \cdot \frac{L}{2} \quad (0.4)$$

Indagando $|u_{yB}|_{max}$ nei termini espressi dalla (4.4) si può vedere come le dimensioni in pianta ($L \times B$) influiscano solo attraverso il fattore di forma $\Phi = \frac{L}{B}$:

$$\begin{aligned}
\frac{|u_{yB}|_{max}}{|u_{yCM}|_{max}} &= 1 + \frac{|u_{\vartheta}|_{max}}{|u_{yCM}|_{max}} \frac{|L|}{2} = 1 + \frac{R}{\rho_m} \frac{|L|}{2} \\
&= 1 + \frac{R}{D_e} \sqrt{12} \frac{|L|}{2} = 1 + \frac{R}{\sqrt{L^2 + B^2}} \sqrt{12} \frac{|L|}{2} \\
&= 1 + \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{1}{\Phi^2}}} \frac{\sqrt{12}}{2} = 1 + \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} R
\end{aligned} \tag{0.5}$$

In questo modo la (4.4) può essere riscritta come:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM}|_{max} \left(1 + R \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right) \tag{0.6}$$

espressione che consente di considerare un'indagine parametrica al variare di:

- e (eccentricità relativa);
- B (lato lungo y);
- Ω_{ϑ} (rapporto tra il raggio d'inerzia delle rigidezze e quello delle masse);
- T_L (periodo di vibrazione longitudinale).

La composizione dei valori massimi delle risposte per la valutazione del massimo spostamento longitudinale del lato flessibile della struttura, così come espressa dalla (4.4), non è però completamente rigorosa. Sommare direttamente i massimi delle risposte implica infatti che questi siano raggiunti nello stesso istante temporale, ovvero che quando lo spostamento longitudinale del baricentro delle masse $|u_{yCM}|_{max}$ raggiunge il suo massimo valore, contemporaneamente è massima anche la rotazione $|u_{\vartheta}|_{max}$. Questo non è sempre vero, per cui per rimuovere quest' ipotesi, la (4.4) e la (4.5) possono essere riscritte in termini di disuguaglianze:

$$|u_{yB}|_{max} \leq |u_{yCM}|_{max} + |u_{\vartheta}|_{max} \cdot \frac{L}{2} \quad (0.7)$$

$$|u_{yB}|_{max} \leq |u_{yCM}|_{max} \left(1 + R \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right) \quad (0.8)$$

Considerare le (4.4),(4.5) in luogo delle (4.6),(4.7) è sicuramente a favore di sicurezza, ma in alcuni casi può condurre a delle eccessive sovra stime.

4.2.1 Il coefficiente di contemporaneità ζ

Per ottenere quindi una stima che sia più vicina all'effettivo valore di $|u_{yB}|_{max}$, continuando a ragionare in termini di valori massimi delle risposte, si può pensare di introdurre un coefficiente correttivo, che può essere indicato come coefficiente di contemporaneità, proprio ad indicare la sua funzione di ripristinare il massimo valore di una risposta a quel valore che è effettivamente contemporaneo al massimo dell'altra risposta. Indicando quindi con:

$$a = |u_{yCM}|_{max} \quad b = |u_{\vartheta}|_{max} \cdot \frac{L}{2} \quad (0.9)$$

la combinazione può avvenire mediante la:

$$|u_{yB}|_{max} = \sqrt{a^2 + 2\zeta ab + b^2} \quad (0.10)$$

espressione nota anche come "Percentage combination rule" e usualmente impiegata per la combinazione delle due azioni sismiche E_x e E_y .

Il coefficiente ζ che compare all'interno della (4.10) assume il ruolo di coefficiente di contemporaneità ed è legato alla correlazione tra le due risposte $|u_{yCM}|_{max}$ e $|u_{\vartheta}|_{max}$. La (4.10) è delimitata da due situazioni limite:

- correlazione nulla: $\zeta = 0 \rightarrow |u_{yB}|_{max} = \sqrt{a^2 + b^2}$, ovvero le due risposte sono statisticamente indipendenti;
- perfetta correlazione: $\zeta = 1 \rightarrow |u_{yB}|_{max} = a + b$, che rappresenta la situazione già espressa attraverso la (4.4).

Esplicitando la (4.10) si ha:

$$\begin{aligned} & |u_{yB}|_{max} \\ &= \sqrt{|u_{yCM}|_{max}^2 + 2\zeta |u_{yCM}|_{max} |u_{\vartheta}|_{max} \cdot \frac{L}{2} + |u_{\vartheta}|_{max}^2 \cdot \frac{L^2}{4}} \quad (0.11) \end{aligned}$$

Dalla (4.11) si può osservare la dipendenza di $|u_{yB}|_{max}$ dalle dimensioni in pianta della struttura e ricavare un'espressione esplicita per ζ :

$$\begin{aligned} & |u_{yB}|_{max} \\ &= \sqrt{|u_{yCM}|_{max}^2 + 2\zeta R |u_{yCM}|_{max}^2 \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} + R^2 |u_{yCM}|_{max}^2 \frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \quad (0.12) \end{aligned}$$

$$\zeta = \frac{|u_{yB}|_{max}^2 - |u_{yCM}|_{max}^2 - |u_{\vartheta}|_{max}^2 \cdot \frac{L}{2}}{2 |u_{yCM}|_{max} |u_{\vartheta}|_{max} \cdot \frac{L}{2}} \quad (0.13)$$

Il coefficiente ζ non rappresenta ancora uno strumento predittivo semplice e immediato per la stima del massimo spostamento longitudinale del lato flessibile della struttura, per cui si è resa necessaria una semplificazione del coefficiente di contemporaneità in modo da avere un'espressione più facile e rapida da utilizzare.

4.2.2 Il parametro B

Come primo passo verso la semplificazione della stima del coefficiente di contemporaneità si fornisce un'espressione approssimata della (4.10) ottenuta mediante espansione in serie di Mc Laurin arrestata al primo ordine:

$$|u_{yB}|_{max} = a + \zeta b + o[b]^2 = a + Bb \quad (0.14)$$

$$|u_{yB}|_{max} = \zeta a + b + o[a]^2 = Ca + b \quad (0.15)$$

Tra le due espressioni si considera esclusivamente la (4.14), poiché si preferisce una riduzione del termine relativo alla massima rotazione piuttosto che del termine relativo al massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse,

considerato il maggior responsabile del massimo spostamento longitudinale del lato flessibile della struttura, come visto nel dettaglio nel paragrafo 1.7.

Esplicitando la (4.14) si ottiene:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM}|_{max} + B|u_{\vartheta}|_{max} \cdot \frac{L}{2} \quad (0.16)$$

La (4.16) può essere riscritta per mostrare che, anche in questa versione approssimata, il massimo spostamento longitudinale della parte flessibile della struttura non dipende dalle effettive dimensioni in pianta della struttura, ma solo dal fattore di forma:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM}|_{max} \left(1 + B \cdot R \cdot \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right) \quad (0.17)$$

La (4.17) ha inoltre il vantaggio che lo spostamento massimo del lato flessibile non è più funzione di due movimenti del sistema, rotazione e spostamento longitudinale, ma solo di quest'ultimo.

Dalla (4.17) si ottiene quindi l'espressione esplicita del coefficiente di contemporaneità B , che rappresenta un parametro del *METODO ALPHA*.

$$B = \frac{|u_{yB}|_{max} - |u_{yCM}|_{max}}{|u_{\vartheta}|_{max} \cdot \frac{L}{2}} \quad (0.18)$$

4.2.3 Valutazione del parametro B

Come per gli altri parametri, anche per B sono state svolte delle indagini numeriche a partire dalla (4.18), al variare dell'eccentricità relativa, di Ω_{ϑ} e di T_L .

Le valutazioni vengono condotte sul valor medio del parametro relativamente ai 1000 input sismici, per ciascuna struttura considerata:

$$B = \mu_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i \quad (0.19)$$

Rappresentando la variazione del coefficiente con l'eccentricità relativa e per ogni

valore di Ω_ϑ e periodo di vibrazione longitudinale T_L , è possibile tracciare la retta di regressione lineare in modo che sia minima la somma dei quadrati delle distanze dei valor medi dalla retta stessa. In questo modo si trova l'equazione di stima del valor medio del coefficiente, indicata come $\widehat{\mu}_B$.

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può concludere che:

- per $\Omega_\vartheta \rightarrow 2$ il parametro B è indipendente dall'eccentricità relativa e , le rette di regressione lineare diventano infatti sempre più orizzontali;
- per $\Omega_\vartheta \rightarrow 2$ il parametro B tende al suo valore massimo;
- il limite superiore del parametro B dipende in modo marcato dal periodo di vibrazione longitudinale T_L , in particolare diminuisce al crescere di questo. Strutture con elevati periodi di vibrazione (strutture isolate alla base o semplicemente strutture poco rigide) sembrano presentare quindi le risposte $|u_{yCM}|_{max}$ e $|u_\vartheta|_{max}$ molto meno correlate rispetto alle stesse strutture con maggiore rigidezza.

Di seguito vengono riportati i grafici del periodo B al variare dell'eccentricità per i valori di Ω_ϑ e di T_L presi in esame in questo studio; come per le altre grandezze si omette il caso di $T_L = 2.5s$, poiché analogo a quello di $T_L = 2s$.

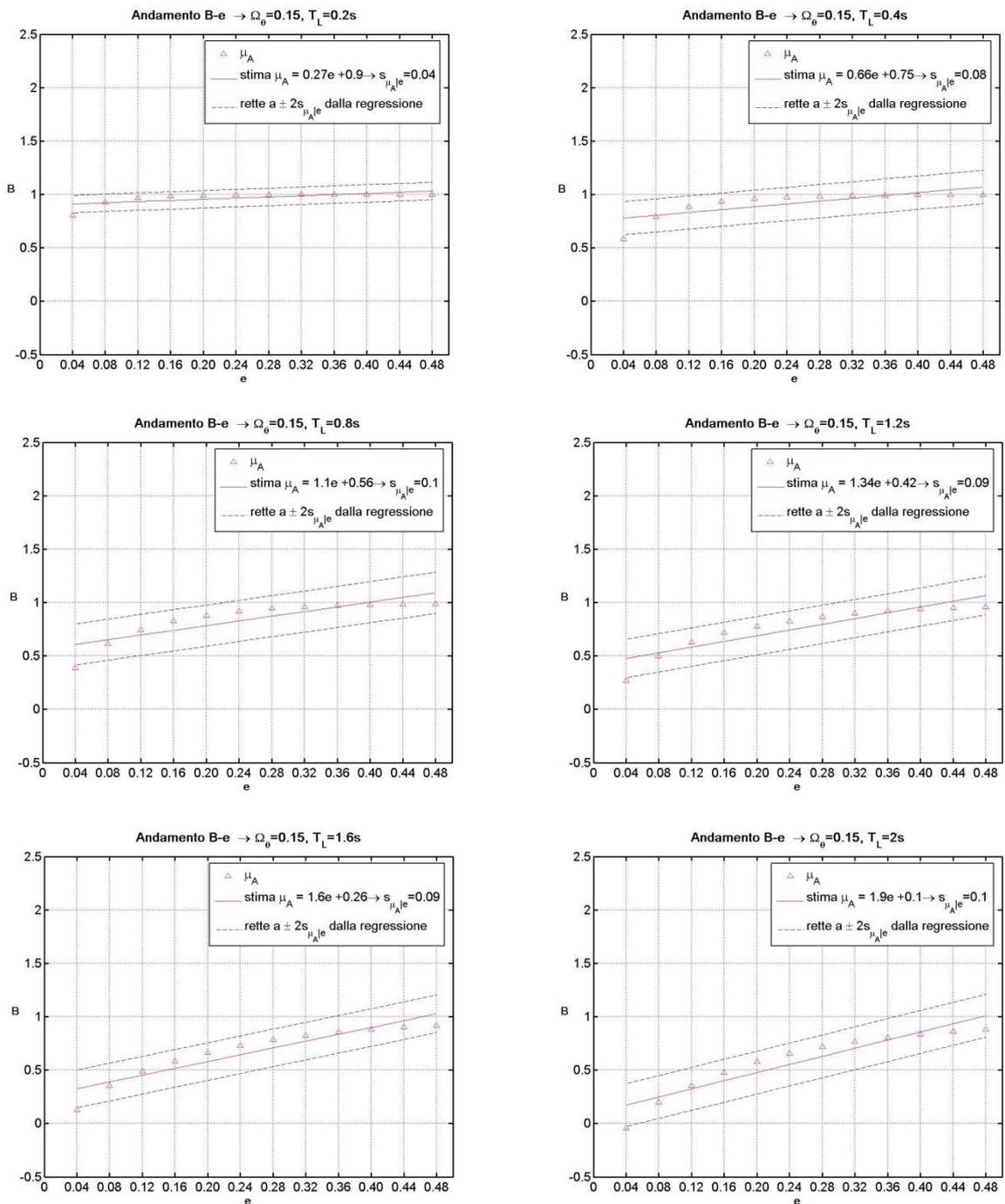


Fig. 4.3 Andamento del parametro B in funzione dell'eccentricità relativa per un valore di $\Omega_\theta=0.15$ e per diversi valori di T_L .

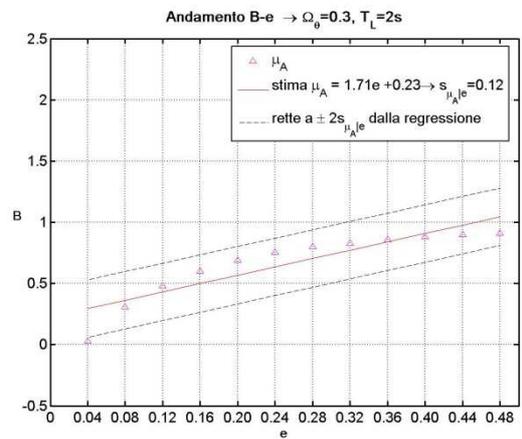
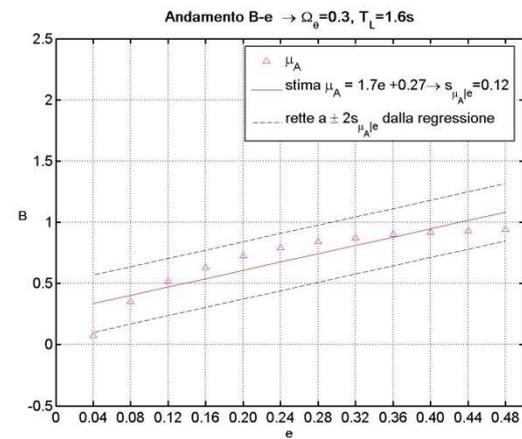
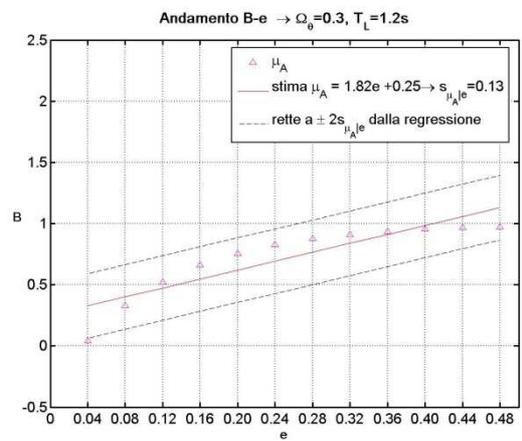
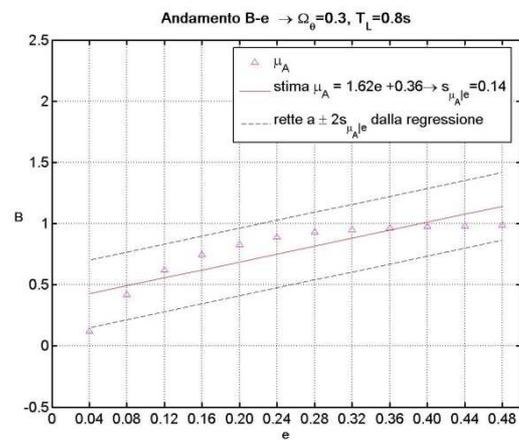
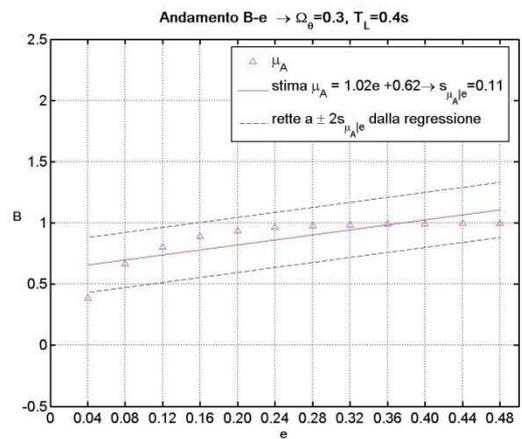
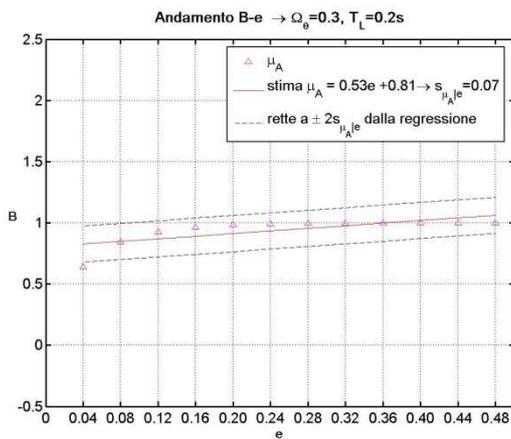


Fig. 4.4 Andamento del parametro B in funzione dell'eccentricità relativa per un valore di $\Omega_\theta=0.3$ e per diversi valori di T_L .

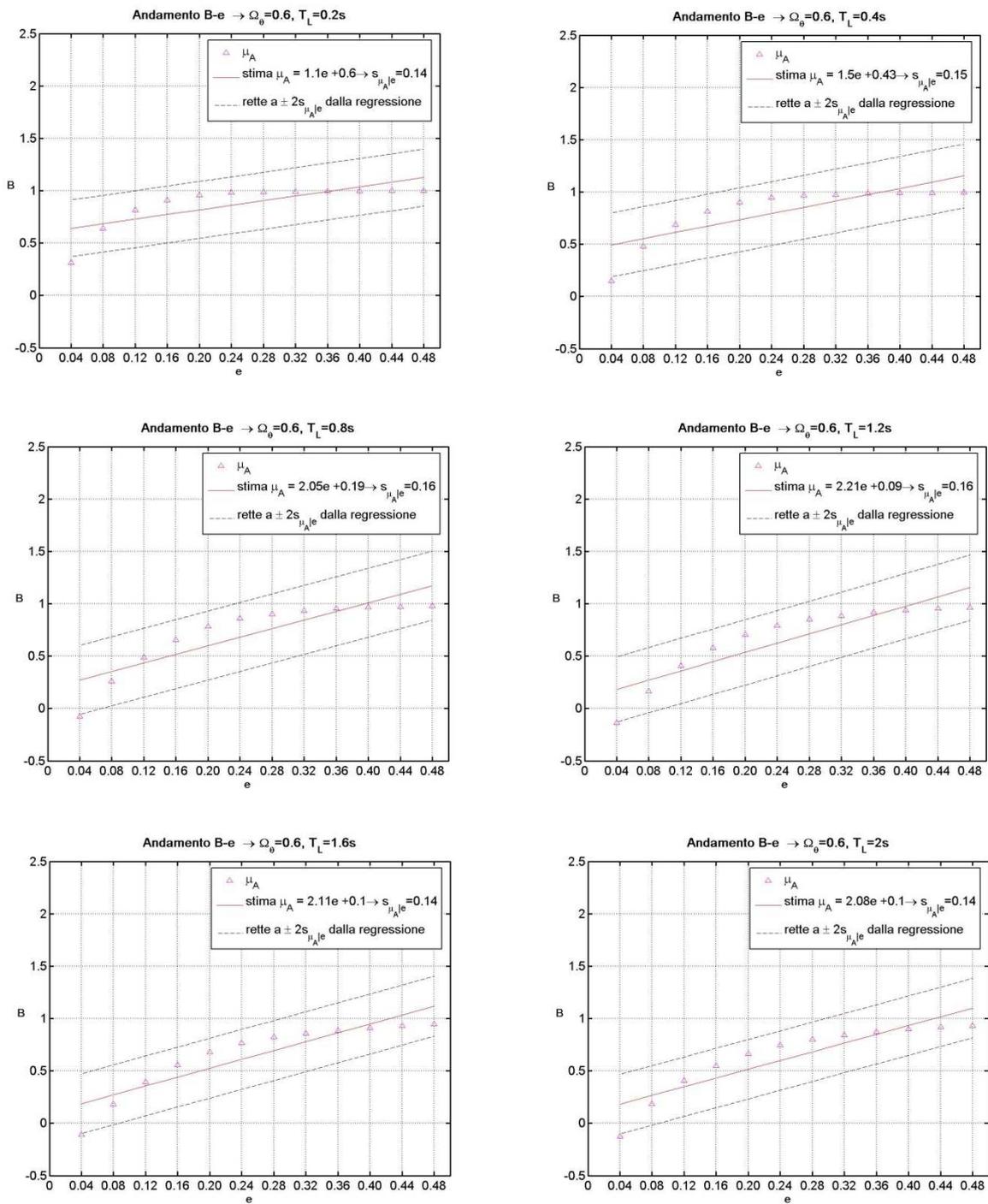


Fig. 4.5 Andamento del parametro B in funzione dell'eccentricità relativa per un valore di $\Omega_\theta = 0.6$ e per diversi valori di T_L .

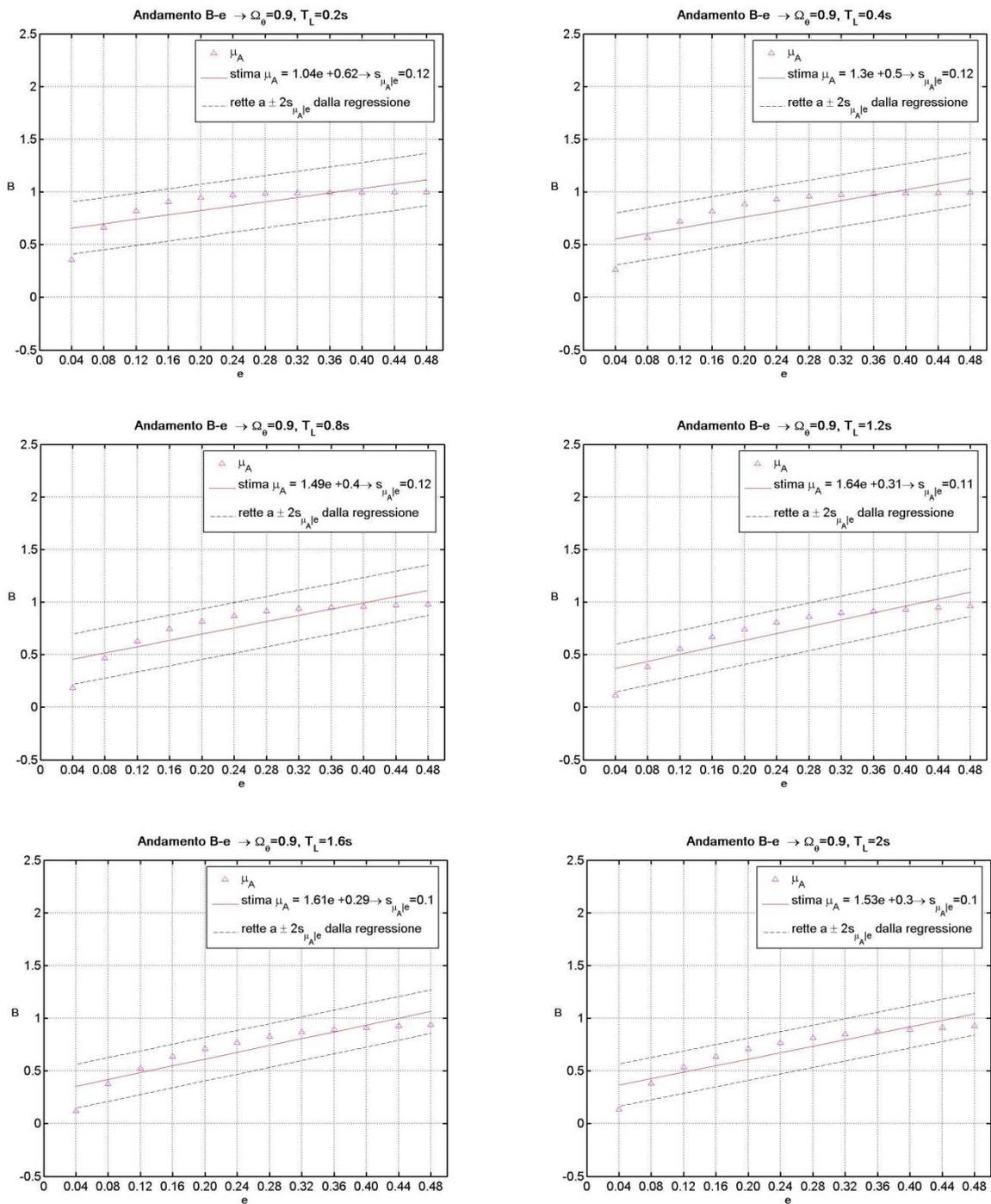


Fig. 4.6 Andamento del parametro B in funzione dell'eccentricità relativa per un valore di $\Omega_0=0.9$ e per diversi valori di T_L .

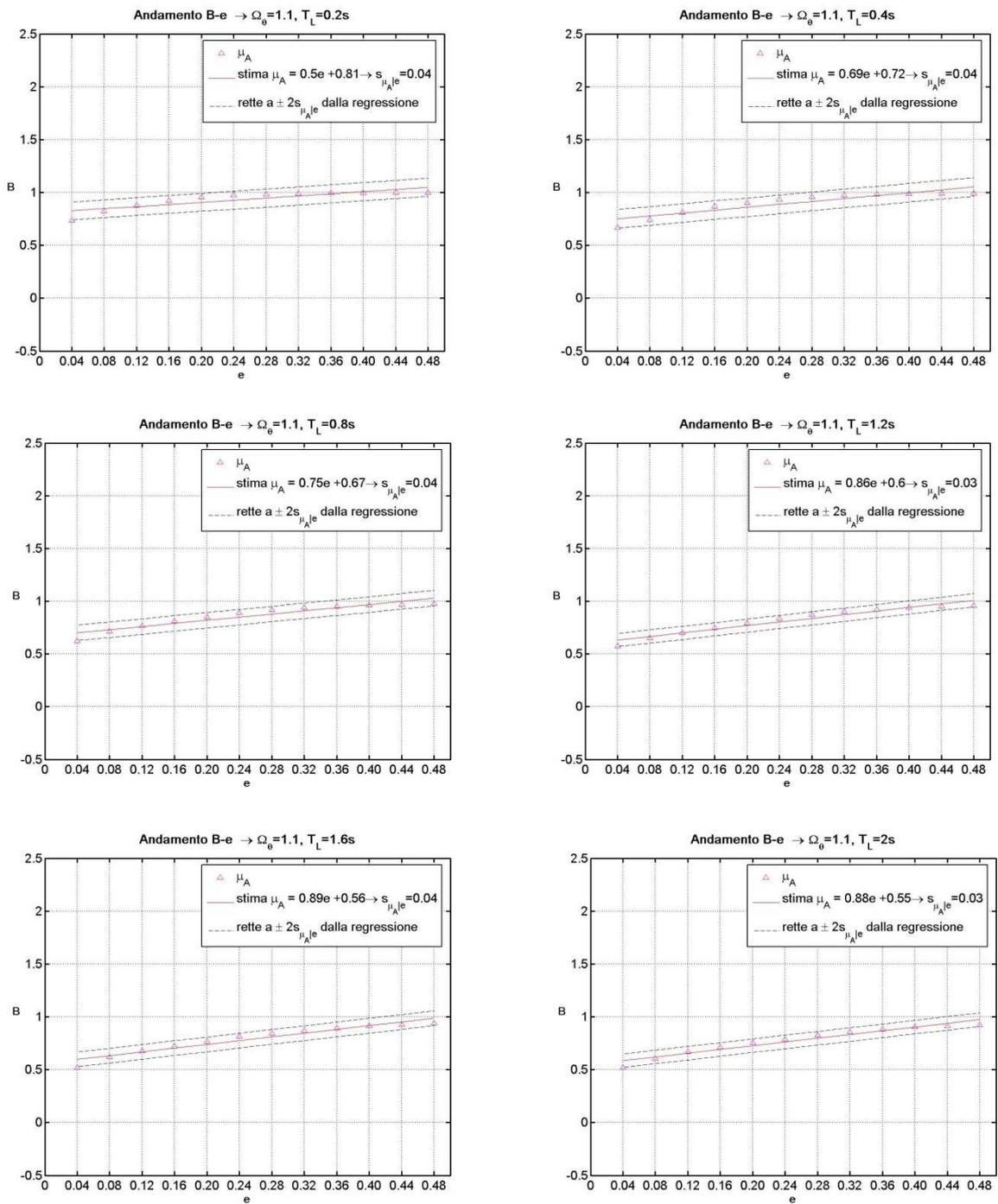


Fig. 4.7 Andamento del parametro B in funzione dell'eccentricità relativa per un valore di $\Omega_0=1.1$ e per diversi valori di T_L .

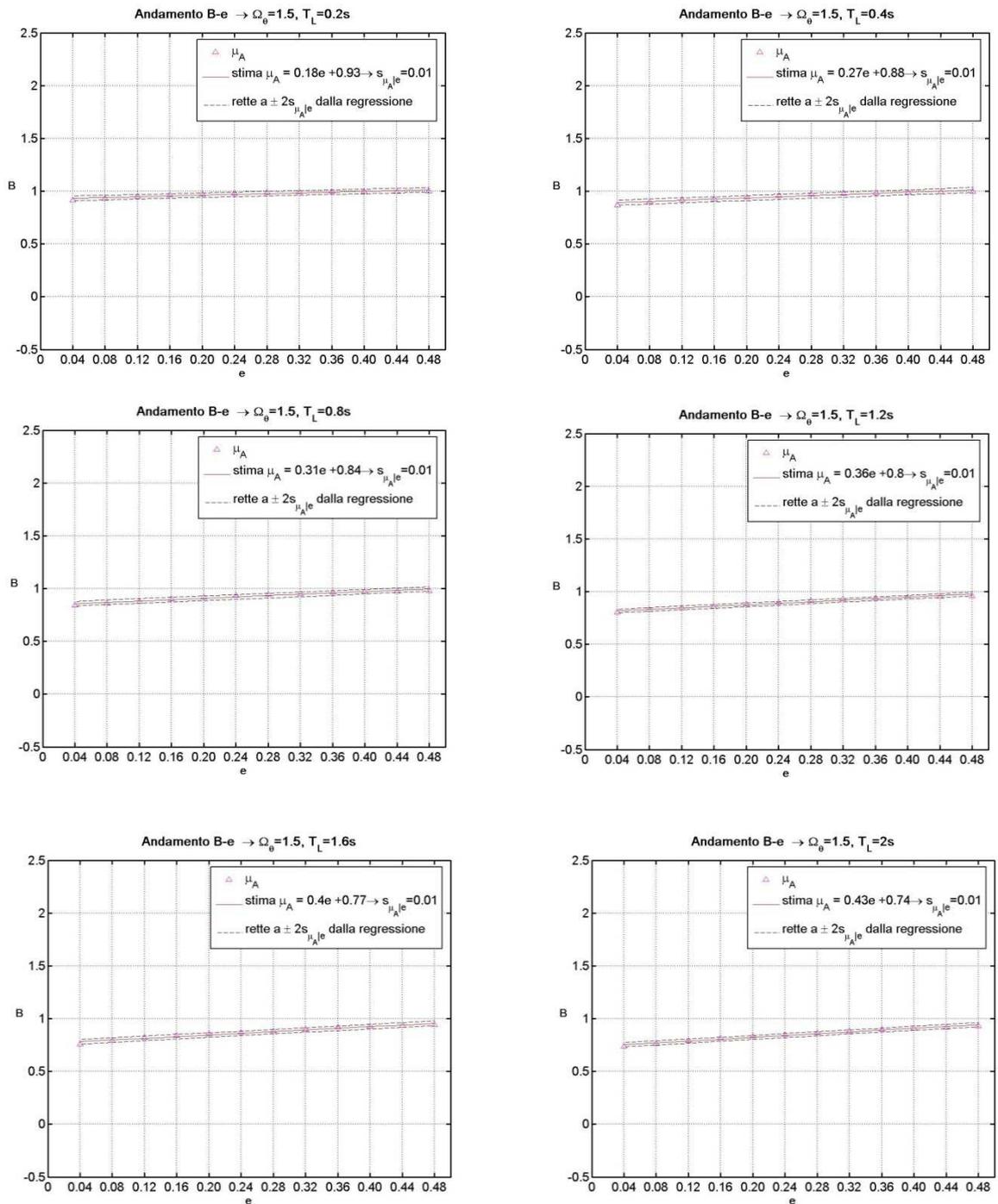


Fig. 4.8 Andamento del parametro B in funzione dell'eccentricità relativa per un valore di $\Omega_\theta=1.5$ e per diversi valori di T_L .

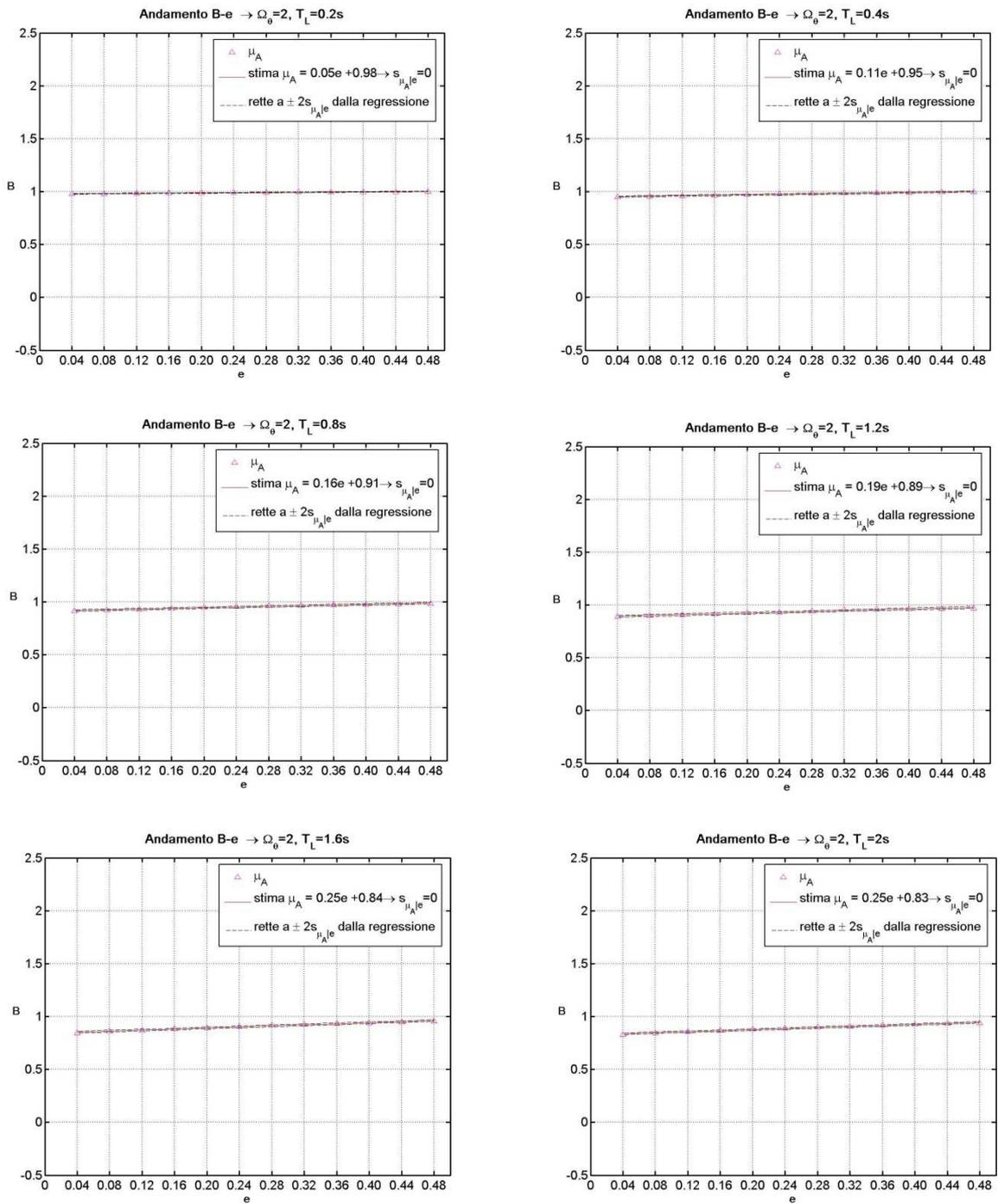


Fig. 4.9 Andamento del parametro B in funzione dell'eccentricità relativa per un valore di $\Omega_\theta=2$ e per diversi valori di T_L .

In precedenti lavori erano stati largamente studiati il coefficiente di contemporaneità ζ e il parametro B , in modo da semplificare la stima finale del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile della struttura ma allo stesso tempo di fornire una valutazione rigorosa. Questi studi sono stati condotti per la sola classe di strutture torsiorigide, in quanto valori di Ω_{ϑ} inferiori rappresentano strutture particolari, per cui è stato pensato che un'indagine sulla contemporaneità dei valori massimi delle risposte non è giustificata. Data la particolarità di queste strutture viene suggerito piuttosto di considerare direttamente la somma assoluta dei massimi, risultando comunque una valutazione a favore di sicurezza.

Da queste indagini si è giunti ad una valutazione semplificata del parametro B per le sole strutture torsioflessibili, in particolare:

- strutture con $T_L \leq 1.2s \rightarrow B = 0.9$;
- strutture con $T_L > 1.2s \rightarrow B = 0.75$.

Dai grafici Fig. 4.7,4.8,4.9, ottenuti sulla media di 1000 input sismici, si riscontrano questi andamenti, per cui è possibile considerare un valore costante di B , a seconda del periodo longitudinale della struttura, nella stima dello spostamento longitudinale del lato flessibile.

4.3 IL METODO ALPHA NELLA STIMA DEL MASSIMO SPOSTAMENTO LONGITUDINALE DELLA PARTE FLESSIBILE: PROPOSTA DI MODIFICA DEL METODO ALPHA

L'espressione (4.17) esprime lo spostamento massimo del sistema eccentrico in funzione del massimo spostamento del centro di massa, del parametro B relativo alla contemporaneità, del rapporto R tra $|u_{\vartheta}|_{max}$ e $|u_{yCM}|_{max}$ e del fattore di forma della struttura. È possibile, tramite le relazioni fin'ora determinate, giungere ad una formulazione semplificata di $|u_{yB}|_{max}$, che risulti funzione delle sole

caratteristiche del sistema e delle quantità relative al sistema equivalente non eccentrico. Il rapporto adimensionalizzato R tra la massima rotazione ed il massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse di strutture eccentriche in oscillazioni forzate, può essere ottenuto come un'aliquota del corrispondente rapporto in oscillazioni libere, che è funzione delle sole caratteristiche del sistema, attraverso il parametro A .

$$R = A \cdot \alpha_u \quad (0.20)$$

È possibile eliminare la dipendenza dalle quantità eccentriche del sistema sostituendo lo spostamento longitudinale massimo del sistema eccentrico con una combinazione di spostamenti di oscillatori semplici equivalenti attraverso il coefficiente δ . Con riferimento quindi alla (2.4) e alla (4.20), la (4.17) si modifica nell'espressione cercata per lo spostamento del lato flessibile:

$$|u_{yB}|_{max} = \delta \cdot |u_{yCM,3_sdof}|_{max} \cdot \left(1 + B \cdot A \cdot \alpha_u \cdot \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right) \quad (0.21)$$

Il massimo spostamento longitudinale della parte flessibile di una struttura eccentrica può essere quindi stimato grazie alla (4.21) attraverso le sole proprietà fisiche del sistema, ovvero:

- il parametro α_u (quindi l'eccentricità relativa e ed il parametro Ω_g);
- il periodo di vibrazione longitudinale T_L ;
- il fattore di forma Φ ;

Da queste grandezze, oltre a valutare i coefficienti correttivi, è possibile dedurre tramite gli spettri di risposta degli spostamenti per i sismi considerati, anche i valori degli spostamenti in prossimità dei periodi di vibrazione della struttura.

Analizzando la (4.21) è possibile inoltre osservare che lo spostamento massimo della struttura eccentrica è dato da tre contributi:

- gli spostamenti degli oscillatori semplici equivalenti;

- il rapporto δ , che racchiude il concetto del *fundamental period shifting*;
- il termine in parentesi che rappresenta il contributo della rotazione.

Dei tre contributi elencati ben due sono funzione dell'eccentricità, ovvero lo *shift* temporale e la rotazione del sistema; la possibilità di stabilire a priori lo spostamento longitudinale dovuto all'eccentricità a partire dalle sole caratteristiche del sistema permette di capire quali parametri sono i maggiori responsabili della risposta torsionale della struttura.

Per verificare la capacità predittiva del metodo è stato confrontato l'andamento dello spostamento longitudinale della parte flessibile valutato mediante la (4.3) e quello stimato attraverso i parametri del *METODO ALPHA* secondo la (4.21), al variare dell'eccentricità relativa per diversi valori delle grandezze Ω_θ e T_L . La stima attraverso la (4.21) avviene attraverso tre coefficienti ottenuti da considerazioni baricentriche su 1000 input sismici, ovvero il coefficiente correttivo δ e i due parametri del metodo A, B . Dai grafici si può osservare che:

- i due andamenti di $|u_{yB}|_{max}$ sono pressoché coincidenti sia nel caso di strutture torsiorigide che di quelle torsioflessibili per ogni valore di e, Ω_θ , in particolare per valori di $T_L < 0.8s$;
- lo spostamento $|u_{yB}|_{max}$ aumenta all'aumentare dell'eccentricità relativa e e del periodo longitudinale T_L ;
- lo spostamento $|u_{yB}|_{max}$ diminuisce all'aumentare del parametro Ω_θ ;
- lo spostamento $|u_{yB}|_{max}$ è sempre minore di 3 per le strutture torsioflessibili e di 2.5 per quelle torsiorigide.

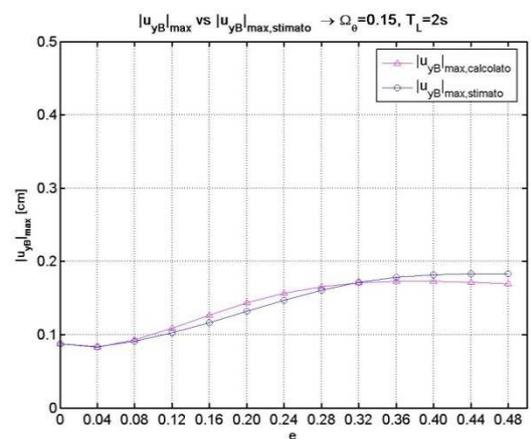
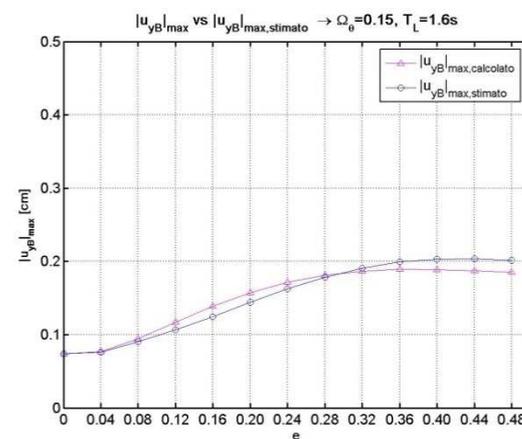
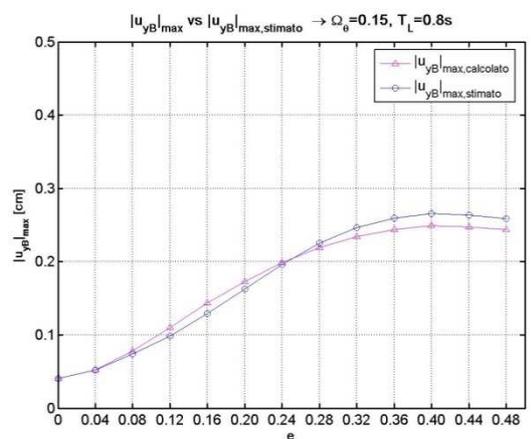
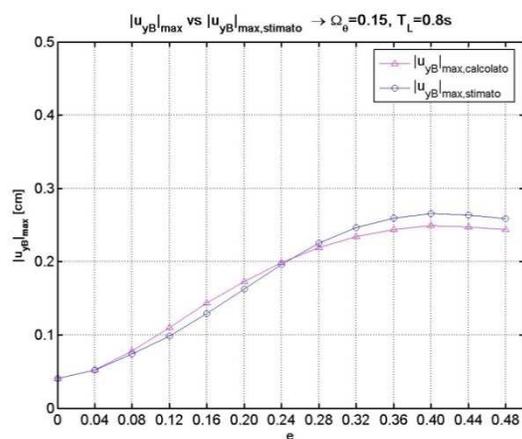
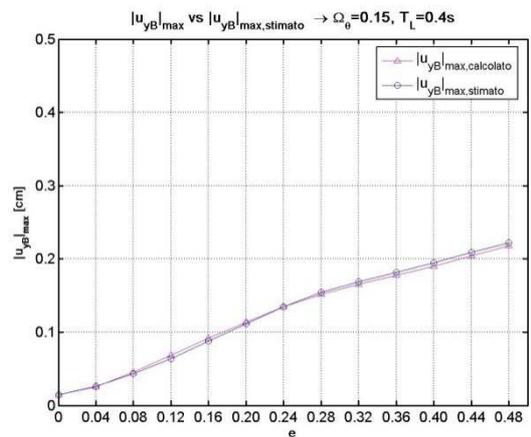
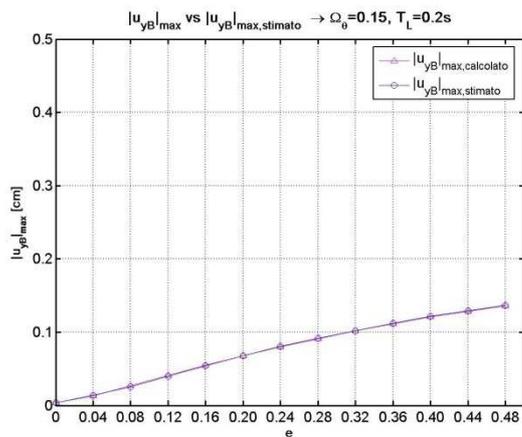


Fig. 4.10 Andamento con l'eccentricità relativa del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile valutato a partire dall'analisi cinematica e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_0=0.3$ al variare di T_L

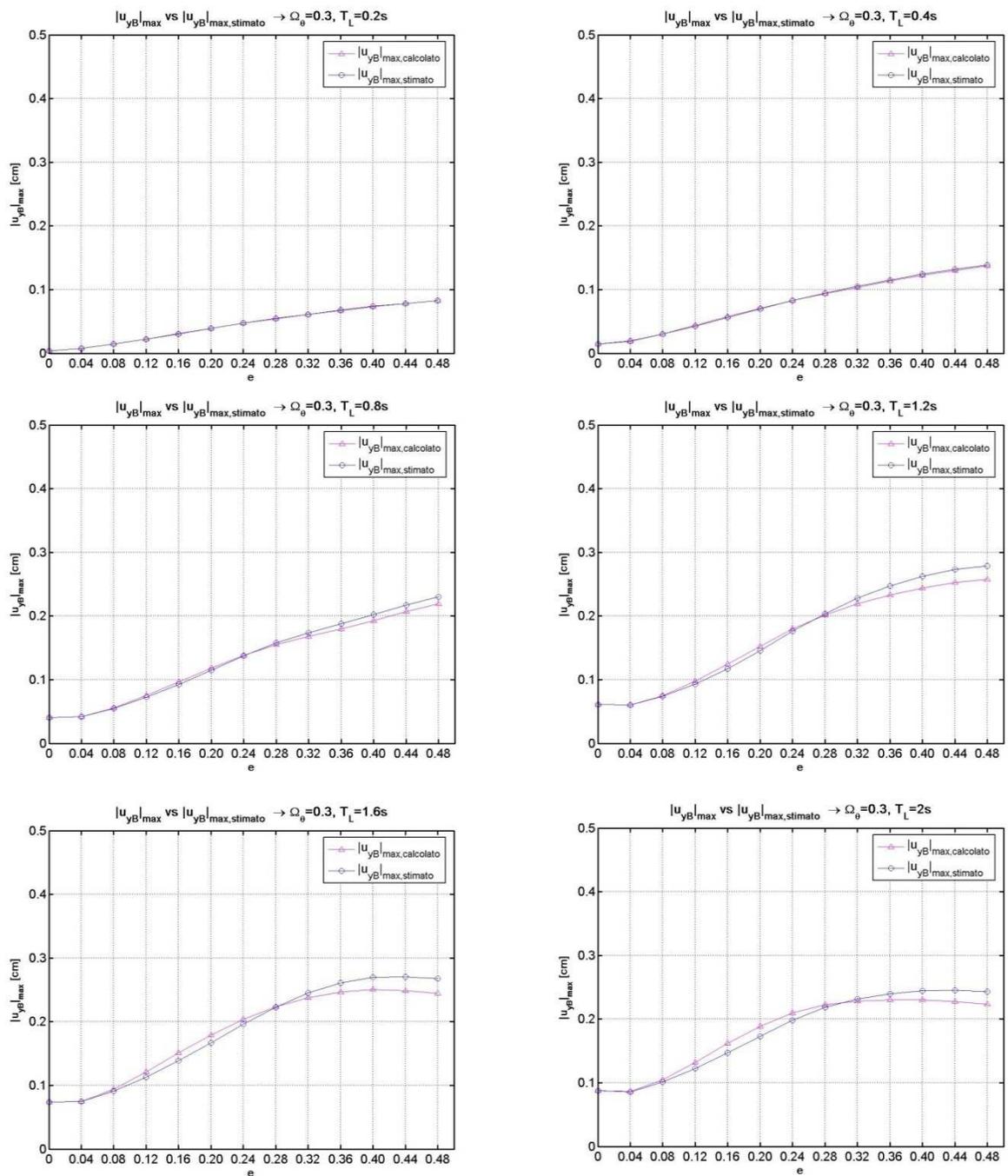


Fig. 4.11 Andamento con l'eccentricità relativa del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile valutato a partire dall'analisi cinematica e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=0.3$ al variare di T_L .

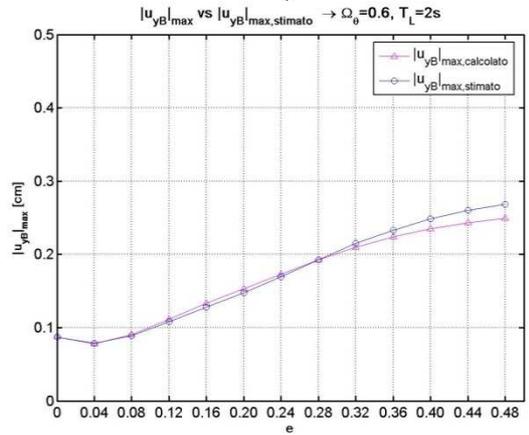
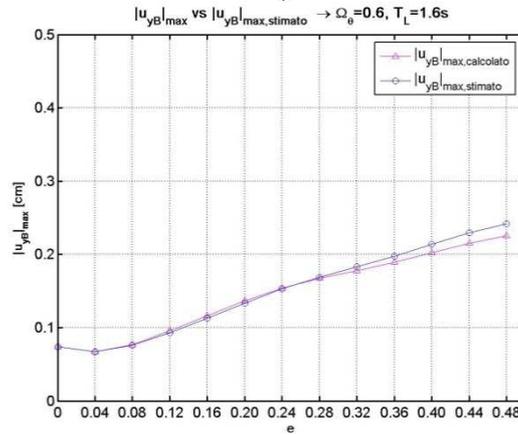
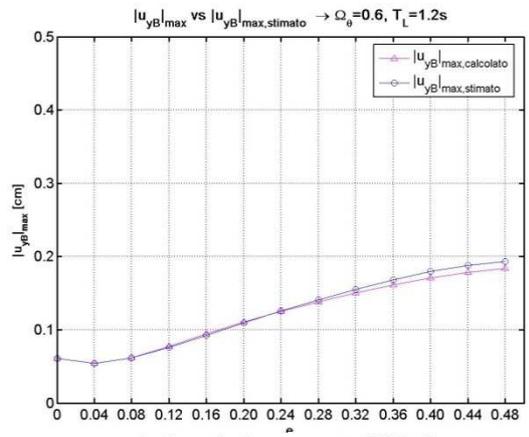
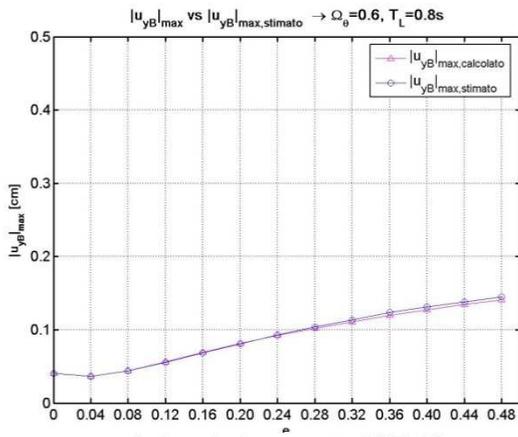
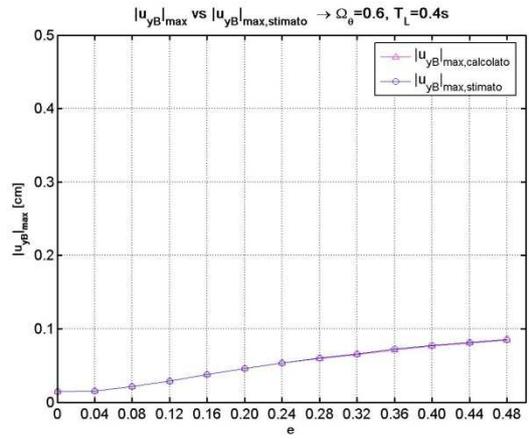
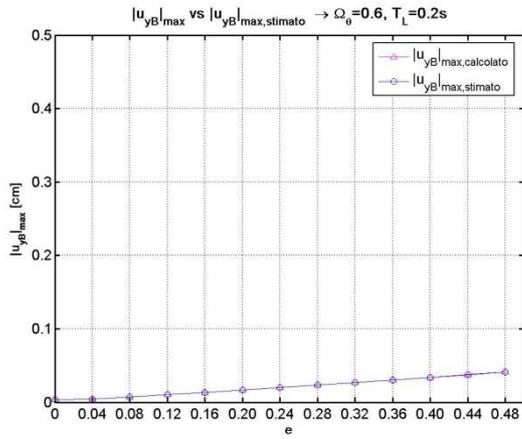


Fig. 4.12 Andamento con l'eccentricità relativa del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile valutato a partire dall'analisi cinematica e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=0.6$ al variare di T_L

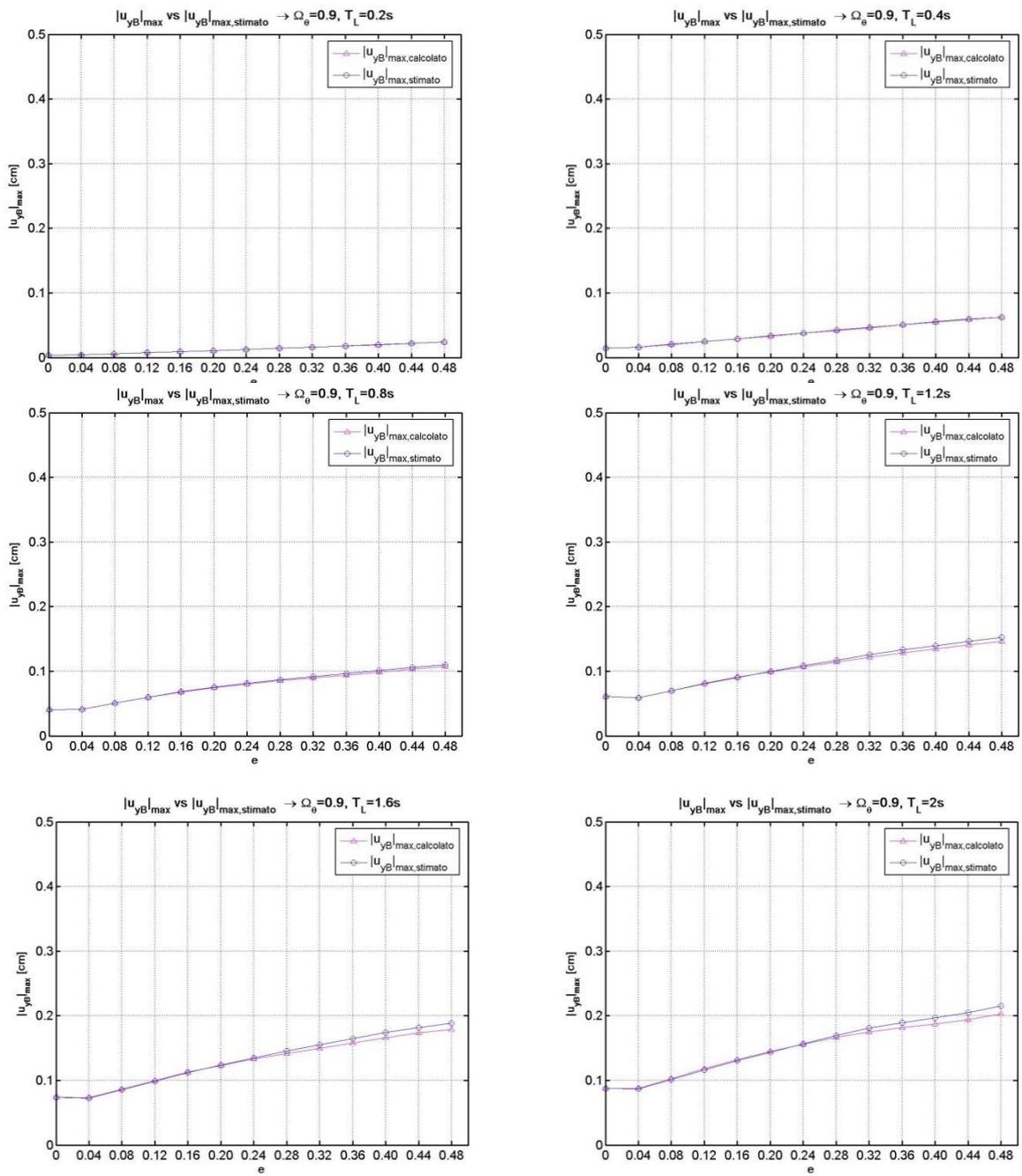


Fig. 4.13 Andamento con l'eccentricità relativa del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile valutato a partire dall'analisi cinematica e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=0.9$ al variare di T_L .

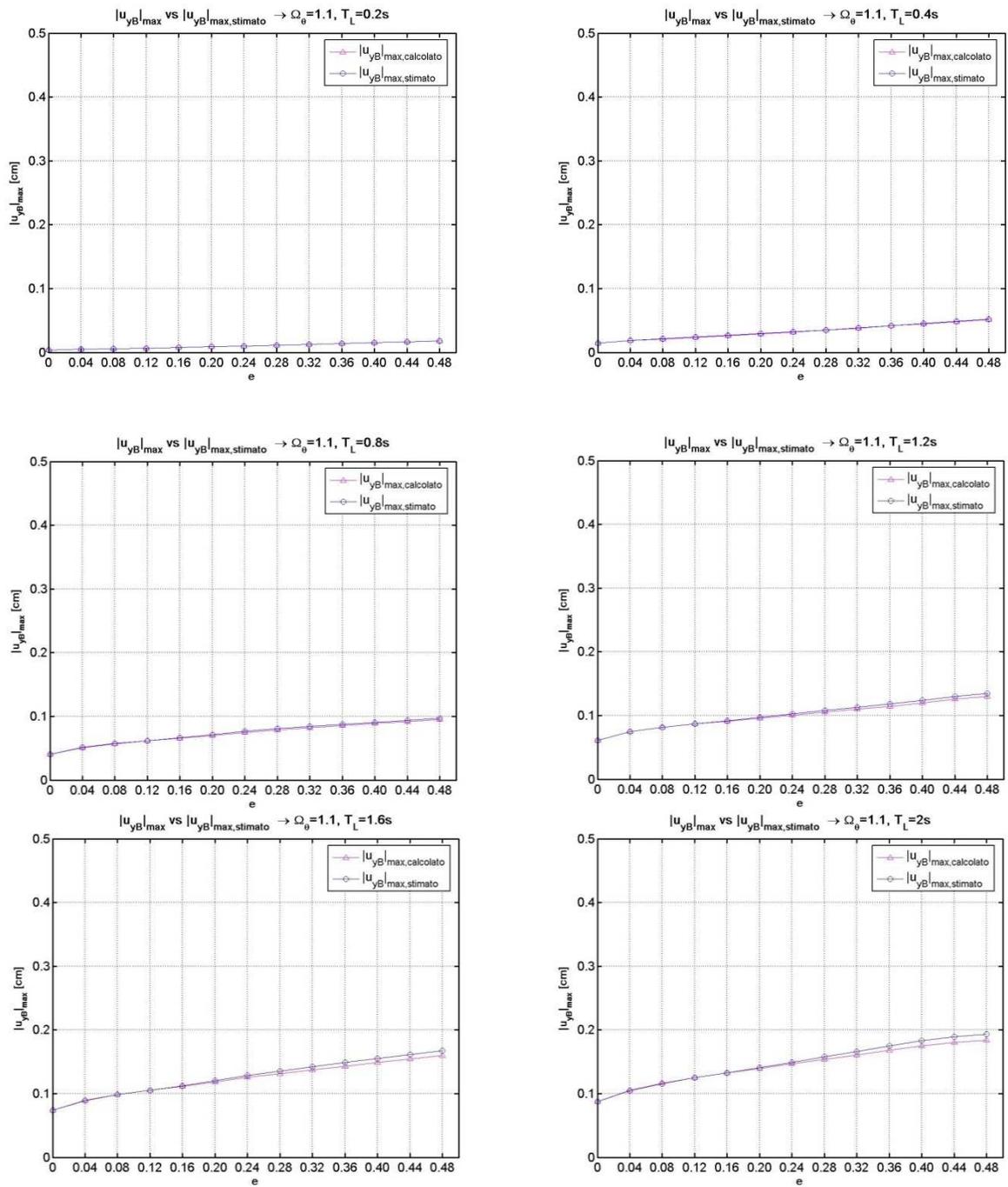


Fig. 4.14 Andamento con l'eccentricità relativa del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile valutato a partire dall'analisi cinematica e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=1.1$ al variare di T_L .

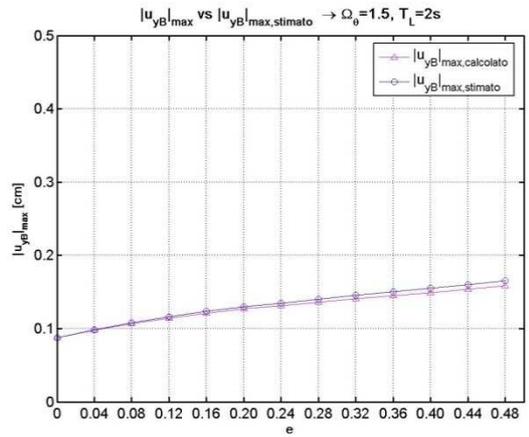
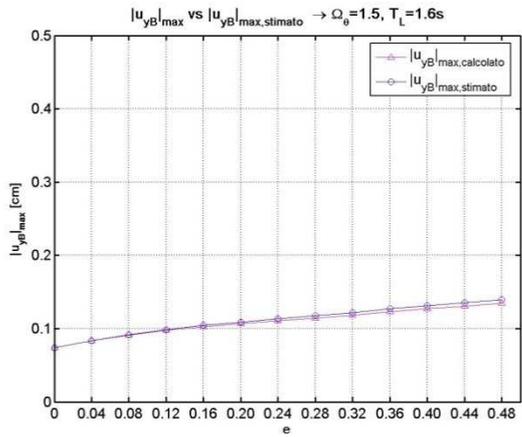
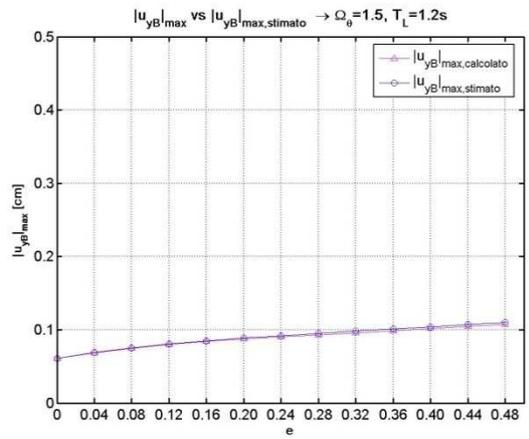
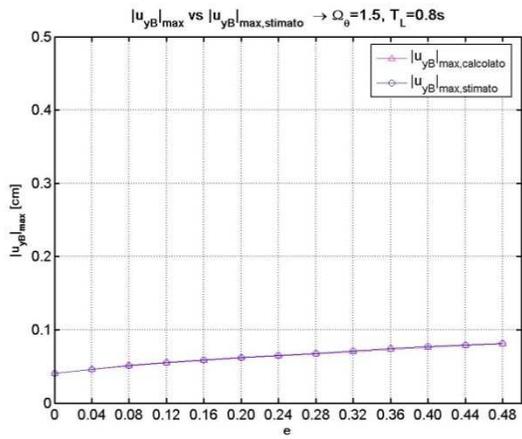
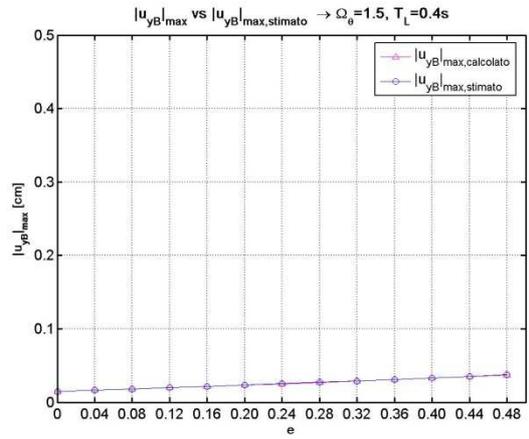
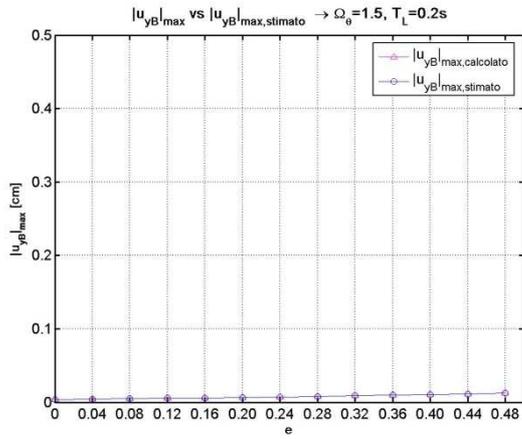


Fig. 4.15 Andamento con l'eccentricità relativa del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile valutato a partire dall'analisi cinematica e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_\theta=1.5$ al variare di T_L .

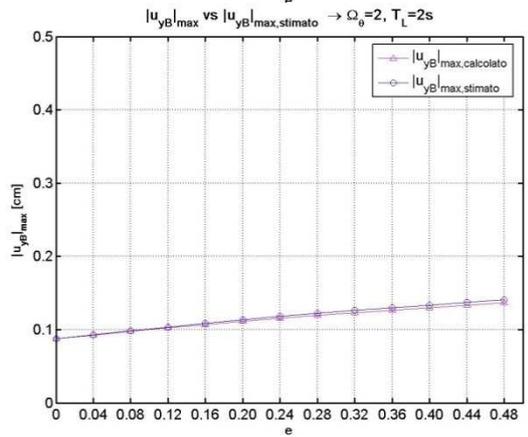
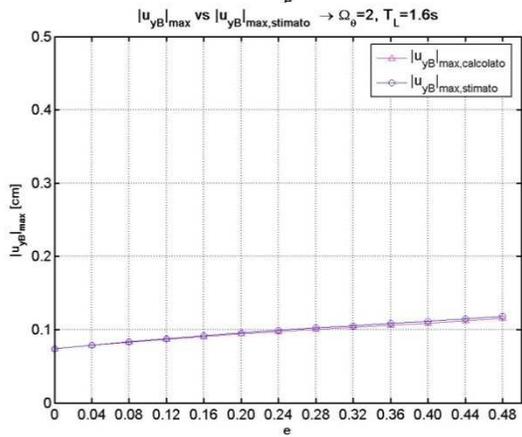
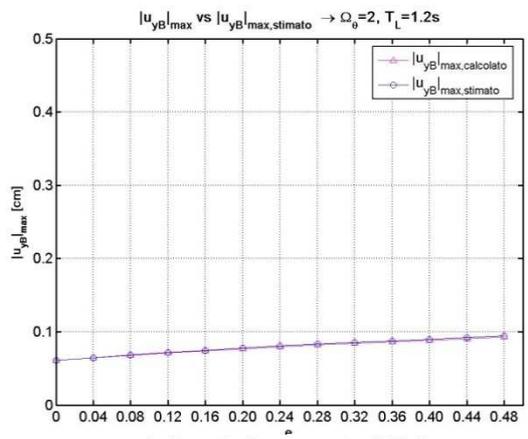
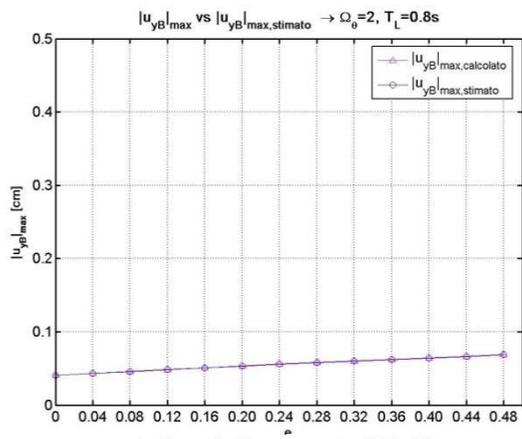
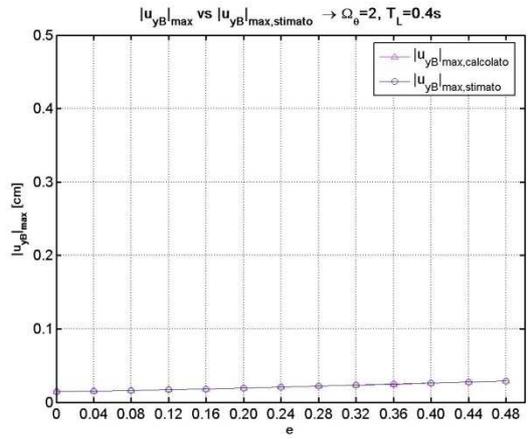
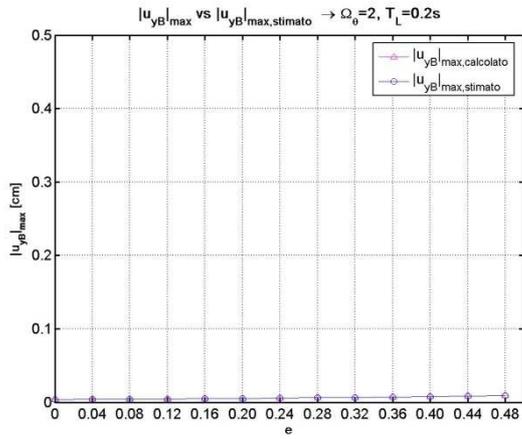


Fig. 4.16 Andamento con l'eccentricità relativa del massimo spostamento longitudinale della parte flessibile valutato a partire dall'analisi cinematica e attraverso il metodo alpha per un valore di $\Omega_0=2$ al variare di T_L .

In conclusione dalla (4.21) è possibile definire la quantità adimensionalizzata Δ_{flex} , che da una stima immediata dell'incremento di spostamento del lato flessibile rispetto al centro di massa, valutato come combinazione di tre oscillatori semplici:

$$\Delta_{flex} = \frac{|u_{yB}|_{max}}{|u_{yCM,3_sdof}|_{max}} \quad (4.22)$$

L'espressione esplicita per la (4.22) rappresenta l'ampliamento del *METODO ALPHA* per la stima dell'incremento di spostamento della parte flessibile di strutture eccentriche rispetto allo spostamento del centro di massa.

$$\Delta_{flex} = \delta \cdot \left(1 + B \cdot A \cdot \alpha_u \cdot \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right) \quad (4.23)$$

Dalla conoscenza di Δ_{flex} è possibile valutare lo spostamento del lato flessibile in modo semplice come:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM,3_sdof}|_{max} \cdot \Delta_{flex} \quad (4.24)$$

in cui il termine $|u_{yCM,3_sdof}|_{max}$ sarà valutato attraverso le (2.5), (2.6) a seconda che la struttura sia rispettivamente torsiorrigida o torsioflessibile.

4.4 VALUTAZIONE DEL RAPPORTO Δ_{flex}

Di seguito vengono riportate le curve di livello della grandezza Δ_{flex} al variare dell'eccentricità relative per diversi valori di Ω_θ e di T_L ; questa rappresentazione dei risultati è molto utile perché permette di valutare in modo immediato l'incremento di spostamento del lato flessibile rispetto allo spostamento al baricentro, note le grandezze che descrivono la struttura. I risultati sono stati ottenuti attraverso le quantità α_u, A, B, δ valutati sulla media di 1000 input sismici; come nelle analisi precedenti si omette il caso di $T_L = 2.5s$ per l'analogia con quello relativo a $T_L = 2s$.

4.4.1 Curve di livello per le strutture torsiorigide

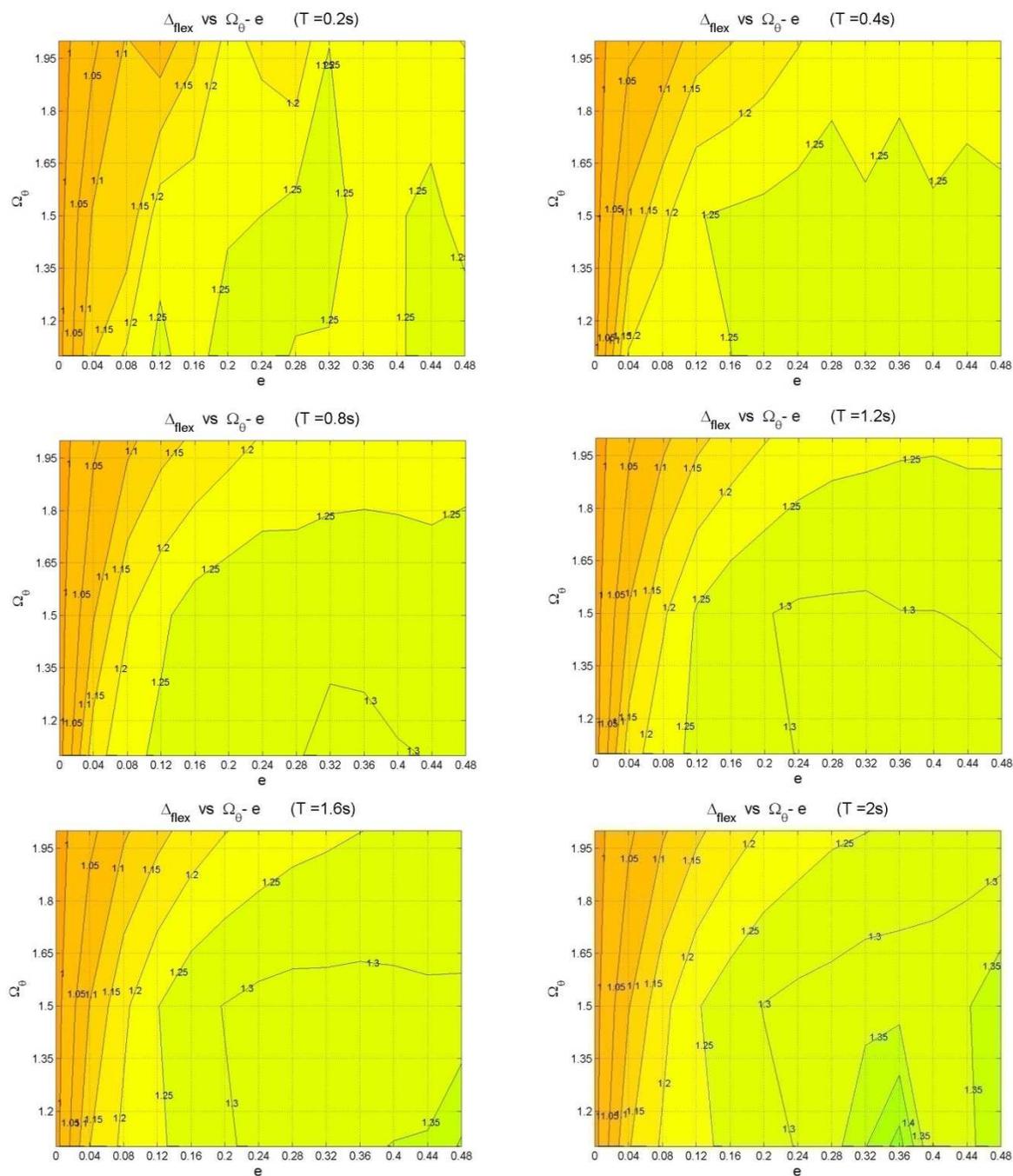


Fig. 4.17 Strutture torsiorigide: variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_θ del parametro Δ_{flex} per diversi valori di T_L .

Per le strutture torsiorigide si può concludere che:

- il rapporto Δ_{flex} è sempre compreso tra 1 e 1.4, per cui in queste strutture non c'è un rilevante incremento di spostamento tra il lato flessibile e il baricentro delle masse;
- il rapporto Δ_{flex} aumenta all'aumentare dell'eccentricità relativa e e del periodo longitudinale T_L ;
- il rapporto Δ_{flex} diminuisce all'aumentare di Ω_g ;
- nelle strutture torsiorigide sono comprese quelle a pilastri, che in generale sono caratterizzate da $0.9 < \Omega_g < 1.7$ e $0.05 < e < 0.1$; in questo ambito è possibile osservare che il rapporto Δ_{flex} assume valori compresi tra 1 e 1.2;
- con la vecchia formulazione del rapporto δ si registravano dei massimi dell'incremento di spostamento pari a 2, che equivale ad affermare che si potevano avere spostamenti del lato flessibile fino a due volte superiori di quelli del baricentro delle masse.

4.4.2 Curve di livello per le strutture torsioflessibili

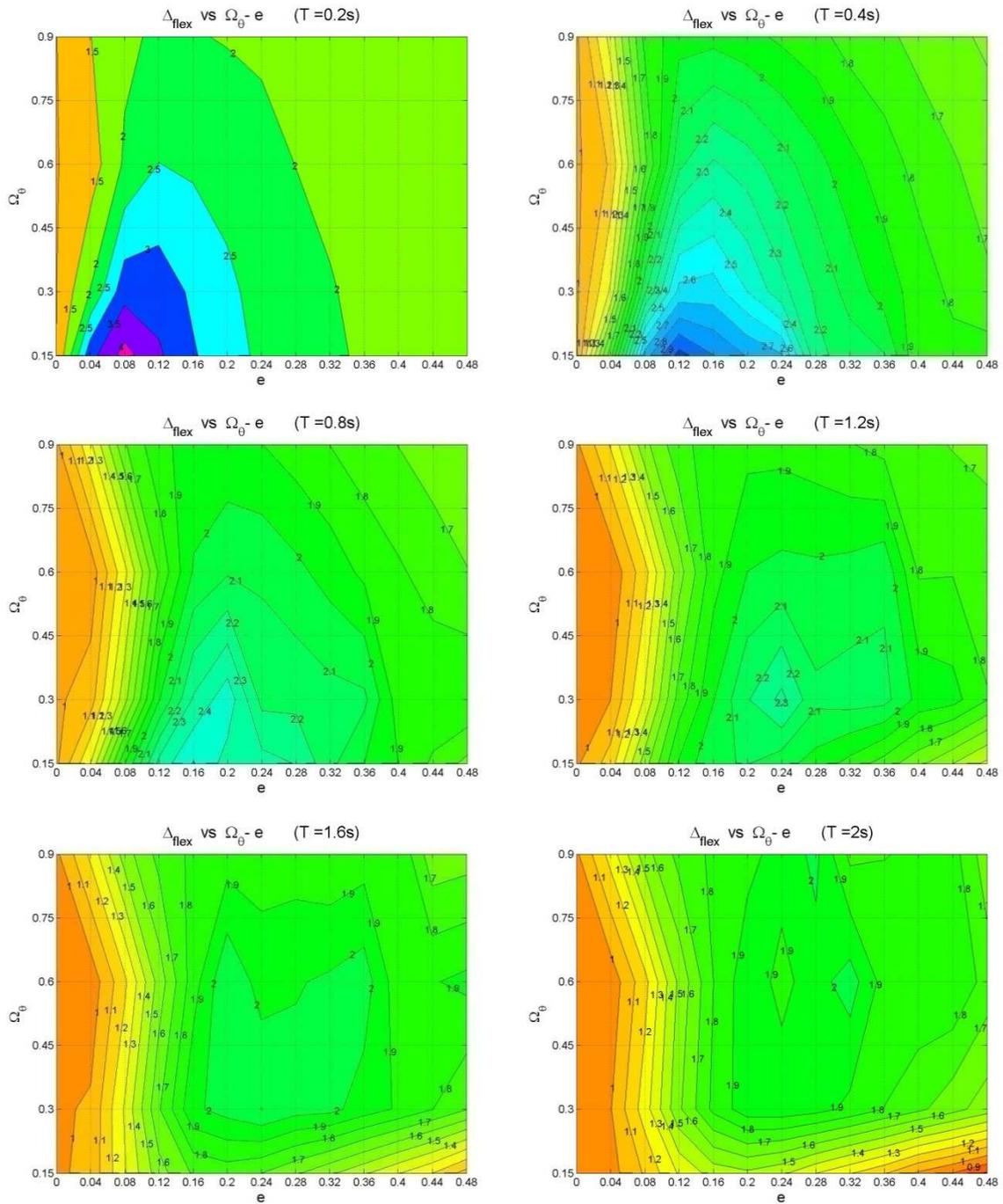


Fig. 4.18 Strutture torsioflessibili: variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_θ del parametro Δ_{flex} per diversi valori di T_L .

Per le strutture torsioflessibili si può concludere che:

- il rapporto Δ_{flex} è sempre compreso tra 0.7 e 4;
- per strutture con $T_L < 1s$, Δ_{flex} assume i valori massimi per eccentricità comprese tra 0.04 e 0.36 e valori di Ω_g bassi (strutture molto torsioflessibili $\rightarrow 0.15 < \Omega_g < 0.6$);
- per strutture con $T_L > 1s$, Δ_{flex} assume i valori massimi per eccentricità comprese tra 0.2 e 0.36 e valori di Ω_g bassi (strutture molto torsioflessibili $\rightarrow 0.3 < \Omega_g < 0.6$);
- nel caso di strutture molto torsioflessibili e $T_L < 1.6s$, Δ_{flex} è sostanzialmente funzione della sola eccentricità;
- le strutture che possono sviluppare i maggiori incrementi di spostamento del lato flessibile sono quelle molto torsioflessibili e rigide;
- strutture fortemente torsioflessibili ma non eccentriche, alle quali si applica un'eccentricità accidentale del 5%, possono avere, per periodi longitudinali bassi, incrementi superiori al 200%;
- con la nuova formulazione del rapporto δ , si ottengono dei risultati molto incoraggianti per queste strutture; analisi numeriche svolte con la classica espressione forniscono incrementi massimi di spostamento $\Delta_{flex} = 19$.

4.4.3 Curve di livello per le strutture a ridotta eccentricità

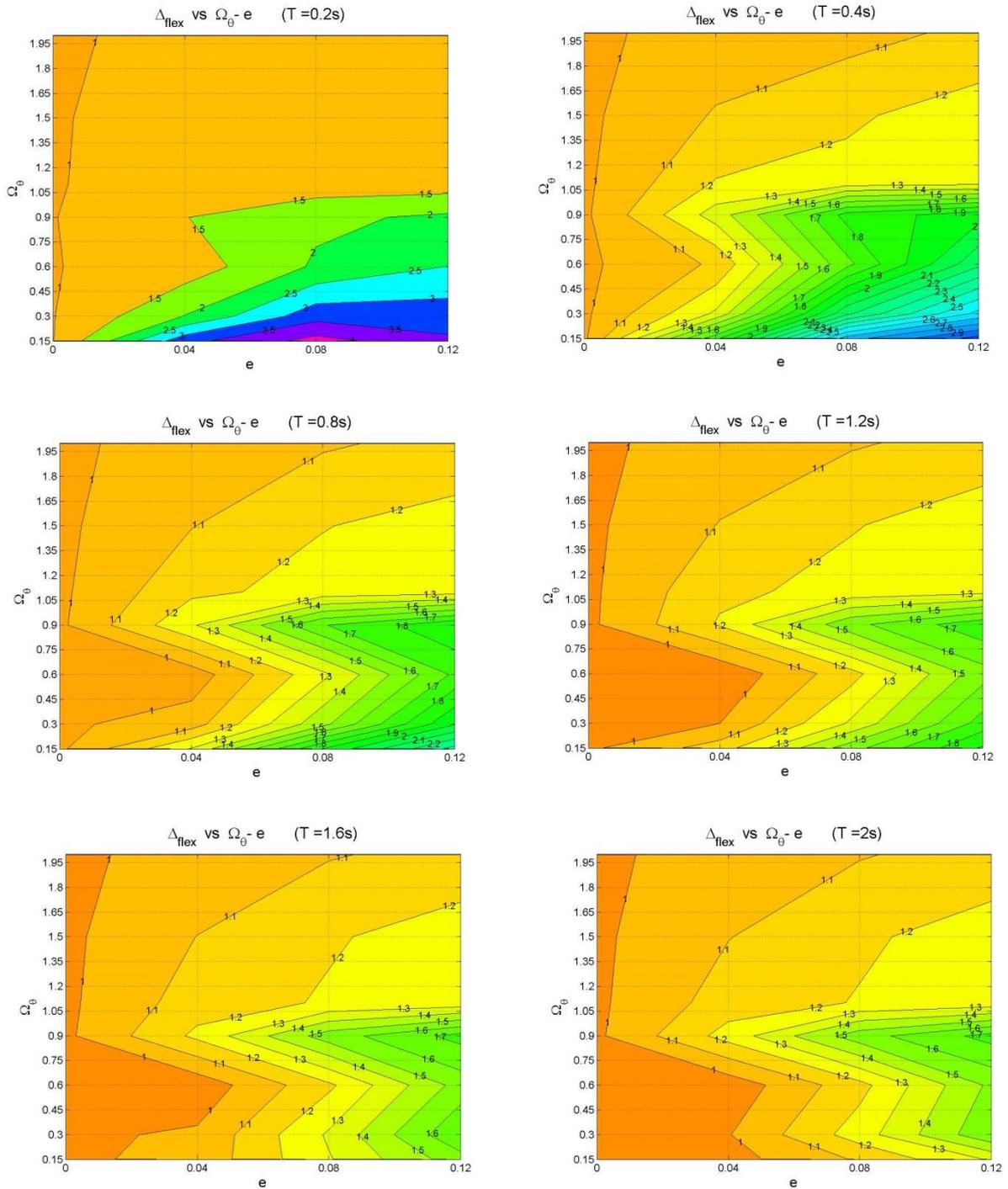


Fig. 4.19 Strutture a ridotta eccentricità: variazione con l'eccentricità relativa e con Ω_θ del parametro Δ_{flex} per diversi valori di T_L .

Per le strutture a ridotta eccentricità si può concludere che:

- il rapporto Δ_{flex} è sempre compreso tra 1 e 4;
- il rapporto Δ_{flex} aumenta sensibilmente con l'eccentricità, in particolare per periodi inferiori a 0.8s;
- per il valore di eccentricità accidentale imposto dalla normativa e strutture non molto rigide ($T_L > 0.4s$), Δ_{flex} oscilla tra 1.1 e 1.3;
- per strutture molto rigide si verificano i massimi di incremento di spostamento;
- le strutture torsorigide ($\Omega_\theta > 1$) non sviluppano mai incrementi superiori al 30% se l'eccentricità è minore o uguale al 5%, per cui strutture simmetriche torsorigide in ogni caso hanno Δ_{flex} contenuti;
- per queste strutture si ha un abbattimento del Δ_{flex} minore rispetto ai casi generali analizzati in precedenza; in particolare il valore massimo registrato passa da 6 con la classica espressione a 4.

4.4.4 Curve di livello globali

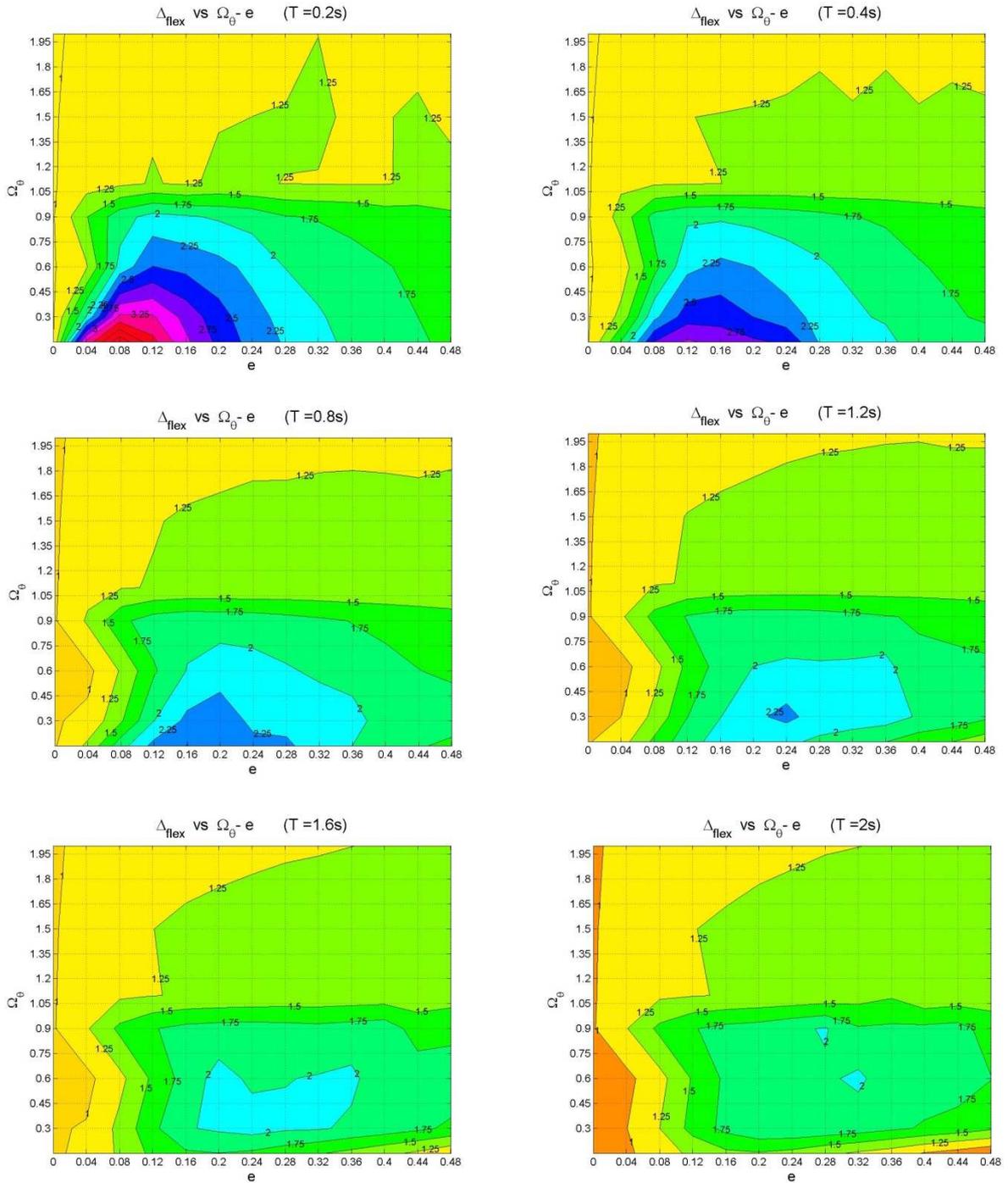


Fig. 4.20 Grafici globali: variazione con l'eccentricità relativa e e con Ω_0 del parametro Δ_{flex} per diversi valori di T_L .

Il rapporto Δ_{flex} rappresenta l'incremento di spostamento del lato più distante dal baricentro delle rigidità, quindi soggetto allo spostamento maggiore, rispetto allo spostamento del centro di massa valutato mediante la composizione di tre oscillatori semplici equivalenti. Nel caso di $\Delta_{flex} = 2$ si ha ad esempio che $|u_{yB}|_{max}$ è doppio rispetto a $|u_{yCM,3_s dof}|_{max}$, che si può considerare coincidente con $|u_{yCM}|_{max}$ del sistema a tre gradi di libertà. L'aumento dello spostamento non deve essere attribuito completamente alla rotazione che subisce il sistema in quanto eccentrico, ma come già discusso nel paragrafo 1.7, lo spostamento del lato flessibile è somma di due contributi, la rotazione e lo spostamento longitudinale del centro di massa. In particolare quest'ultimo si è dimostrato essere più influente della rotazione, soprattutto per le strutture torsioflessibili.

4.5 IMPORTANZA DELLA ROTAZIONE E DELLO SPOSTAMENTO LONGITUDINALE DEL BARICENTRO DELLE MASSE NELLO SPOSTAMENTO LONGITUDINALE DELLA PARTE FLESSIBILE

L'espressione (4.15) suggerisce che lo spostamento longitudinale massimo della parte flessibile è dato dalla somma di due contributi, ovvero lo spostamento longitudinale del baricentro delle masse e la rotazione. La rotazione massima del sistema può essere espressa in funzione dello spostamento longitudinale massimo attraverso il rapporto R , come indicato dalla (3.4), per cui la (4.15) diventa:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM}|_{max} + B|u_{yCM}|_{max} \cdot \frac{R}{\rho_m} \cdot \frac{L}{2} \quad (0.25)$$

Mediante la (3.8) è possibile inoltre esprimere R in funzione di A e di α_u , per cui la (4.25) può essere infine espressa come:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM}|_{max} \left(1 + B \cdot A \cdot \frac{\alpha_u}{\rho_m} \cdot \frac{L}{2} \right) \quad (0.26)$$

Come già visto per gli altri parametri è possibile togliere la dipendenza dalle dimensioni in pianta dell'edificio, tramite semplici passaggi matematici si ha infatti:

$$\frac{L}{2 \cdot \rho_m} = \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \quad (0.27)$$

Per cui la (4.26) diventa:

$$|u_{yB}|_{max} = |u_{yCM}|_{max} \left(1 + B \cdot A \cdot \alpha_u \cdot \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right) \quad (0.28)$$

Per indagare la reciproca importanza dei due contributi nella determinazione dello spostamento longitudinale massimo della parte flessibile, viene definito il rapporto r tra lo spostamento longitudinale massimo del baricentro delle masse e lo spostamento totale dato dai entrambi i contributi:

$$r = \frac{|u_{yCM}|_{max}}{|u_{yCM}|_{max} \left(1 + B \cdot A \cdot \alpha_u \cdot \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right)} \quad (0.29)$$

Se $r \rightarrow 1$ lo spostamento della parte flessibile è dovuto principalmente allo spostamento longitudinale del baricentro delle masse, se $r \rightarrow 0.5$ è dovuto per metà alla rotazione e per metà allo spostamento longitudinale del baricentro delle masse, infine se $r \rightarrow 1$ i due contributi partecipano allo stesso modo allo spostamento finale.

Di seguito vengono riportati i grafici del rapporto r al variare dell'eccentricità relativa e , al variare del rapporto Ω_9 e del periodo longitudinale T_L tramite rappresentazione a curve di livello.

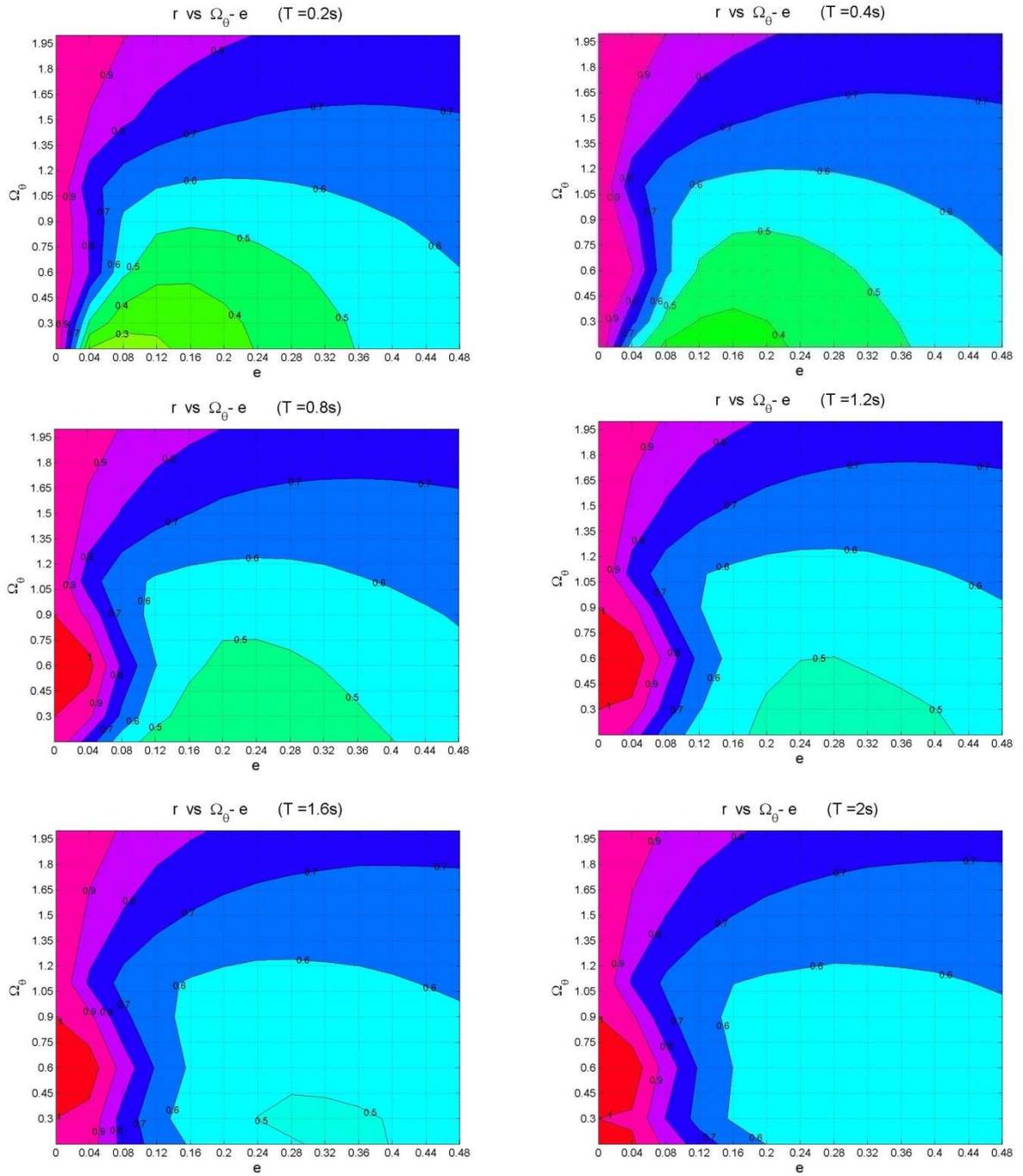


Fig. 4.21 Variazione con l'eccentricità e con Ω_0 del rapporto r per diversi valori di T_L .

Da un' analisi dei grafici è possibile notare che l'influenza della rotazione nella determinazione dello spostamento longitudinale della parte flessibile è trascurabile per eccentricità prossime allo zero e per ogni valore di eccentricità relativa quando il parametro Ω_θ è maggiore di uno. Per le strutture torsioflessibili e con eccentricità elevate si riscontra il massimo contributo della rotazione, che comunque non supera mai quello dello spostamento longitudinale del baricentro delle masse per $T_L > 0.4s$.

Il contributo dello spostamento longitudinale aumenta all'aumentare del periodo longitudinale, quindi per strutture meno rigide.

Infine è possibile concludere che nelle strutture torsioflessibili poco eccentriche il contributo dello spostamento longitudinale è determinante nello spostamento della parte flessibile per periodi di vibrazione $T_L > 0.4s$, un po' meno per eccentricità elevate e $T_L \leq 0.4s$. Nelle strutture torsiorigide lo spostamento longitudinale partecipa allo spostamento della parte flessibile sempre per più del 60% ed è nettamente predominante per eccentricità basse (minori dell'8%).

CAPITOLO 5

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio della risposta sismica torsionale di edifici irregolari in pianta è stato condotto con il fine di ottenere un semplice strumento predittivo della massima rotazione, del massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse e di quello del lato flessibile (*flexible side*), in ambito elastico-lineare.

Il metodo proposto permette di individuare gli spostamenti massimi di una struttura a partire dalla conoscenza di grandezze del tutto generali: l'eccentricità relativa e , il rapporto Ω_θ tra il raggio d'inerzia delle rigidezze e il raggio d'inerzia delle masse ed il periodo di vibrazione longitudinale T_L .

È stata inoltre studiata la variazione dei parametri e delle grandezze del metodo per un range ampio delle caratteristiche geometriche della struttura, in particolare sono state analizzate nel dettaglio le strutture torsioflessibili e per queste è stata formulata una proposta di modifica del metodo alpha per la stima del massimo spostamento del lato flessibile.

È stato indagato nel dettaglio come la risposta rotazionale e quella traslazionale influenzano lo spostamento finale del lato flessibile, giungendo alla conclusione che lo spostamento longitudinale del baricentro delle masse riveste un ruolo primario nella risposta finale e che questo aspetto è molto più marcato nel caso di strutture torsioflessibili.

5.1 LE ANALISI NUMERICHE CONDOTTE

A seguito dell'identificazione dei parametri strutturali che influiscono sulla soluzione dell'equazione del moto, sono stati individuati 637 diversi casi

strutturali che scaturiscono appunto dalla variazione delle grandezze fondamentali che caratterizzano il sistema:

- l'eccentricità relativa e che è stata fatta variare nell'intervallo $[0.00 \div 0.48]$ con passo di 0.04 per un totale di 13 valori;
- il rapporto Ω_ϑ tra il raggio d'inerzia delle rigidezze e quello delle masse, che assume 7 valori diversi: 0.15, 0.3, 0.6, 0.9, 1.1, 1.5, 2;
- il periodo di vibrazione longitudinale T_L , che assume 7 valori diversi: 0.2s, 0.4s, 0.8s, 1.2s, 1.6s, 2.0s, 2.5s.

Sono stati poi selezionati 1000 record sismici in base alla distanza dall'epicentro, alla classe di sottosuolo suolo e all'accelerazione massima al suolo, riportati in dettaglio nell'appendice.

Per i sistemi con queste caratteristiche e per gli input scelti è stato effettuato un totale di 637000 simulazioni numeriche, al fine di valutare la massima rotazione, il massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse e il valore massimo dello spostamento longitudinale della parte flessibile mediante risoluzione diretta delle equazioni del moto. Le analisi hanno poi permesso di valutare il rapporto tra il massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse e la combinazione di tre oscillatori semplici in corrispondenza dei periodi di vibrazione delle struttura e i due parametri adimensionali del modello, ovvero il rapporto tra la massima rotazione ed il massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse e il coefficiente di contemporaneità:

$$\delta = \frac{|u_{y,CM}|_{max}}{\sqrt{(Sd(T_1) \cdot MCF_1)^2 + (Sd(T_2) \cdot MCF_2)^2 + (Sd(T_3) \cdot MCF_3)^2}} \quad (5.1)$$

$$A = \frac{1}{\alpha_u} \frac{|u_\vartheta|_{max}}{|u_{yCM}|_{max}} \quad (5.2)$$

$$B = \frac{|u_{yB}|_{max} - |u_{yCM}|_{max}}{|u_{\theta}|_{max} \cdot \frac{L}{2}} \quad (5.3)$$

I coefficienti adimensionali hanno rispettivamente il significato di:

- coefficiente correttivo per la stima del massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse a partire da una combinazione equivalente dei tre oscillatori semplici in corrispondenza dei periodi di vibrazione della struttura;
- coefficiente correttivo per la stima del rapporto R a partire dall'equivalente in oscillazioni libere α_u ;
- coefficiente di contemporaneità dei valori massimi delle risposte del baricentro delle masse.

Infine sono stati confrontati i valori della rotazione massima e dello spostamento massimo della parte flessibile valutati mediante integrazione diretta delle equazioni del moto e attraverso il *METODO ALPHA* e i risultati ottenuti risultano decisamente incoraggianti.

5.2 RISULTATI OTTENUTI

I due parametri del metodo sono stati valutati per ogni caso strutturale e per ogni input sismico. Per ogni struttura sono stati poi valutati i valori medi dei coefficienti δ, A e B a partire dai valori dei 1000 input sismici considerati nelle analisi. Successivamente è stata considerata una rappresentazione dei coefficienti in funzione dell'eccentricità relativa per ogni valore di Ω_{θ}, T_L e sono state eseguite delle analisi di regressione che hanno permesso di individuare la retta di regressione lineare valutata tramite il metodo dei minimi quadrati (LSF) e l'errore standard associato. Si sono quindi ottenute delle stime baricentriche dei tre coefficienti in funzione dell'eccentricità relativa e sono stati individuati degli andamenti caratteristici e in alcuni casi degli andamenti costanti di tali coefficienti, ottenendo in questo modo delle utili semplificazioni.

In seguito questi coefficienti sono stati applicati nella stima della massima rotazione, del massimo spostamento longitudinale del baricentro delle masse e del massimo spostamento della parte flessibile, nonché nella stima dell'incremento di spostamento della parte flessibile della struttura:

$$\Delta_{flex} = \frac{|u_{yB}|_{max}}{|u_{y,CM,3sdof}|_{max}} = \delta \cdot \left(1 + B \cdot A \cdot \alpha_u \cdot \sqrt{\frac{3\Phi^2}{\Phi^2 + 1}} \right) \quad (5.4)$$

In generale per quanto riguarda il Δ_{flex} si può affermare che:

- i parametri che ne governano maggiormente l'andamento sono: l'eccentricità relativa e , il rapporto Ω_g tra il raggio d'inerzia delle rigidezze ed il raggio d'inerzia delle masse, il periodo di vibrazione longitudinale T_L ;
- strutture torsiorigide ($\Omega_g > 1$) non sviluppano mai incrementi superiori al 15% se l'eccentricità è minore o uguale al 5%. Questo implica che strutture simmetriche torsiorigide in ogni caso avranno Δ_{flex} contenuti;
- strutture a pilastri usuali (eccentricità comprese tra il 5% e il 10%) hanno Δ_{flex} compreso tra 1 e 1.2.
- le strutture fortemente torsioflessibili ($\Omega_g < 0.3$) sono quelle che sviluppano valori maggiori di Δ_{flex} che per eccentricità dell'ordine dell'8% e periodi bassi può arrivare a 4;
- considerando strutture non eccentriche alle quali va però associata un'eccentricità accidentale pari al 5%, Δ_{flex} è sempre minore di 4 per periodi molto bassi, mentre è sempre minore di 1.8 e indipendente dal periodo e da Ω_g per periodi $T_L \geq 0.8s$;
- l'ipotesi proposta per il coefficiente δ , che ha il vantaggio di dare a questo parametro sia caratteristiche di generalità che un utilizzo affidabile anche nel caso di strutture torsioflessibili, permette di avere degli spostamenti longitudinali del centro di massa e della parte flessibile paragonabili nella gran parte dei casi.

5.3 SVILUPPI FUTURI

In questa trattazione l'impiego del parametro ALPHA nella stima della massima rotazione e del massimo spostamento della parte flessibile di strutture eccentriche soggette ad eccitazione sismica (metodo ALPHA) è stato condotto in ambito elastico-lineare. Lo sviluppo di questa ricerca prevede, a questo punto, l'estensione delle capacità predittive del metodo in ambito non lineare, in cui i legami costitutivi degli elementi resistenti possano essere di tipo elastico-perfettamente plastici o elasto-plastici incrudenti, determinando i corrispondenti coefficienti correttivi del caso elastico-lineare.

Da ultimo le capacità predittive del *METODO ALPHA*, qui testate per edifici a singolo piano, dovranno essere estese, dapprima in ambito elastico-lineare e successivamente in ambito non lineare, agli edifici multi piano.

BIBLIOGRAFIA

Ang A.H-S., Tang W.H.

2007, *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, 2nd Edition, Wiley, New York.

Chopra A.K

2007, *Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Third Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Clough R.W., Penzien J.

1993, *Dynamics of Structures*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

D.M. Min. LL.PP. 14 gennaio 2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*.

Gasparini G., Silvestri S., Orci C., Trombetti T.

“A Synthetic Formulation for Evaluating the Maximum Displacement of the Flexible Side in Eccentric Structures Due to the Seismic Effects”, accepted for the publication on the Proceedings of the Fifth International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-5), Las Vegas, NV, USA, 21-27 settembre 2009.

Nagarajaiah S., Reinhorn A.M., Constantinou M.C.

1991, *Nonlinear Dynamic Analyses of 3D-Base Isolated Structures*, “Journal of Earthquake Engineering”, 117(7), pp.2035-2054.

Nagarajaiah S., Reinhorn A.M., Constantinou M.C.

1993, *Torsion in Base Isolated Structures With Elastomeric Isolation Systems*, “Journal of Earthquake Engineering”, 119(10), pp.2932-2951.

Nagarajaiah S., Reinhorn A.M., Constantinou M.C.

1993, *Torsional Coupling in Sliding Base Isolated Structures*, “Journal of Earthquake Engineering”, 119(1), pp.130-149.

Nishida H., Unjoh S.

2003, *Structural Response Characteristics in Consideration of Directional Uncertainty of Earthquake Ground Motion*, in “Technical Memorandum of Public Works Research Institute”, 3920, pp. 317-326.

Silvestri S., Trombetti T., Gasparini G.

2008, *An Upper Bound and an Estimation for the Maximum Non-Linear Rotational Response of One-Storey Asymmetric Buildings*, in “Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures”, pp.51-62.

Silvestri S., Trombetti T., Gasparini G.

2008, *Closed-Form Solutions for Corrective Eccentricity, Sensitivity to Accidental Eccentricity and Increase in Peak Local Displacements*, in “Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures”, pp.63-77.

Somerville P.G.

2003, *Magnitude Scaling of the Near Fault Rupture Directivity Pulse*, in “Physics of the Earth and Planetary Interiors”, 137, 201-212.

Trombetti T.

1994, *Un Approccio Semplificato all'Analisi dei Problemi Torsionali negli Edifici Isolati Sismicamente alla Base*, in “Giornale del Genio Civile”, Fascicolo 10-11-12.

Trombetti T., Conte J.P.

2005, *New Insight Into and Simplified Approach to Seismic Analysis of Torsionally Coupled One-Story, Elastic Systems*, in “Journal of Sound and Vibration”, 286, 265-312.

Trombetti T., Silvestri S.

2004, *Added Viscous Dampers in Shear-Type Structures: the Effectiveness of Mass Proportional Damping* , in “Journal of Earthquake Engineering”, 8(2), pp. 275-313.

Trombetti T., Silvestri S., Gasparini G., Pintucchi B., De Stefano M.

2008, *Numerical Verification of the Effectiveness of the “Alpha” Method for the Estimation of the Maximum Rotational Elastic Response of Eccentric Systems*, in “Journal of Earthquake Engineering”, 12(2), pp. 249-280.

Villaverde R.

2009, *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering* , CRC Press.

APPENDICE

Le onde sismiche hanno caratteristiche diverse in base alla quantità di terreno che devono attraversare e, a parità di altri fattori, le onde che giungono in superficie ad una modesta distanza epicentrale (*near-field*) producono effetti di entità superiore rispetto alle onde che giungono ad elevata distanza epicentrale (*far-field*). I sismi *near-field* sono caratterizzati da un'elevata energia di input da dissipare quasi istantaneamente, per cui sono descritti da un unico largo impulso di moto all'inizio della registrazione; in questi casi c'è un aumento di probabilità del collasso fragile. La radiazione sismica in condizioni *near source* è dominata dalla complessità ed eterogeneità del processo di rottura; a queste distanze le onde di volume, in particolare le onde S, sono dominanti in ampiezza rispetto alle altre e gli effetti del sito possono essere trascurati.

Per questo tipo di segnale è necessario separare la componente normale e quella parallela alla faglia, sia per lo spettro di risposta che per la time history della registrazione, in quanto possono scatenare fenomeni di direttività, ovvero possono avere intensità molto diverse in una direzione piuttosto che nell'altra.

Le onde sismiche si attenuano all'aumentare della distanza epicentrale; la legge che regola questa diminuzione prende il nome di legge di attenuazione e, nel corso degli anni, numerosi autori ne hanno proposto diverse interpretazioni. La legge di attenuazione dipende dal tipo di suolo che viene attraversato dall'onda sismica, questo può però essere molto diverso da un sito all'altro e questo può causare una diversità nel modo di propagazione delle onde sismiche su siti anche molto vicini fra loro. A seconda del tipo di terreno e delle sue caratteristiche si possono presentare diverse situazioni: si possono avere effetti di amplificazione locale in presenza di terreno di tipo alluvionale, si può verificare il fenomeno della liquefazione del terreno ovvero l'accumulo di pressione interstiziale in un terreno di tipo non coesivo (sabbia, ghiaia), che ne causa la perdita di resistenza e rigidità al taglio a seguito di eccitazione sismica con conseguenti deformazioni permanenti, e si possono verificare eventi franosi in pendii con elevata acclività

costituiti da terreni detritici o prevalentemente argillosi.

Questi fattori sono fondamentali nella caratterizzazione dell' input sismico, per cui i record selezionati per condurre le indagini numeriche sono stati scelti in base ai seguenti parametri:

- distanza dall'epicentro;
- classe di sottosuolo;
- accelerazione massima al suolo;

con riferimento al PEER-NGA database, che rappresenta un'estensione e un aggiornamento del PEER Strong Motion Database.

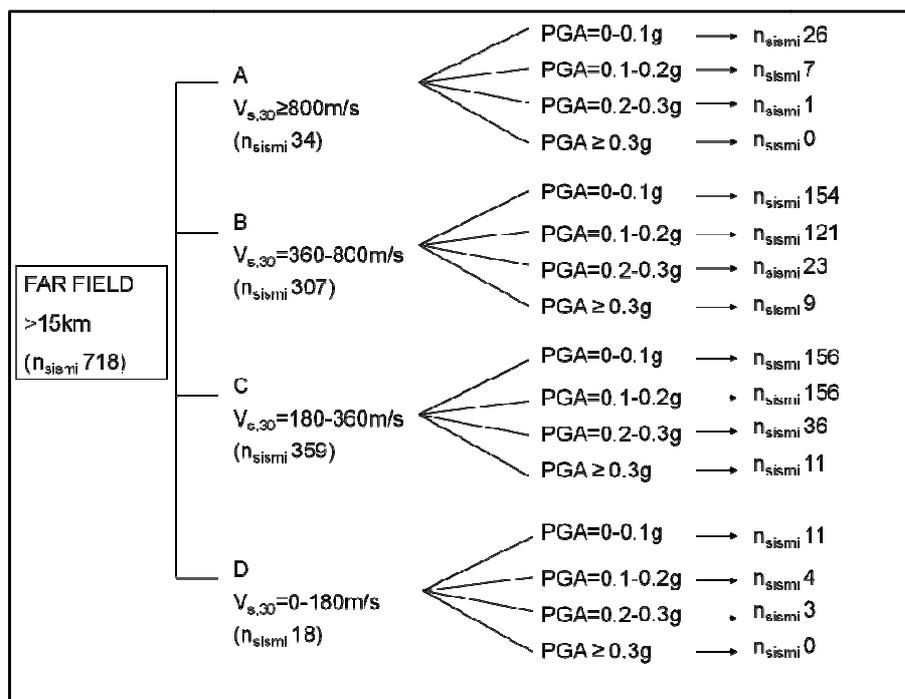
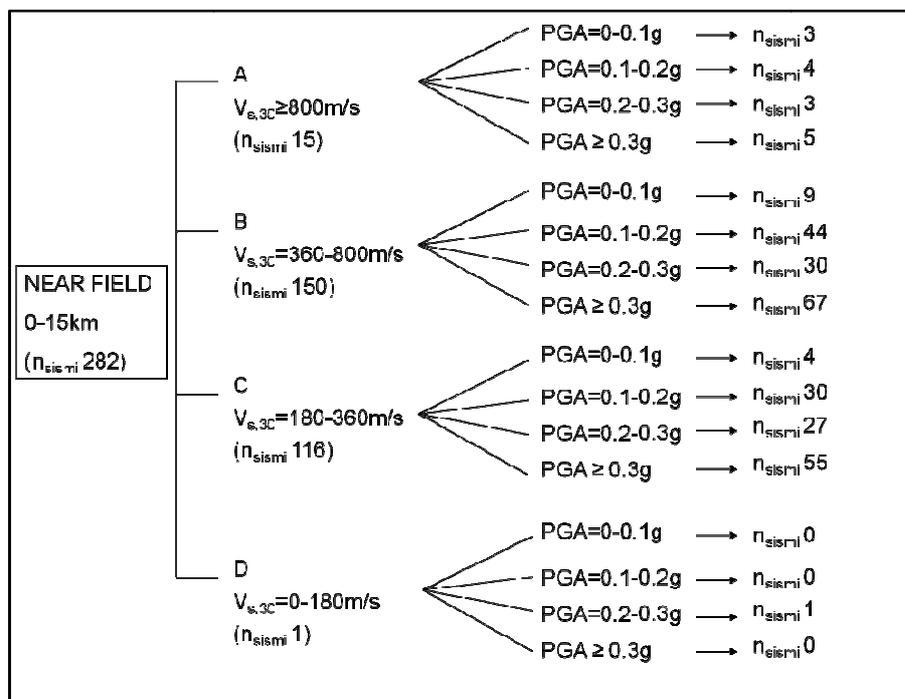
In particolare si sono selezionati gli input in modo da avere sia record *near-field* che record *far-field* (distanza dall'epicentro minore o maggiore di 15 km rispettivamente), in base alla classe di sottosuolo suggerita dalle NTC 14.01.2008 (riportata in tabella a seguire) e infine secondo la massima accelerazione al suolo ($PGA < 0,1g$; $0,1g < PGA < 0,2g$; $0,2g < PGA < 0,3g$; $PGA > 0,3g$).

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo (NTC 14.01.2008)

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

La categoria di sottosuolo E è stata inclusa nella prima categoria (A), in quanto la selezione dei sismi è avvenuta sulla base della $V_{s,30}$, velocità media di propagazione entro 30m delle onde di taglio.

Viene infine proposta una sintesi dei sismi presi in esame nelle simulazioni numeriche, in cui viene specificato il numero di record per ciascuna classe dei parametri di selezione:



Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Irpinia	ENEL 99999 Auletta	23.11.80	0.0607
Irpinia	ENEL 99999 Bisaccia	23.11.80	0.0709
Morgan Hill	CDMG 47379 Gilroy Array #1	24.04.84	0.0815
Irpinia	ENEL 99999 Bagnoli Irpinio	23.11.80	0.1595
Whittier Narrows	CIT 80054 Pasadena - CIT Kresge Lab	01.10.87	0.1017
Whittier Narrows	CDMG 24399 Mt Wilson - CIT Seis Sta	01.10.87	0.1634
Coyote Lake	CDMG 47379 Gilroy Array #1	06.08.79	0.1198
Irpinia	ENEL 99999 Sturno	23.11.80	0.2898
Kocaeli	ERD 99999 Izmit	17.08.99	0.2037
Sierra Madre	CDMG 24399 Mt Wilson - CIT Seis Sta	28.06.91	0.2350
Loma Prieta	CDMG 47379 Gilroy Array #1	18.10.89	0.4360
Loma Prieta	CDMG 57180 Los Gatos - Lexington Dam	18.10.89	0.4446
Northridge	CDMG 24207 Pacoima Dam	17.01.94	0.4085
Northridge	CDMG 24207 Pacoima Dam	17.01.94	1.4279
San Fernando	CDMG 279 Pacoima Dam	09.02.71	1.1644
Duzce	Lamont 1058	12.11.99	0.0917
Whittier	USC 90068 Covina - S Grand Ave	01.10.87	0.0713
Whittier	USC 90065 Glendora - N Oakbank	01.10.87	0.0962
Lazio-Abruzzo	ENEL 99999 Atina	07.05.84	0.0916
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU072	25.09.99	0.0797
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU074	20.09.99	0.0415
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU078	20.09.99	0.0522
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU084	20.09.99	0.0845
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU089	20.09.99	0.0456
Duzce	Lamont Station 531	12.11.99	0.1445
Northridge	USGS/VA 638 LA - Brentwood VA Hospital	17.01.94	0.1787
Duzce	Lamont Station 1059	12.11.99	0.1305
Duzce	Lamont Station 1061	12.11.99	0.1174
Whittier	USC 90074 La Habra - Briarcliff	01.10.87	0.1536
Whittier Narrows	CIT 80046 Pasadena - Brown Gym	01.10.87	0.1516
Whittier Narrows	CIT 80052 Pasadena - CIT Bridge Lab	01.10.87	0.1607
Irpinia	ENEL 99999 Calitri	23.11.80	0.1787
Whittier	USC 90033 LA - Cypress Ave	01.10.87	0.1374
Whittier	USC 90032 LA - N Figueroa St	01.10.87	0.1499
Whittier	USC 90034 LA - Fletcher Dr	01.10.87	0.1881
Whittier Narrows	CIT 80049 Pasadena - CIT Keck Lab	01.10.87	0.1606
Chi Chi	CWB 9999917 ALS	20.09.99	0.1748
Whittier Narrows	CIT 80050 Pasadena - CIT Mudd Lab	01.10.87	0.1502

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Whittier Narrows	CIT 80053 Pasadena - CIT Athenaeum	01.10.87	0.1402
Kocaeli	KOERI 99999 Arcelik	17.08.99	0.1741
Whittier Narrows	CDMG 24401 San Marino - SW Academy	01.10.87	0.1676
Irpinia	ENEL 99999 Calitri	23.11.80	0.1522
Friuli	8022 San Rocco	15.09.76	0.1045
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY080	20.09.99	0.1226
Kocaeli	ERD 99999 Gebze	17.08.89	0.1833
Morgan Hill	CDMG 47006 Gilroy - Gavilan Coll.	24.04.84	0.1014
Northridge	USC 90058 Sunland - Mt Gleason Ave	17.01.94	0.1437
Kozani	ITSAK 99999 Kozani	13.05.95	0.1757
Chi Chi	CWB 9999917 NSY	20.09.99	0.1348
Nahanni, Canada	6099 Site 3	23.12.85	0.1512
Santa Barbara	USGS 283 Santa Barbara Courthouse	13.08.78	0.1438
Chi Chi	CWB 99999 TCU048	20.09.99	0.1396
Chi Chi	CWB 99999 TCU053	20.09.99	0.1814
Chi Chi	CWB 99999 TCU054	20.09.99	0.1758
Chi Chi	CWB 99999 TCU057	20.09.99	0.1150
Chi Chi	CWB 99999 TCU063	20.09.99	0.1468
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU074	20.09.99	0.1525
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU084	20.09.99	0.1046
Chi Chi	CWB 99999 TCU087	20.09.99	0.1192
Chi Chi	CWB 99999 TCU100	20.09.99	0.1218
Chi Chi	CWB 99999 TCU103	20.09.99	0.1583
Chi Chi	CWB 99999 TCU104	20.09.99	0.1077
Chi Chi	CWB 99999 TCU106	20.09.99	0.1574
Chi Chi	CWB 99999 TCU109	20.09.99	0.1612
Chi Chi	CWB 99999 TCU116	20.09.99	0.1683
Chi Chi	CWB 99999 TCU128	20.09.99	0.1541
Chi Chi	CWB 99999 TCU136	20.09.99	0.1666
Chi Chi	CWB 9999917 TCU	20.09.99	0.1956
Sierra Mad	USGS 5296 Pasadena - USGS/NSMP Office	28.06.91	0.2291
Northridge	USGS 5081 Topanga - Fire Sta	17.01.94	0.2591
Northridge	USGS 5108 Santa Susana Ground	17.01.94	0.2530
Whittier Narrows	CDMG 24402 Altadena - Eaton Canyon	01.10.87	0.2199
Whittier	USC 90093 Arcadia - Campus Dr	01.10.87	0.2649
Whittier Narrows	CIT 80047 Pasadena - CIT Calif Blvd	01.10.87	0.2253
Whittier Narrows	CIT 80051 Pasadena - CIT Indust. Rel	01.10.87	0.2410
Whittier	USC 90063 Glendale - Las Palmas	01.10.87	0.2331

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Whittier	USC 90019 San Gabriel - E Grand Ave	01.10.87	0.2384
Whittier	USC 90095 Pasadena - Old House Rd	01.10.87	0.2622
Friuli	8014 Forgaria Cornino	15.09.76	0.2289
Northridge	USC 90015 LA - Chalon Rd	17.01.94	0.2148
Chi Chi	CWB 99999 CHY024	20.09.99	0.2349
Chi Chi	CWB 99999 CHY029	20.09.99	0.2595
Chi Chi	CWB 99999 CHY034	20.09.99	0.2963
Chi Chi	CWB 99999 CHY035	20.09.99	0.2602
Chi Chi	CWB 99999 CHY074	20.09.99	0.2069
Northridge	USC 90009 N Hollywood - Coldwater Can	17.01.94	0.2792
Coyote lake	CDMG 57217 Coyote Lake Dam	06.08.79	0.2179
Morgan Hill	CDMG 57383 Gilroy Array #6	24.04.84	0.2814
Mammoth Lake	CDMG 54301 Mammoth Lakes H. S.	25.05.80	0.2818
Landers	CDMG 22170 Joshua Tree	28.06.92	0.2489
Loma Prieta	CDMG 57563 San Jose - Santa Teresa Hills	18.10.89	0.2834
Chi Chi	CWB 99999 TCU049	20.09.99	0.2710
Chi Chi	CWB 99999 TCU082	20.09.99	0.2200
Chi Chi	CWB 99999 TCU089	20.09.99	0.2878
Chi Chi	CWB 99999 TCU102	20.09.99	0.2444
Chi Chi	CWB 99999 TCU120	20.09.99	0.2373
Chi Chi	CWB 99999 TCU122	20.09.99	0.2412
Chi Chi	CWB 99999 TCU138	20.09.99	0.2146
Duzce	Lamont 375	12.11.99	0.7367
Northridge	USGS/VA 637 LA - Sepulveda VA Hospital	17.01.94	0.8026
Northridge	USGS 655 Jensen Filter Plant	17.01.94	0.7636
Northridge	USGS 5082 LA-Wadsworth VA Hospital N	17.01.94	0.2648
Whittier Narrows	CDMG 24461 Alhambra - Fremont School	01.10.87	0.3880
Manjil	BHRC 99999 Abbar	20.06.90	0.5051
Whittier Narrows	USGS 709 Garvey Res. - Control Bldg	01.10.87	0.3848
Sierra Madre	CDMG 24402 Altadena - Eaton Canyon	28.06.91	0.3276
Whittier Narrows	CIT 80048 Pasadena - CIT Lura St	01.10.87	0.3308
Morgan Hill	USGS 1652 Anderson Dam	24.04.84	0.3426
Friuli	8012 Tolmezzo	06.05.76	0.3458
Loma Prieta	UCSC 13 BRAN	18.10.89	0.5263
Superstition Hills	USGS 286 Superstition Mtn Camera	24.11.87	0.7931
Chi Chi	CWB 99999 CHY006	20.09.99	0.3596
Chi Chi	CWB 99999 CHY028	20.09.99	0.7940

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY074	20.09.99	0.3240
Chi Chi	CWB 99999 CHY080	20.09.99	0.8199
Loma Prieta	CDMG 57007 Corralitos	18.10.89	0.4975
Victoria, Mexico	UNAMUCSD 6604 Cerro Prieto	09.06.80	0.5722
Cape Mendocino	CDMG 89005 Cape Mendocino	25.04.92	1.3455
Morgan Hill	CDMG 57217 Coyote Lake Dam	24.04.84	0.9652
Tabas, Iran	9102 Dayhook	16.09.78	0.3505
Coyote Lake	CDMG 57383 Gilroy Array #6	06.08.79	0.4038
Gazli	9201 Karakyr	17.05.76	0.6438
San Salvador	CDMG 99999 Geotech Investig Center	10.10.86	0.6493
Loma Prieta	47006 Gilroy - Gavilan Coll. 6	18.10.89	0.3341
Hector Mine	SCSN 99999 Hector	16.10.99	0.3062
Northridge	USGS 655 Jensen Filter Plant Generator	17.01.94	0.7649
Mammoth Lakes	CDMG 54301 Mammoth Lakes H. S.	25.05.80	0.4143
Northridge	USC 90055 Simi Valley - Katherine Rd	17.01.94	0.7453
San Fernando	USGS 128 Lake Hughes #12	09.02.71	0.3297
Northridge	UCSB 99999 LA 00	17.01.94	0.3186
Landers	SCE 24 Lucerne	28.06.92	0.7214
Northridge	DWP 0 LA DamSGS Station 00000	17.01.94	0.4528
Loma Prieta	UCSC 15 UCSC	18.10.89	0.3418
Loma Prieta	CDMG 58135 UCSC Lick Observatory	18.10.89	0.4568
Northridge	USC 90014 Beverly Hills - 12520 Mulhol	17.01.94	0.5102
Kobe	CUE 99999 Nishi-Akashi	16.01.95	0.4862
Cape Mendocino	CDMG 89156 Petrolia	25.04.92	0.6236
Northridge	CDMG 24088 Pacoima Kagel Canyon	17.01.94	0.3482
Nahanni, Canada	6097 Site 1	23.12.85	1.0556
Nahanni, Canada	6098 Site 2	23.12.85	0.3849
Northridge	DWP 75 Sylmar - Converter Sta East	17.01.94	0.6469
Northridge	UCSB 78 Stone Canyon	17.01.94	0.3391
Loma Prieta	CDMG 58065 Saratoga - Aloha Ave	18.10.89	0.3821
Northridge	USC 90049 Pacific Palisades - Sunset	17.01.94	0.3316
Northridge	CDMG 24514 Sylmar - Olive View Med FF	17.01.94	0.7007
Tabas, Iran	9101 Tabas	16.09.78	0.8128
Chi Chi	CWB 99999 TCU052	20.09.99	0.3473
Chi Chi	CWB 99999 TCU067	20.09.99	0.4068
Chi Chi	CWB 99999 TCU068	20.09.99	0.5442
Chi Chi	CWB 99999 TCU071	20.09.99	0.6229

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi	CWB 99999 TCU072	20.09.99	0.4033
Chi Chi	CWB 99999 TCU074	20.09.99	0.4496
Chi Chi	CWB 99999 TCU075	20.09.99	0.3020
Chi Chi	CWB 99999 TCU076	20.09.99	0.3549
Chi Chi	CWB 99999 TCU078	20.09.99	0.3927
Chi Chi	CWB 99999 TCU079	20.09.99	0.5290
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU080	25.09.99	0.5814
Chi Chi	CWB 99999 TCU084	20.09.99	0.7942
Chi Chi	CWB 99999 TCU088	20.09.99	0.5230
Chi Chi	CWB 9999936 TCU129	20.09.99	0.7880
Loma Prieta	UCSC 16 LGPC	18.10.89	0.7835
Northridge	CDMG 24688 LA - UCLA Grounds	17.01.94	0.3908
Loma Prieta	UCSC 14 WAHO	18.10.89	0.5174
Chi Chi	CWB 9999917 WNT	20.09.99	0.7473
Loma Prieta	CDMG 58235 Saratoga - W Valley Coll.	18.10.89	0.3111
Chalfant	CDMG 54424 Bishop - Paradise Lodge	20.07.86	0.0741
Victoria, Mexico	UNAMUCSD 6624 Victoria Hospital Sotano	09.06.80	0.0385
Imperial Valley	CDMG 11369 Westmorland Fire Sta	15.10.79	0.0864
Double Springs	CDMG 65398 Woodfords	12.09.94	0.0708
Whittier	USC 90070 Covina - W Badillo	01.10.87	0.1072
Chalfant Valley	CDMG 54424 Bishop - Paradise Lodge	21.07.86	0.1472
Whittier	USC 90073 Hacienda Heights – Colima	01.10.87	0.1897
Whittier Narrows	CDMG 14368 Downey - Co Maint Bldg	01.10.87	0.1779
Whittier	USC 90066 El Monte - Fairview Av	01.10.87	0.1887
Whittier	USC 90022 LA - S Grand Ave	01.10.87	0.1851
Whittier	USC 90069 Baldwin Park - N Holly	01.10.87	0.1016
Whittier Narrows	USGS 634 Norwalk - Imp Hwy, S Grnd	01.10.87	0.1706
Whittier	USC 90072 La Puente - Rimgrove Av	01.10.87	0.1290
Whittier	USC 90071 West Covina - S Orange Ave	01.10.87	0.1576
Whittier	USC 90025 LA - E Vernon Ave	01.10.87	0.1597
Friuli	8023 Buia	15.09.76	0.1088
Palm Springs	USGS 5069 Fun Valley	08.07.86	0.1290
Morgan Hill	CDMG 47380 Gilroy Array #2	24.04.84	0.1867
Morgan Hill	CDMG 47381 Gilroy Array #3	24.04.84	0.1943
Morgan Hill	CDMG 57425 Gilroy Array #7	24.04.84	0.1443
Imperial Valley	USGS 5060 Brawley Airport	15.10.89	0.1933
Imperial Valley	UNAMUCSD 6622 Compuertas	15.10.89	0.1597
Imperial Valley	USGS 5051 Parachute Test Site	15.10.89	0.1661

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Mammoth Lakes	CDMG 54099 Convict Creek	25.05.80	0.1669
Mammoth Lakes	CDMG 54214 Long Valley Dam	25.05.80	0.1369
Little Skull Mountain	USGS 99999 Station #1-Lathrop Wells	29.06.92	0.1651
Palm Springs	CDMG 12025 Palm Springs Airport	08.07.86	0.1692
Chi Chi	CWB 99999 TCU050	20.09.99	0.1383
Chi Chi	CWB 99999 TCU056	20.09.99	0.1431
Chi Chi	CWB 99999 TCU060	20.09.99	0.1512
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU073	20.09.99	0.1362
Chi Chi	CWB 99999 TCU110	20.09.99	0.1831
Chi Chi	CWB 99999 TCU123	20.09.99	0.1492
Westmoreland	USGS 5062 Salton Sea Wildlife Refuge	26.04.81	0.1973
Duzce	Lamont 1062	12.11.99	0.2101
Whittier	USC 90079 Downey – Birchdale	01.10.87	0.2985
Whittier	USC 90094 Bell Gardens – Jaboneria	01.10.87	0.2547
Chalfant Valley	CDMG 54171 Bishop - LADWP South St	21.07.86	0.2058
Whittier Narrows	USGS 289 Whittier Narrows Dam upstream	01.10.87	0.2733
Superstition Hills	CDMG 11369 Westmorland Fire Sta	24.11.87	0.2100
Chalfant	CDMG 54428 Zack Brothers Ranch	20.07.86	0.2382
Parkfield	CDMG 1015 Cholame - Shandon Array #8	28.06.66	0.2645
Palm Springs	USGS 5073 Cabazon	08.07.86	0.2218
Corinth	99999 Corinth	24.02.81	0.2641
Northridge	USC 90016 LA - N Faring Rd	17.01.94	0.2462
Coyote Lake	CDMG 47380 Gilroy Array #2	06.08.79	0.2936
Coyote Lake	CDMG 47381 Gilroy Array #3	06.08.79	0.2633
Coyote Lake	CDMG 57382 Gilroy Array #4	06.08.79	0.2700
Loma Prieta	CDMG 57476 Gilroy - Historic Bldg.	18.10.89	0.2601
Imperial Valley	UNAMUCSD 6618 Agrarias	15.10.79	0.2903
Imperial Valley	UNAMUCSD 6621 Chihuahua	15.10.79	0.2703
Imperial Valley	USGS 5053 Calexico Fire Station	15.10.79	0.2329
Imperial Valley	USGS 412 El Centro Array #10	15.10.79	0.2069
Imperial Valley	CDMG 01136 EC County Center FF	15.10.79	0.2165
Imperial Valley	USGS 5055 Holtville Post Office	15.10.79	0.2476
Morgan Hill	CDMG 57191 Halls Valley	24.04.84	0.2131
Imperial Valley	USGS 117 El Centro Array #9	19.05.40	0.2584
Palm Springs	USGS 5071 Morongo Valley	08.07.86	0.2084
Chi Chi	CWB 99999 TCU051	20.09.99	0.2085
Chi Chi	CWB 99999 TCU055	20.09.99	0.2188
Chi Chi	CWB 99999 TCU101	20.09.99	0.2264

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Whittier	USC 90077 Santa Fe Springs - E.Joslin	01.10.87	0.4330
Managua	3501 Managua, ESSO	23.12.72	0.3941
Whittier Narrows	CDMG 24400 LA - Obregon Park	01.10.87	0.4242
Northridge	CDMG 24087 Arleta - Nordhoff Fire Sta	17.01.94	0.3298
Chalfant Valley	CDMG 54428 Zack Brothers Ranch	21.07.86	0.4246
Duzce	ERD 99999 Bolu	12.11.99	0.7662
Superstition Hills	USGS 5051 Parachute Test Site	24.11.87	0.4509
Parkfield	CDMG 1014 Cholame - Shandon Array #5	28.06.66	0.3768
Loma Prieta	CDMG 47125 Capitola	18.10.89	0.4803
Chi Chi	CWB 99999 CHY101	20.09.99	0.3822
Northridge	USC 90053 Canoga Park - Topanga Can	17.01.94	0.3764
Dinar	ERD 99999 Dinar	10.01.95	0.3034
Palm Springs	CDMG 12149 Desert Hot Springs	08.07.86	0.3432
Kocaeli	ERD 99999 Duzce	17.08.99	0.3255
Erzikan	95 Erzincan	13.03.92	0.4886
Loma Prieta	CDMG 47380 Gilroy Array #2	18.10.89	0.3529
Loma Prieta	CDMG 47381 Gilroy Array #3	18.10.89	0.4621
Loma Prieta	CDMG 57382 Gilroy Array #4	18.10.89	0.3037
Imperial Valley	UNAMUCSD 6616 Aeropuerto Mexicali	15.10.79	0.3438
Imperial Valley	USGS 5054 Bonds Corner	15.10.79	0.6861
Imperial Valley	USGS 955 El Centro Array #4	15.10.79	0.3745
Imperial Valley	USGS 952 El Centro Array #5	15.10.79	0.4481
Imperial Valley	CDMG 1336 EC Meloland Overpass FF	15.10.79	0.3092
Imperial Valley	USGS 5028 El Centro Array #7	15.10.79	0.4200
Imperial Valley	USGS 958 El Centro Array #8	15.10.79	0.5379
Imperial Valley	USGS 5058 El Centro Array #11	15.10.79	0.3746
Imperial Valley	USGS 5165 El Centro Differential Array	15.10.79	0.4310
Imperial Valley	CDMG 5158 El Centro Array #6	15.10.79	0.4273
Coalinga	USBR 1162 Pleasant Valley P.P. – bldg	02.05.83	0.3221
Coalinga	USBR 1162 Pleasant Valley P.P. – yard	02.05.83	0.5709
Imperial Valley	UNAMUCSD 6619 SAHOP Casa Flores	15.10.79	0.3571
Mammoth Lakes	CDMG 54099 Convict Creek	25.05.80	0.4193
Mammoth Lakes	CDMG 54214 Long Valley Dam	25.05.80	0.3403
Kobe	JMA 99999 KJMA	16.01.95	0.7105
Northridge	USC 90057 Canyon Country - W Lost Cany	17.01.94	0.4355
Northridge	USC 90013 Beverly Hills - 14145 Mulhol	17.01.94	0.4594
San Salvador	CDMG 99999 National Geographical Inst	10.10.86	0.4905
Palm Springs	USGS 5070 North Palm Springs	08.07.86	0.5903

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Northridge	CDMG 24279 Newhall - Fire Sta	17.01.94	0.6980
Northridge	SCE 99999 Pardee – SCE	17.01.94	0.5054
Denali	Alyeska ps10 TAPS Pump Station #10	03.11.02	0.3243
Cape Mendocino	CDMG 89324 Rio Dell Overpass – FF	25.04.92	0.4244
Northridge	USC 90006 Sun Valley - Roscoe Blvd	17.01.94	0.3595
Northridge	SDWP 77 Rinaldi Receiving Sta ta	17.01.94	0.6336
Northridge	DWP 74 Sylmar - Converter Sta	17.01.94	0.7123
Northridge	USC 90003 Northridge - 17645 Saticoy St	17.01.94	0.4114
Kobe	Station: CUE 99999 Takatori	16.01.95	0.6528
Northridge	CDMG 24436 Tarzana - Cedar Hill A	17.01.94	1.6615
Kobe	CUE 99999 Takarazuka	16.01.95	0.7069
Chi Chi	CWB 99999 TCU065	20.09.99	0.6569
Chi Chi	CWB 9999917 WGK	20.09.99	0.3874
Northridge	USC 90056 Newhall - W Pico Canyon Rd.	17.01.94	0.3848
Westmoreland	CDMG 11369 Westmorland Fire Sta	26.04.81	0.4134
Palm Springs	USGS 5072 Whitewater Trout Farm	08.07.86	0.6022
Kocaeli	KOERI 99999 Yarimca	17.08.99	0.3055
Imperial Valley	USGS 5057 El Centro Array #3	15.10.79	0.2552
Alaska	ANSS/UA Carl Carlo	03.11.02	0.0926
Alaska	ANSS/UA R109 R109	03.11.02	0.0830
Irpinia	ENEL 99999 Arienzo	23.11.80	0.0351
Irpinia	ENEL 99999 Bisaccia	23.11.80	0.0888
Northridge	CDMG 25169 Anacapa Island	17.01.94	0.0511
Northridge	CDMG 24310 Antelope Buttes	17.01.94	0.0559
Whittier Narrows	CDMG 24047 Vasquez Rocks Park	01.10.87	0.0632
Whittier	USC 90017 LA - Wonderland Ave	01.10.87	0.0411
Irpinia	ENEL 99999 Auletta	23.11.80	0.0221
Irpinia	ENEL 99999 Bagnoli Irpinio	23.11.80	0.0525
Irpinia	ENEL 99999 Sturno	23.11.80	0.0760
San Fernando	CDWR 111 Cedar Springs, Allen Ranch	09.02.71	0.0177
Northridge	CDMG 23598 Rancho Cucamonga-Deer Can	17.01.94	0.0645
Chi Chi	CWB 99999 HWA003	20.09.99	0.0885
Chi Chi	CWB 99999 ILA063	20.09.99	0.0884
Northridge	CDMG 24469 Lake Hughes #4 - Camp Mend	17.01.94	0.0793
Northridge	CDMG 23595 Littlerock - Brainard Can	17.01.94	0.0683
Loma Prieta	CDMG 58131 SF - Pacific Heights	18.10.89	0.0525
Loma Prieta	CDMG 58338 Piedmont Jr High	18.10.89	0.0726
Loma Prieta	CDMG 58043 Point Bonita	18.10.89	0.0712

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Loma Prieta	CDMG 58151 SF - Rincon Hill	18.10.89	0.0855
Northridge	CDMG 24644 Sandberg - Bald Mtn	17.01.94	0.0941
Loma Prieta	CDMG 58539 So. San Francisco, Sierra Pt.	18.10.89	0.0805
Chi Chi	CWB 99999 TCU085	20.09.99	0.0599
Chi Chi	CWB 99999 TTN042	20.09.99	0.0560
Northridge	CDMG 23590 Wrightwood - Jackson Flat	17.01.94	0.0486
Northridge	CDMG 24047 Vasquez Rocks Park	17.01.94	0.1449
San Fernando	CDMG 126 Lake Hughes #4	09.02.71	0.1631
Northridge	CDMG 24399 Mt Wilson - CIT Seis Sta	17.01.94	0.1678
Northridge	USGS 141 LA - Griffith Park Observatory	17.01.94	0.2458
Parkfield	CDMG 1016 Cholame - Shandon Array #12	28.06.66	0.0597
San Fernando	CDWR 112 Cedar Springs Pumphouse	09.02.71	0.0272
San Fernando	USGS 998 Fort Tejon	09.02.71	0.0240
San Fernando	CDMG 121 Fairmont Dam	09.02.71	0.0879
San Fernando	CDMG 278 Puddingstone Dam (Abutment)	09.02.71	0.0653
Parkfield	USGS 1083 San Luis Obispo	28.06.66	0.0123
San Fernando	CDWR 1027 Tehachapi Pump	09.02.71	0.0391
San Fernando	ACOE 287 Upland - San Antonio Dam	09.02.71	0.0681
San Fernando	USGS 290 Wrightwood - 6074 Park Dr	09.02.71	0.0520
Friuli	8002 Barcis	06.05.76	0.0294
Santa Barbara	USGS 106 Cachuma Dam Toe	13.08.78	0.0484
Irpinia	ENEL 99999 Torre Del Greco	23.11.80	0.0472
Irpinia	ENEL 99999 Tricarico	23.11.80	0.0413
Irpinia	ENEL 99999 Brienza	23.11.80	0.0392
Irpinia	ENEL 99999 Tricarico	23.11.80	0.0276
Coalinga	CDMG 36229 Parkfield - Cholame 12W	02.05.83	0.0445
Coalinga	CDMG 36230 Parkfield - Cholame 2E	02.05.83	0.0284
Coalinga	CDMG 36450 Parkfield - Cholame 3E	02.05.83	0.0491
Coalinga	CDMG 36444 Parkfield - Fault Zone 10	02.05.83	0.0996
Coalinga	CDMG 36453 Parkfield - Fault Zone 11	02.05.83	0.0938
Coalinga	CDMG 36454 Parkfield - Fault Zone 6	02.05.83	0.0578
Coalinga	CDMG 36443 Parkfield - Fault Zone 9	02.05.83	0.0544
Coalinga	CDMG 36416 Parkfield - Gold Hill 2W	02.05.83	0.0781
Coalinga	CDMG 36439 Parkfield - Gold Hill 3E	02.05.83	0.0913
Coalinga	CDMG 36433 Parkfield - Gold Hill 4W	02.05.83	0.0768
Coalinga	CDMG 36434 Parkfield - Gold Hill 5W	02.05.83	0.0614
Coalinga	CDMG 36432 Parkfield - Gold Hill 6W	02.05.83	0.0644
Coalinga	CDMG 36422 Parkfield - Stone Corral 2E	02.05.83	0.0731

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Coalinga	CDMG 36438 Parkfield - Stone Corral 4E	02.05.83	0.0679
Coalinga	CDMG 36448 Parkfield - Vineyard Cany 1W	02.05.83	0.0820
Coalinga	CDMG 36446 Parkfield - Vineyard Cany 4W	02.05.83	0.0523
Coalinga	CDMG 36441 Parkfield - Vineyard Cany 6W	02.05.83	0.0644
Borah Peak	INEEL 99999 CPP-601	28.10.83	0.0409
Borah Peak	INEEL 99999 CPP-610	28.10.83	0.0733
Borah Peak	99999 PBF	28.10.83	0.0524
Borah Peak	INEEL 99999 TAN-719	28.10.83	0.0436
Borah Peak	INEEL 99999 TRA-642 ETR Reactor Bldg	28.10.83	0.0291
Morgan Hill	CDMG 57007 Corralitos	24.04.84	0.0983
Morgan Hill	CDMG 57064 Fremont - Mission San Jose	24.04.84	0.0226
Morgan Hill	CDMG 47126 San Juan Bautista, 24 Polk St	24.04.84	0.0378
Morgan Hill	USGS 1655 San Justo Dam	24.04.84	0.0758
Morgan Hill	USGS 1655 San Justo Dam	24.04.84	0.0669
Morgan Hill	CDMG 58135 UCSC Lick Observatory	24.04.84	0.0642
Kavala	ITSAK 99999 Kavala	09.11.85	0.0483
Palm Springs	USGS 5231 Anza - Tule Canyon	08.07.86	0.0988
Palm Springs	CDMG 22170 Joshua Tree	08.07.86	0.0576
Palm Springs	USGS 707 Lake Mathews Dike Toe	08.07.86	0.0529
Palm Springs	CDMG 13198 Murrieta Hot Springs	08.07.86	0.0495
Palm Springs	CDMG 23497 Rancho Cucamonga – FF	08.07.86	0.0189
Palm Springs	CDMG 13123 Riverside Airport	08.07.86	0.0414
Palm Springs	CDMG 13199 Winchester Bergman Ran	08.07.86	0.0845
Edgcombe	113A Maraenui Primary School	02.03.87	0.0364
Whittier	USC 90040 Carson - Catskill Ave	01.10.87	0.0516
Whittier Narrows	CDMG 24277 Castaic - Hasley Canyon	01.10.87	0.0384
Whittier Narrows	CDMG 24278 Castaic - Old Ridge Route	01.10.87	0.0667
Whittier Narrows	CDMG 13197 Huntington Beach - Lake St	01.10.87	0.0466
Whittier	USC 90015 LA - Chalon Rd	01.10.87	0.0306
Whittier Narrows	CDMG 14241 LB - Recreation Park	01.10.87	0.0510
Whittier Narrows	CDMG 24271 Lake Hughes #1	01.10.87	0.0350
Whittier	USC 90045 Lawndale - Osage Ave	01.10.87	0.0604
Whittier Narrows	CDMG 24055 Leona Valley #5 – Ritter	01.10.87	0.0489
Whittier	USC 90050 Malibu - Las Flores Canyon	01.10.87	0.0552
Whittier	USC 90051 Malibu - W Pacific Cst Hwy	01.10.87	0.0386
Whittier	USC 90062 Mill Creek, Angeles Nat For	01.10.87	0.0800
Whittier Narrows	CDMG 24283 Moorpark - Fire Sta	01.10.87	0.0412

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Whittier	USC 90049 Pacific Palisades – Sunset	01.10.87	0.0483
Whittier	USC 90047 Playa Del Rey – Saran	01.10.87	0.0315
Whittier Narrows	CDMG 23497 Rancho Cucamonga – FF	01.10.87	0.0554
Whittier	USC 90044 Rancho Palos Verdes – Luconia	01.10.87	0.0201
Whittier Narrows	CDMG 13123 Riverside Airport	01.10.87	0.0488
Whittier	USC 90048 Santa Monica - Second St	01.10.87	0.0374
Whittier	USC 90058 Sunland - Mt Gleason Ave	01.10.87	0.0830
Whittier Narrows	CDMG 24514 Sylmar - Olive View Med FF	01.10.87	0.0557
Whittier	USC 90038 Torrance - W 226th St	01.10.87	0.0384
Loma Prieta	CDMG 58373 APEEL 10 – Skyline	18.10.89	0.0950
Loma Prieta	CDMG 58219 APEEL 3E Hayward CSUH	18.10.89	0.0756
Loma Prieta	USGS 1652 Anderson Dam (18.10.89	0.0699
Loma Prieta	USGS 1483 Bear Valley #14, Upper Butts Rn	18.10.89	0.0973
Loma Prieta	USGS 1474 Bear Valley #5, Callens Ranch	18.10.89	0.0662
Loma Prieta	USGS 1476 Bear Valley #7, Pinnacles	18.10.89	0.0417
Loma Prieta	USGS 1005 Berkeley - Strawberry Canyon	18.10.89	0.0552
Loma Prieta	CDMG 58471 Berkeley LBL	18.10.89	0.0875
Loma Prieta	USGS 1687 Calaveras Reservoir	18.10.89	0.0908
Loma Prieta	USGS 1129 Hayward City Hall – North	18.10.89	0.0542
Loma Prieta	USGS 1032 Hollister - SAGO Vault	18.10.89	0.0470
Loma Prieta	CDMG 58233 Lower Crystal Springs Dam	17.10.89	0.0705
Loma Prieta	CDMG 47377 Monterey City Hall	18.10.89	0.0700
Loma Prieta	CDMG 47189 SAGO South – Surface	18.10.89	0.0712
Loma Prieta	CDMG 58132 SF - Cliff House	18.10.89	0.0895
Loma Prieta	CDMG 58133 SF - Telegraph Hill	18.10.89	0.0578
Loma Prieta	USGS 1688 Sunol - Forest Fire Station	18.10.89	0.0773
Loma Prieta	CDMG 58127 Woodside	18.10.89	0.0797
Loma Prieta	CDMG 58163 Yerba Buena Island	18.10.89	0.0557
Landers	CDMG 12168 Puerta La Cruz	28.06.92	0.0456
Landers	CDMG 12206 Silent Valley - Poppet Flat	28.06.92	0.0463
Landers	CDMG 22161 Twentynine Palms	28.06.92	0.0701
Northridge	CDMG 24461 Alhambra - Fremont School	17.01.94	0.0879
Northridge	CDMG 24576 Anaverde Valley - City R	17.01.94	0.0502
Northridge	USC 90040 Carson - Catskill Ave	17.01.94	0.0842
Kocaeli	ERD 99999 Bursa Sivil	17.08.99	0.0559
Chi Chi	CWB 99999 CHY019	20.09.99	0.0576
Chi Chi	CWB 99999 CHY022	20.09.99	0.0560

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi	CWB 99999 CHY042	20.09.99	0.0823
Chi Chi	CWB 99999 CHY050	20.09.99	0.0822
Chi Chi	CWB 99999 CHY057	20.09.99	0.0456
Chi Chi	CWB 99999 CHY061	20.09.99	0.0349
Chi Chi	CWB 99999 CHY062	20.09.99	0.0527
Chi Chi	CWB 99999 CHY079	20.09.99	0.0444
Chi Chi	CWB 99999 CHY081	20.09.99	0.0494
Chi Chi	CWB 99999 CHY102	20.09.99	0.0513
Chi Chi	CWB 9999917 CHY109	20.09.99	0.0480
Chi Chi	CWB 9999917 CHY110	20.09.99	0.0303
Kocaeli	KOERI 99999 Hava Alani	17.08.99	0.0942
Kozani	ITSAK 99999 Edessa	13.05.95	0.0242
Chi Chi	CWB 9999917 ENA	20.09.99	0.0624
Chi Chi	CWB 9999917 ESL	20.09.99	0.0729
Kozani	99999 Florina	13.05.95	0.0242
Chi Chi	CWB 99999 HWA002	20.09.99	0.0716
Chi Chi	CWB 99999 HWA023	20.09.99	0.0364
Chi Chi	CWB 99999 HWA024	20.09.99	0.0240
Chi Chi	CWB 99999 HWA025	20.09.99	0.0655
Chi Chi	CWB 99999 HWA026	20.09.99	0.0642
Chi Chi	CWB 99999 HWA029	20.09.99	0.0834
Chi Chi	CWB 99999 HWA031	20.09.99	0.0975
Chi Chi	CWB 99999 HWA035	20.09.99	0.0771
Chi Chi	CWB 99999 HWA038	20.09.99	0.0459
Chi Chi	CWB 99999 HWA039	20.09.99	0.0794
Chi Chi	CWB 99999 HWA044	20.09.99	0.0646
Kocaeli	ERD 99999 Istanbul	17.08.99	0.0485
Kozani	ITSAK 99999 Kastoria	13.05.95	0.0178
Northridge	CDMG 24461 Alhambra - Fremont School	17.01.94	0.0879
Northridge	CDMG 24576 Anaverde Valley - City R	17.01.94	0.0502
Northridge	CDMG 14560 LB - City Hall	17.01.94	0.0417
Northridge	USC 90040 Carson - Catskill Ave	17.01.94	0.0842
Northridge	CDMG 24305 Leona Valley #1	17.01.94	0.0753
Northridge	CDMG 24306 Leona Valley #2	17.01.94	0.0771
Northridge	CDMG 24307 Leona Valley #3	17.01.94	0.0887
Northridge	CDMG 24308 Leona Valley #4	17.01.94	0.0761
Kocaeli	ITU 99999 Mecidiyekoy	17.08.99	0.0567
Kocaeli	ITU 99999 Maslak	17.08.99	0.0423

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Kobe	99999 MZH	16.01.95	0.0625
Northridge	CDMG 13160 Newport Bch - Irvine Ave. F.S	17.01.94	0.0472
Northridge	CDMG 13610 Newport Bch - Newp & Coast	17.01.94	0.0927
Kobe	99999 OKA	16.01.95	0.0709
Northridge	CDMG 24521 Palmdale-Hwy 14 & Palmdale	17.01.94	0.0676
Northridge	CDMG 14404 Rancho Palos Verdes – Hawth	17.01.94	0.0640
Northridge	USC 90075 Whittier - S. Alta Dr	17.01.94	0.0735
Northridge	CDMG 14159 San Pedro - Palos Verdes	17.01.94	0.0974
Northridge	CDMG 14578 Seal Beach - Office Bldg	17.01.94	0.0755
Northridge	CDMG 13123 Riverside Airport	17.01.94	0.0575
Hector Mine Sat	CDMG 12647 Joshua Tree N.M. - Keys View	16.10.99	0.0826
Loma Prieta	CDMG 58378 APEEL 7 – Pulgas	18.10.89	0.1187
Loma Prieta	USGS 1161 APEEL 9 - Crystal Springs Res	18.10.89	0.1136
Whittier Narrows	USGS 951 Brea Dam	01.10.87	0.1324
Whittier	USC 90009 N Hollywood - Coldwater Can	01.10.87	0.1709
Whittier Narrows	CDMG 14242 LB - Rancho Los Cerritos	01.10.87	0.1900
Whittier	USC 90014 Beverly Hills - 12520 Mulhol	01.10.87	0.1126
Whittier	USC 90060 La Crescenta - New York	01.10.87	0.1531
Whittier Narrows	USGS 697 Orange Co. Reservoir	01.10.87	0.1956
Whittier Narrows	CDMG 24088 Pacoima Kagel Canyon	01.10.87	0.1564
Palm Springs	USGS 5224 Anza - Red Mountain	08.07.86	0.1214
Palm Springs	USGS 5230 Santa Rosa Mountain	08.07.86	0.1056
Whittier	USC 90061 Big Tujunga, Angeles Nat F	0.1490	0.1490
Irpinia	ENEL 99999 Rionero In Vulture	23.11.80	0.1108
Loma Prieta	CDMG 58262 Belmont – Envirotech	18.10.89	0.1185
Northridge	USC 90011 Montebello - Bluff Rd.	17.01.94	0.1548
Northridge	USC 90074 La Habra – Briarcliff	17.01.94	0.1480
Landers	CDMG 23559 Barstow	28.06.92	0.1193
Irpinia	ENEL 99999 Rionero In Vulture	23.11.80	0.1062
Northridge	USC 90093 Arcadia - Campus Dr	17.01.94	0.1061
Palm Springs	USGS 5157 Cranston Forest Station	08.07.86	0.1571
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY014	22.09.99	0.1137
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY024	20.09.99	0.1297
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY028	20.09.99	0.1506
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY029	25.09.99	0.1759
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY034	20.09.99	0.1022
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY035	20.09.99	0.1648

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY041	20.09.99	0.1898
Chi Chi	CWB 99999 CHY046	20.09.99	0.1191
Chi Chi	CWB 99999 CHY052	20.09.99	0.1105
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY074	25.09.99	0.1458
Chi Chi	CWB 99999 CHY086	20.09.99	0.1149
Chi Chi	CWB 99999 CHY087	20.09.99	0.1316
Loma Prieta	CDMG 58130 SF - Diamond Heights	18.10.89	0.1035
Northridge	USC 90032 LA - N Figueroa St	17.01.94	0.1534
Cape Mendocino	CDMG 89530 Shelter Cove Airport	25.04.92	0.1954
Loma Prieta	CDMG 57064 Fremont - Mission San Jose	18.10.89	0.1282
San Fernando	CDMG 285 Santa Felita Dam	09.02.71	0.1562
Loma Prieta	CDMG 57383 Gilroy Array #6	18.10.89	0.1568
Loma Prieta	USGS 1678 Golden Gate Bridge	18.10.89	0.1633
Kocaeli	ERD 99999 Goynuk	17.08.99	0.1387
Coalinga	CDMG 36411 Parkfield - Cholame 4W	02.05.83	0.1365
Coalinga	CDMG 36408 Parkfield - Fault Zone 3	02.05.83	0.1521
Imperial Valley	USGS 286 Superstition Mtn Camera	15.10.79	0.1598
Coalinga	CDMG 36420 Parkfield - Gold Hill 3W	02.05.83	0.1324
Coalinga	CDMG 36437 Parkfield - Stone Corral 3E	02.05.83	0.1206
Coalinga	CDMG 46175 Slack Canyon	02.05.83	0.1534
Imperial Valley	USGS 286 Superstition Mtn Camera	15.10.79	0.1598
Chi Chi	CWB 99999 HWA022	20.09.99	0.1083
Chi Chi	CWB 99999 HWA032	20.09.99	0.1430
Chi Chi	CWB 99999 HWA033	20.09.99	0.1702
Chi Chi	CWB 99999 HWA034	20.09.99	0.1369
Chi Chi	CWB 99999 HWA045	20.09.99	0.1585
Chi Chi	CWB 99999 HWA056	20.09.99	0.1045
Chi Chi	CWB 99999 HWA059	20.09.99	0.1280
Loma Prieta	CDMG 58498 Hayward - BART Sta	18.10.89	0.1621
Coalinga	CDMG 36431 Parkfield - Fault Zone 7	02.05.83	0.1218
Coalinga	CDMG 36449 Parkfield - Fault Zone 8	02.05.83	0.1198
Coalinga	CDMG 36431 Parkfield - Fault Zone 7	02.05.83	0.1218
Coalinga	CDMG 36449 Parkfield - Fault Zone 8	02.05.83	0.1198
Coalinga	CDMG 36445 Parkfield - Fault Zone 15	02.05.83	0.1664
Chi Chi	CWB 99999 ILA067	20.09.99	0.1873
San Fernando	CDMG 127 Lake Hughes #9	09.02.71	0.1395
Northridge	CDMG 127 Lake Hughes #9	17.01.94	0.1627

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Northridge	CDMG 127 Lake Hughes #9	17.01.94	0.1627
Sierra Madre	CDMG 24592 LA - City Terrace	28.06.91	0.1016
Griva	ITSAK 99999 Edessa	21.12.90	0.1038
Northridge	USC 90045 Lawndale - Osage Ave	17.01.94	0.1145
Northridge	USC 90044 Rancho Palos Verdes – Luconia	17.01.94	0.1414
Northridge	CDMG 24055 Leona Valley #5 – Ritter	17.01.94	0.1275
Northridge	USC 90046 Manhattan Beach – Manhattan	17.01.94	0.1657
Northridge	USC 90060 La Crescenta - New York	17.01.94	0.1731
San Fernando	CIT 80053 Pasadena - CIT Athenaeum	09.02.71	0.1008
San Fernando	USGS 262 Palmdale Fire Station	09.02.71	0.1300
San Fernando	CDWR 269 Pearblossom Pump	09.02.71	0.1387
Loma Prieta	CDMG 58222 SF – Presidio	18.10.89	0.1406
Northridge	CDMG 25148 Point Mugu - Laguna Peak	17.01.94	0.1743
Northridge	CDMG 14405 Rolling Hills Est-Rancho Vista	17.01.94	0.1077
San Fernando	LAFC 104 Santa Anita Dam	09.02.71	0.1692
Northridge	USC 90047 Playa Del Rey – Saran	17.01.94	0.1040
Kern County	USGS 283 Santa Barbara Courthouse	21.07.52	0.1070
Cape Mendocino	CDMG 89530 Shelter Cove Airport	25.04.92	0.1954
Palm Springs	CDMG 12206 Silent Valley - Poppet Flat	08.07.86	0.1219
Coyote Lake	CDMG 47315 SJB Overpass, Bent 3 g.l.	06.08.79	0.1036
Coyote Lake	CDMG 47315 SJB Overpass, Bent 5 g.l.	06.08.79	0.1003
Coyote Lake	CDMG 47126 San Juan Bautista, 24 Polk St	06.08.79	0.1011
Northridge	CDMG 24401 San Marino - SW Academy	17.01.94	0.1340
Sierra Madre	CDMG 24592 LA - City Terrace	28.06.91	0.1016
Westmoreland	USGS 286 Superstition Mtn Camera	26.04.81	0.1010
Kern County	USGS 1095 Taft Lincoln School	21.07.52	0.1728
Chi Chi	CWB 99999 TAP032	20.09.99	0.1154
Chi Chi	CWB 99999 TAP052	20.09.99	0.1095
Chi Chi	CWB 99999 TCU015	20.09.99	0.1125
Chi Chi	CWB 99999 TCU026	20.09.99	0.1014
Chi Chi	CWB 99999 TCU029	20.09.99	0.1771
Chi Chi	CWB 99999 TCU031	20.09.99	0.1307
Chi Chi	CWB 99999 TCU033	20.09.99	0.1817
Chi Chi	CWB 99999 TCU034	20.09.99	0.1991
Chi Chi	CWB 99999 TCU039	20.09.99	0.1862
Chi Chi	CWB 99999 TCU040	20.09.99	0.1268
Chi Chi	CWB 99999 TCU046	20.09.99	0.1227

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU048	22.09.99	0.1106
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU067	20.09.99	0.1014
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU070	22.09.99	0.1194
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU072	20.09.99	0.1591
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU075	20.09.99	0.1810
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU076	25.09.99	0.1285
Chi Chi	CWB 99999 TCU098	20.09.99	0.1075
Chi Chi	CWB 99999 TCU105	20.09.99	0.1253
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU106	22.09.99	0.1282
Chi Chi	CWB 99999 TCU107	20.09.99	0.1429
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU109	22.09.99	0.1575
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU116	20.09.99	0.1279
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU122	20.09.99	0.1010
Chi Chi aftershock	CWB 9999936 TCU129	20.09.99	0.1173
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU138	20.09.99	0.1290
Chi Chi	CWB 99999 TCU147	20.09.99	0.1212
Northridge	CDMG 24611 LA - Temple & Hope	17.01.94	0.1647
Palm Spring	CDMG 13172 Temecula - 6th & Mercedes	08.07.86	0.1056
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TTN041	22.09.99	0.1338
Northridge	USC 90061 Big Tujunga, Angeles Nat F	17.01.94	0.1999
Whittier Narrows	USGS 951 Brea Dam	01.10.87	0.1324
Irpinia	ENEL 99999 Brienza	23.11.80	0.2137
Edgecombe	99999 Matahina Dam	02.03.87	0.2926
Loma Prieta	USGS 1652 Anderson Dam	18.10.89	0.2385
Sierra Madre	CDMG 23210 Cogswell Dam	28.06.91	0.2771
Chi Chi	CWB 99999 CHY010	20.09.99	0.2119
Chi Chi	CWB 99999 CHY014	20.09.99	0.2452
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY024	22.09.99	0.2461
Loma Prieta	CDMG 57217 Coyote Lake Dam	18.10.89	0.2947
Northridge	USC 90033 LA - Cypress Ave	17.01.94	0.2063
Northridge	USC 90034 LA - Fletcher Dr	17.01.94	0.2071
Northridge	USC 90063 Glendale - Las Palmas	17.01.94	0.2558
Northridge	USC 90019 San Gabriel - E Grand Ave	17.01.94	0.2087
Palm Springs	CDMG 12204 San Jacinto – Soboba	08.07.86	0.2314
Northridge	CDMG 24607 Lake Hughes #12°	17.01.94	0.2153
Loma Prieta	CDMG 47524 Hollister - South & Pine	18.10.89	0.2794

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Northridge	CDMG 24592 LA - City Terrace	17.01.94	0.2672
Northridge	CDMG 24283 Moorpark - Fire Sta	17.01.94	0.2291
San Fernando	CDMG 24278 Castaic - Old Ridge Route	09.02.71	0.2994
Loma Prieta	USGS 1601 Palo Alto - SLAC Lab	18.10.89	0.2281
Northridge	USC 90095 Pasadena - N Sierra Madre	17.01.94	0.2337
Chi Chi	CWB 99999 TCU070	20.09.99	0.2058
Whittier Narrows	USGS 951 Brea Dam	01.10.87	0.2314
Chi Chi	CWB 99999 CHY041	20.09.99	0.4625
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY080	20.09.99	0.3342
Chi Chi	CWB 9999917 NST	20.09.99	0.3852
Northridge	CDMG 24278 Castaic - Old Ridge Route	17.01.94	0.4898
Chi Chi	CWB 99999 TCU045	20.09.99	0.4730
Chi Chi	CWB 99999 TCU047	20.09.99	0.3643
Chi Chi	CWB 99999 TCU095	20.09.99	0.5283
Chi Chi aftershock	CWB 9999936 TCU129	22.09.99	0.3911
Northridge	CDMG 24605 LA - Univ. Hospital	17.01.94	0.3492
Morgan Hill	USGS/CDMG 58376 APEEL 1E – Hayward	24.04.84	0.0367
Whittier Narrows	CDMG 24087 Arleta - Nordhoff Fire Sta	01.10.87	0.0937
Irpinia	ENEL 99999 Bovino	23.11.80	0.0448
Whittier Narrows	CDMG 24389 LA - Century City CC North	01.10.87	0.0868
Whittier	USC 90054 LA - Centinela St	01.10.87	0.0523
Friuli	8005 Conegliano	06.05.76	0.0586
Friuli	8004 Codroipo	06.05.76	0.0233
Whittier Narrows	CDMG 24390 LA - Century City CC South	01.10.87	0.0612
Chalfant Valley	CDMG 54099 Convict Creek	21.07.86	0.0635
Borrego Mountain	USGS 117 El Centro Array #9	09.04.68	0.0876
Whittier	USC 90002 Fountain Valley – Euclid	01.10.87	0.0669
Whittier	USC 90016 LA - N Faring Rd	01.10.87	0.0507
Whittier Narrows	CDMG 13122 Featherly Park – Maint	01.10.87	0.0874
Morgan Hill	CDMG 57066 Agnews State Hospital	24.04.84	0.0330
Whittier Narrows	CDMG 14395 LB - Harbor Admin FF	01.10.87	0.0602
Whittier Narrows	CDMG 24526 Lancaster - Med Off FF	01.10.87	0.0642
Whittier Narrows	CDMG 24309 Leona Valley #6	01.10.87	0.0466
Chalfant Valley	CDMG 54214 Long Valley Dam	21.07.86	0.0747
Chalfant Valley	CDMG 54214 Long Valley Dam	21.07.86	0.0829
Whittier Narrows	CDMG 24396 Malibu - Point Dume Sch	01.10.87	0.0428
Chalfant Valley	CDMG 54T04 Mammoth Lakes Sheriff Subst	21.07.86	0.0499

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chalfant Valley	USGS 1661 McGee Creek – Surface	21.07.86	0.0760
Northridge	USC 90099 Arcadia - Arcadia Av	17.01.94	0.0951
Whittier Narrows	CDMG 24279 Newhall - Fire Sta	01.10.87	0.0631
Whittier Narrows	CDMG 23525 Pomona - 4th & Locust FF	01.10.87	0.0629
Whittier Narrows	CDMG 24274 Rosamond - Goode Ranch	01.10.87	0.0650
Whittier	USC 90001 Sylmar - Sayre St	01.10.87	0.0456
Whittier	USC 90090 Villa Park - Serrano Ave	01.10.87	0.0553
Whittier	USC 90082 Terminal Island - S Seaside	01.10.87	0.0439
Whittier	USC 90008 Sun Valley – Sunland	01.10.87	0.0812
Chalfant Valley	CDMG 54101 Tinemaha Res. Free Field	21.07.86	0.0387
Whittier	USC 90052 Calabasas - N Las Virg	01.10.87	0.0361
Whittier	USC 90088 Anaheim - W Ball Rd	01.10.87	0.0593
Whittier	USC 90056 Newhall - W Pico Canyon Rd.	01.10.87	0.0701
Palm Springs	USGS 5160 Anza Fire Station	08.07.86	0.0890
Northridge	USC 90070 Covina - W Badillo	17.01.94	0.0935
Landers	CDMG 32075 Baker Fire Station	28.06.92	0.0990
Northridge	CDMG 23572 Mt Baldy - Elementary Sch	17.01.94	0.0758
Chalfant	CDMG 54100 Benton	20.07.86	0.0548
Irpinia	ENEL 99999 Bovino	23.11.80	0.0243
Irpinia	8004 Codroipo	15.09.76	0.0753
Ierissos	99999 Ierissos	06.08.83	0.0255
Irpinia	ENEL 99999 Mercato San Severino	23.11.80	0.0424
Chalfant	CDMG 54T03 Lake Crowley - Shehorn Res.	20.07.86	0.0404
Kocaeli	KOERI 99999 Bursa Tofas	17.08.99	0.0994
Loma Prieta	USGS 1210 Bear Valley #1, Fire Station	18.10.89	0.0784
Dinar	ERD 99999 Cardak	10.01.95	0.0629
Chi Chi	CWB 9999917 CHK	20.09.99	0.0483
Chi Chi	CWB 99999 CHY004	20.09.99	0.0985
Chi Chi	CWB 99999 CHY012	20.09.99	0.0570
Chi Chi	CWB 99999 CHY016	20.09.99	0.0961
Chi Chi	CWB 99999 CHY017	20.09.99	0.0558
Chi Chi	CWB 99999 CHY023	20.09.99	0.0545
Chi Chi	CWB 99999 CHY026	20.09.99	0.0715
Chi Chi	CWB 99999 CHY027	20.09.99	0.0596
Chi Chi	CWB 99999 CHY032	20.09.99	0.0892
Chi Chi	CWB 99999 CHY033	20.09.99	0.0620
Chi Chi	CWB 99999 CHY044	20.09.99	0.0682

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi	CWB 99999 CHY058	20.09.99	0.0546
Chi Chi	CWB 99999 CHY059	20.09.99	0.0525
Chi Chi	CWB 99999 CHY060	20.09.99	0.0465
Chi Chi	CWB 99999 CHY063	20.09.99	0.0642
Chi Chi	CWB 99999 CHY066	20.09.99	0.0478
Chi Chi	CWB 99999 CHY067	20.09.99	0.0573
Chi Chi	CWB 99999 CHY069	20.09.99	0.0425
Chi Chi	CWB 99999 CHY070	20.09.99	0.0431
Chi Chi	CWB 99999 CHY071	20.09.99	0.0668
Chi Chi	CWB 99999 CHY082	20.09.99	0.0697
Chi Chi	CWB 99999 CHY090	20.09.99	0.0747
Chi Chi	CWB 99999 CHY093	20.09.99	0.0634
Chi Chi	CWB 99999 CHY094	20.09.99	0.0598
Chi Chi	CWB 99999 CHY096	20.09.99	0.0397
Chi Chi	CWB 99999 CHY099	20.09.99	0.0574
Chi Chi	CWB 99999 CHY100	20.09.99	0.0671
Chi Chi	CWB 99999 CHY116	20.09.99	0.0585
Palm Springs	CDOT 754 Colton Interchange – Vault	08.07.86	0.0511
San Fernando	USGS 113 Colton - So Cal Edison	09.02.71	0.0377
San Fernando	ACOE 108 Carbon Canyon Dam	09.02.71	0.0669
Northridge	USC 90073 Hacienda Heights – Colima	17.01.94	0.0582
Dinar	ERD 99999 Denizli	10.01.95	0.0159
Loma Prieta	USGS 1689 Dublin - Fire Station	18.10.89	0.0725
Gulf of Aqaba	IPRG 99999 Eilat	22.11.95	0.0954
Lazio-Abruzzo	ENEL 99999 Garigliano-Centrale Nucleare	07.05.84	0.0678
Landers	CDMG 12331 Hemet Fire Station	28.06.92	0.0847
Palm Springs	CDMG 12202 San Jacinto - Valley Cemetary	08.07.86	0.0569
Coalinga	CDMG 36412 Parkfield - Cholame 4AW	02.05.83	0.0662
Coalinga	CDMG 36452 Parkfield - Cholame 1E	02.05.83	0.0950
Coalinga	CDMG 36410 Parkfield - Cholame 3W	02.05.83	0.0918
Coalinga	CDMG 36226 Parkfield - Cholame 8W	02.05.83	0.0932
Morgan Hill	USGS 1028 Hollister City Hall	24.04.84	0.0666
Morgan Hill	USGS 1656 Hollister Diff Array #3	24.04.84	0.0791
Morgan Hill	USGS 1656 Hollister Diff Array #1	24.04.84	0.0936
Morgan Hill	USGS 1656 Hollister Diff Array #5	24.04.84	0.0933
Morgan Hill	USGS 1656 Hollister Diff. Array	24.04.84	0.0896
Palm Springs	CDMG 23321 Hesperia	08.07.86	0.0364
Coalinga	CDMG 36421 Parkfield - Gold Hill 2E	02.05.83	0.0793

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Imperial Valley	CDMG 11023 Niland Fire Station	15.10.79	0.0855
Landers	CDMG 23542 San Bernardino-E	28.06.92	0.0838
Coalinga	CDMG 36415 Parkfield - Gold Hill 1W	02.05.83	0.0888
Imperial Valley	USGS 5052 Plaster City	15.10.79	0.0501
Chi Chi	CWB 9999917 HSN	20.09.99	0.0680
Coalinga	CDMG 36447 Parkfield - Vineyard Cany 2W	02.05.83	0.0879
Coyote Lake	CDMG 57191 Halls Valley	06.08.79	0.0416
Chi Chi	CWB 99999 HWA006	20.09.99	0.0888
Chi Chi	CWB 99999 HWA007	20.09.99	0.0758
Chi Chi	CWB 99999 HWA009	20.09.99	0.0894
Chi Chi	CWB 99999 HWA011	20.09.99	0.0956
Chi Chi	CWB 99999 HWA012	20.09.99	0.0731
Chi Chi	CWB 99999 HWA015	20.09.99	0.0898
Chi Chi	CWB 99999 HWA016	20.09.99	0.0857
Chi Chi	CWB 99999 HWA017	20.09.99	0.0813
Chi Chi	CWB 99999 HWA028	20.09.99	0.0988
Chi Chi	CWB 99999 HWA030	20.09.99	0.0729
Chi Chi	CWB 99999 HWA036	20.09.99	0.0659
Chi Chi	CWB 99999 HWA041	20.09.99	0.0796
Chi Chi	CWB 99999 HWA043	20.09.99	0.0725
Chi Chi	CWB 99999 HWA049	20.09.99	0.0949
Coalinga	CDMG 36414 Parkfield - Fault Zone 4	02.05.83	0.0937
Palm Springs	CDMG 12026 Indio - Coachella Canal	08.07.86	0.0518
Palm Springs	USGS 5067 Indio	08.07.86	0.0952
Lazio-Abruzzo	ENEL 99999 Isernia-Sant'Agapito	07.05.84	0.0683
Northridge	USC 90094 Bell Gardens – Jaboneria	17.01.94	0.0792
Kozani	ITSAK 99999 Kardista	13.05.95	0.0208
Northridge	CDMG 23573 Wrightwood - Nielson Ranch	17.01.94	0.0438
Kozani	ITSAK 99999 Larisa	13.05.95	0.0373
Morgan Hill	CDMG 56012 Los Banos	24.04.84	0.0560
Palm Springs	CDMG 22T13 Landers Fire Station	08.07.86	0.0867
Griva	ITSAK 99999 Kilkis	21.12.90	0.0425
Northridge	CDMG 34093 Mojave - Hwys 14 & 58	17.01.94	0.0451
Northridge	CDMG 34237 Mojave - Oak Creek Canyon	17.01.94	0.0522
Northridge	CDMG 24586 Neenach - Sacatara Ck	17.01.94	0.0647
San Fernando	CDWR 994 Gorman - Oso Pump Plant	09.02.71	0.0874
Kobe	99999 OSAJ	16.01.95	0.0762
Northridge	CDMG 23597 Phelan - Wilson Ranch	17.01.94	0.0568

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
San Fernando	CDMG 272 Port Hueneme	09.02.71	0.0280
Lazio-Abruzzo	ENEL 99999 Pontecorvo	07.05.84	0.0680
Landers	CDMG 12025 Palm Springs Airport	28.06.92	0.0929
Northridge	CDMG 25281 Port Hueneme - Naval Lab.	17.01.94	0.0965
San Fernando	USGS 411 2516 Via Tejon PV	09.02.71	0.0324
Northridge	CDMG 24092 Rosamond – Airport	17.01.94	0.0555
Lazio-Abruzzo	ENEL 99999 Roccamonfina	07.05.84	0.0363
Northridge	USC 90090 Villa Park - Serrano Ave	17.01.94	0.0433
Morgan Hill	CDMG 58223 SF Intern. Airport	24.04.84	0.0448
Loma Prieta	USGS 1675 SF - 1295 Shafter	18.10.89	0.0853
Victoria,Mexico	UNAMUCSD 6619 SAHOP Casa Flores	09.06.80	0.0791
Loma Prieta	CDMG 47179 Salinas - John & Work	18.10.89	0.0959
Northridge	USC 90071 West Covina - S Orange Ave	17.01.94	0.0636
Northridge	USC 90089 Tustin - E Sycamore	17.01.94	0.0668
San Fernando	USGS 130 LB - Terminal Island	09.02.71	0.0296
Northridge	CDMG 25340 Ventura - Harbor & California	17.01.94	0.0698
Kozani	ITSAK 99999 Veroia	13.05.95	0.0295
Northridge	USC 90083 Huntington Bch – Waikiki	17.01.94	0.0775
Northridge	USC 90088 Anaheim - W Ball Rd	17.01.94	0.0658
Northridge	CDMG 24475 Lancaster - Fox Airfield Grnd	17.01.94	0.0737
San Fernando	CDWR 1102 Wheeler Ridge – Ground	09.02.71	0.0287
Northridge	CDMG 13660 Hemet - Ryan Airfield	17.01.94	0.0537
Southern	USGS 2734 Icy Bay	28.02.79	0.1293
Northridge	CDMG 14403 LA - 116th St School	17.01.94	0.1733
Manjl,Iran	BHRC 99999 Abhar	06.20.90	0.1703
Manjl,Iran	BHRC 99999 Qazvin	06.20.90	0.1595
Manjl,Iran	BHRC 99999 Tonekabun	06.20.90	0.1109
Hector Mine Sat	CDMG 11625 Mecca - CVWD Yard	16.10.89	0.1019
Hector Mine Sat	CDMG 12543 Indio - Riverside Co Fair Grnds	16.10.89	0.1078
Hector Mine Sat	CDMG 21081 Amboy	16.10.89	0.1935
Hector Mine Sat	CDMG 22791 Big Bear Lake - Fire Station	16.10.89	0.1667
Hector Mine Sat	CDMG 32075 Baker Fire Station	16.10.89	0.1086
Hector Mine Sat	CDMG 24577 Fort Irwin	16.10.89	0.1214
Loma Prieta	CDMG 58393 APEEL 2E Hayward Muir Sch	18.10.89	0.1680
Whittier Narrows	CDMG 24157 LA - Baldwin Hills	01.10.87	0.1503
Whittier	USC 90012 Burbank - N Buena Vista	01.10.87	0.1900
Landers	CDMG 21081 Amboy	28.06.92	0.1298

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Whittier	USC 90053 Canoga Park - Topanga Can	01.10.87	0.1397
Loma Prieta	CDMG 57066 Agnews State Hospital	18.10.89	0.1547
Superstition Hills	USGS 5210 Wildlife Liquef. Array	24.11.87	0.1373
Whittier	USC 90005 Pacoima Kagel Canyon USC	01.10.87	0.1329
Whittier	USC 90057 Canyon Country - W Lost Cany	01.10.87	0.1037
Irpinia	ENEL 99999 Mercato San Severino	23.11.80	0.1227
Whittier	USC 90013 Beverly Hills - 14145 Mulhol	01.10.87	0.1083
Whittier Narrows	CDMG 24303 LA - Hollywood Stor FF	01.10.87	0.1681
Whittier	USC 90007 Panorama City – Roscoe	01.10.87	0.1071
Whittier	USC 90006 Sun Valley - Roscoe Blvd	01.10.87	0.1932
Whittier	USC 90003 Northridge - 17645 Saticoy St	01.10.87	0.1443
Whittier	USC 90091 LA - Saturn St	01.10.87	0.1232
Kocaeli	ITU 99999 Atakoy	17.08.99	0.1248
Whittier	USC 90023 LA - W 70th St	01.10.87	0.1566
Superstition Hills	USGS 5060 Brawley Airport	24.11.87	0.1349
Landers	CDMG 33083 Boron Fire Station	28.06.92	0.1030
Northridge	USC 90069 Baldwin Park - N Holly	17.01.94	0.1079
Superstition Hills	USGS 5210 Wildlife Liquef. Array	24.11.87	0.1914
Superstition Hills	USGS 9401 Kornbloom Road	24.11.87	0.1210
Chalfant	CDMG 54171 Bishop - LADWP South St	20.07.86	0.1155
Tabas	70 Boshrooyeh	16.09.78	0.1089
Northridge	USC 90086 Buena Park - La Palma	17.01.94	0.1227
Superstition Hills	USGS 5052 Plaster City	24.11.87	0.1567
Westmoreland	USGS 5060 Brawley Airport	26.04.81	0.1571
Loma Prieta	USGS 1479 Bear Valley #10	18.10.89	0.1017
Loma Prieta	USGS 1481 Bear Valley #12, Williams Ranch	18.10.89	0.1559
Superstition Hills	USGS 5062 Salton Sea Wildlife Refuge	24.11.87	0.1346
Morgan Hill	CDMG 47125 Capitola	24.04.84	0.1175
Northridge	USC 90078 Compton - Castlegate St	17.01.94	0.1058
Victoria,Mexico	UNAMUCSD 6621 Chihuahua	09.06.80	0.1179
Chi Chi	CWB 99999 CHY002	20.09.99	0.1262
Chi Chi	Station: CWB 99999 CHY008	20.09.99	0.1205
Chi Chi	CWB 99999 CHY015	20.09.99	0.1588
Chi Chi	CWB 99999 CHY025	20.09.99	0.1497
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY027	25.09.99	0.1039
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY030	22.09.99	0.1024
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY032	25.09.99	0.1514
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY037	25.09.99	0.1401

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi	CWB 99999 CHY039	20.09.99	0.1058
Chi Chi	CWB 99999 CHY047	20.09.99	0.1894
Chi Chi	CWB 99999 CHY055	20.09.99	0.1024
Chi Chi	CWB 99999 CHY065	20.09.99	0.1033
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY082	25.09.99	0.1959
Chi Chi	CWB 99999 CHY088	20.09.99	0.1838
Chi Chi	CWB 99999 CHY092	20.09.99	0.1031
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY093	25.09.99	0.1071
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY101	20.09.99	0.1351
Chi Chi	CWB 99999 CHY104	20.09.99	0.1810
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY111	22.09.99	0.1085
Loma Prieta	CDMG 57504 Coyote Lake Dam	18.10.89	0.1718
Northridge	CDMG 25282 Camarillo	17.01.94	0.1151
Kocaeli	KOERI 99999 Cekmece	17.08.99	0.1564
Northridge	USC 90084 Lakewood - Del Amo Blvd	17.01.94	0.1295
Landers	CDMG 12149 Desert Hot Springs	28.06.92	0.1407
Santa Cruz MTNS	CDMG 58664 Dumbarton Bridge West End	17.10.89	0.1285
Northridge	USC 90079 Downey – Birchdale	17.01.94	0.1568
Northridge	CDMG 24575 Elizabeth Lake	17.01.94	0.1331
Cape Mendocino	CDMG 89509 Eureka - Myrtle & West	25.04.92	0.1668
Northridge	USC 90066 El Monte - Fairview Av	17.01.94	0.1426
Kocaeli	KOERI 99999 Fatih	17.08.99	0.1774
Northridge	CDMG 13122 Featherly Park – Maint	17.01.94	0.1014
Tabas	71 Ferdows	16.09.78	0.1084
Northridge	USC 90087 Brea - S Flower Av	17.01.94	0.1103
Loma Pietra	USGS 1686 Fremont - Emerson Court	18.10.89	0.1652
Landers	CDMG 24577 Fort Irwin	28.06.92	0.1288
Northridge	USC 90085 Garden Grove - Santa Rita	17.01.94	0.1070
Palm Springs	CDMG 13201 Winchester Page Bros R	08.07.86	0.1116
Palm Springs	CDMG 12331 Hemet Fire Station	08.07.86	0.1276
Coalinga	CDMG 36228 Parkfield - Cholame 2WA	02.05.83	0.1107
Coalinga	CDMG 36227 Parkfield - Cholame 5W	02.05.83	0.1364
Coalinga	CDMG 36451 Parkfield - Cholame 6W	02.05.83	0.1136
Imperial Valley	USGS 5061 Calipatria Fire Station	15.10.79	0.1033
Imperial Valley	USGS 5066 Coachella Canal #4	15.10.79	0.1220
Coalinga	CDMG 36407 Parkfield - Fault Zone 1	02.05.83	0.1431
Morgan Hill	USGS 1656 Hollister Diff Array #4	24.04.84	0.1017
Imperial Valley	USGS 5056 El Centro Array #1	15.10.79	0.1418

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Imperial Valley	USGS 931 El Centro Array #12	15.10.79	0.1382
Imperial Valley	USGS 5059 El Centro Array #13	15.10.79	0.1212
Kobe	99999 HIK	16.01.95	0.1426
Coalinga	CDMG 36138 Parkfield - Fault Zone 12	02.05.83	0.1127
Coalinga	CDMG 36455 Parkfield - Vineyard Cany 1E	02.05.83	0.1815
Imperial Valley	UNAMUCSD 6610 Victoria	15.10.79	0.1353
Loma Prieta	CDMG 57191 Halls Valley	18.10.89	0.1155
Coalinga	CDMG 36176 Parkfield - Vineyard Cany 3W	02.05.83	0.1171
Chi Chi	CWB 99999 HWA2	20.09.99	0.1291
Chi Chi	CWB 99999 HWA005	20.09.99	0.1398
Chi Chi	CWB 99999 HWA013	20.09.99	0.1247
Chi Chi	CWB 99999 HWA014	20.09.99	0.1019
Chi Chi	CWB 99999 HWA019	20.09.99	0.1389
Chi Chi	CWB 99999 HWA027	20.09.99	0.1087
Chi Chi	CWB 99999 HWA037	20.09.99	0.1227
Chi Chi	CWB 99999 HWA048	20.09.99	0.1477
Chi Chi	CWB 99999 HWA051	20.09.99	0.1540
Chi Chi	CWB 9999917 HWA	20.09.99	0.1267
Coalinga	CDMG 36413 Parkfield - Fault Zone 2	02.05.83	0.1227
Coalinga	CDMG 36457 Parkfield - Fault Zone 16	02.05.83	0.1681
Chi Chi	CWB 99999 ILA013	20.09.99	0.1387
Chi Chi	CWB 99999 ILA030	20.09.99	0.1080
Landers	CDMG 12026 Indio - Coachella Canal	28.06.92	0.1063
Northridge	CDMG 14196 Inglewood - Union Oil	17.01.94	0.1018
Kocaeli	ERD 99999 Iznik	17.08.99	0.1107
Northridge	CDMG 24309 Leona Valley #6	17.01.94	0.1416
Northridge	CDMG 24396 Malibu - Point Dume Sch	17.01.94	0.1046
Landers	USGS 100 Mission Creek Fault	28.06.92	0.1286
Landers	USGS 5071 Morongo Valley	28.06.92	0.1615
Northridge	USC 90096 LA - S. Vermont Ave	17.01.94	0.1217
Westmoreland	CDMG 11023 Niland Fire Station	26.04.81	0.1337
Landers	USGS 5070 North Palm Springs	28.06.92	0.1311
Northridge	CDMG 24612 LA - Pico & Sentous	17.01.94	0.1412
Loma Prieta	CDMG 58505 Richmond City Hall	18.10.89	0.1268
Northridge	USC 90072 La Puente - Ringrove Av	17.01.94	0.1147
Palm Springs	USGS 5038 Sunnymead	08.07.86	0.1260
Northridge	USC 90018 Hollywood - Willoughby Ave	17.01.94	0.1976
Chi Chi	CWB 99999 TAP017	20.09.99	0.1077

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Chi Chi	CWB 99999 TAP021	20.09.99	0.1125
Chi Chi	CWB 99999 TCU036	20.09.99	0.1345
Chi Chi	CWB 99999 TCU038	20.09.99	0.1494
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU050	22.09.99	0.1410
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU051	22.09.99	0.1255
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU055	22.09.99	0.1123
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU056	22.09.99	0.1134
Chi Chi	CWB 99999 TCU059	20.09.99	0.1595
Chi Chi	CWB 99999 TCU061	20.09.99	0.1373
Chi Chi	CWB 99999 TCU064	20.09.99	0.1204
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU065	20.09.99	0.1366
Chi Chi	CWB 99999 TCU111	20.09.99	0.1106
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU112	22.09.99	0.1123
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU113	22.09.99	0.1275
Chi Chi	CWB 99999 TCU115	20.09.99	0.1051
Chi Chi	CWB 99999 TCU117	20.09.99	0.1321
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU118	22.09.99	0.1163
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU123	22.09.99	0.1036
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU125	25.09.99	0.1190
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU140	22.09.99	0.1107
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU141	25.09.99	0.1444
Chi Chi aftershock	CWB 99999 TCU145	22.09.99	0.1301
Northridge	USC 90025 LA - E Vernon Ave	17.01.94	0.1467
Northridge	USC 90077 Santa Fe Springs - E.Joslin	17.01.94	0.1350
Northridge	USC 90082 Terminal Island - S Seaside	17.01.94	0.1583
San Fernando	USGS 289 Whittier Narrows Dam	09.02.71	0.1155
Kocaeli	ITU 99999 Zeytinburnu	17.08.99	0.1088
Whittier Narrows	CDMG 14403 LA - 116th St School	01.10.87	0.3408
Whittier	USC 90078 Compton - Castlegate St	01.10.87	0.3306
Whittier	CDMG 24436 Tarzana - Cedar Hill	01.10.87	0.5959
Northridge	USC 90054 LA - Centinela St	17.01.94	0.3686
Landers	SCE 23 Coolwater	23.07.92	0.3733
Loma Prieta	CDMG 57425 Gilroy Array #7	18.10.89	0.3117
Northridge	CDMG 24400 LA - Obregon Park	17.01.94	0.4673
Northridge	CDMG 24303 LA - Hollywood Stor FF	17.01.94	0.3354
Northridge	CDMG 24538 Santa Monica City Hall	17.01.94	0.5908
Northridge	USC 90091 LA - Saturn St	17.01.94	0.4536
Northridge	CDMG 24303 LA - Hollywood Stor FF	17.01.94	0.3699

Sisma	Stazione	Data	PGA (g)
			m/s ²
Morgan Hill	CDMG 58375 Foster City - APEEL 1	24.04.84	0.0555
Chi Chi	CWB 99999 CHY054	20.09.99	0.0917
Chi Chi	CWB 99999 CHY076	20.09.99	0.0806
Chi Chi	CWB 99999 CHY078	20.09.99	0.0648
Chi Chi	CWB 99999 CHY107	20.09.99	0.0975
Chi Chi	CWB 99999 ILA004	20.09.99	0.0719
Chi Chi	CWB 99999 ILA044	20.09.99	0.0801
Loma Prieta	USGS 1515 Foster City - Menhaden Court	18.10.89	0.0982
Chi Chi	CWB 9999917 TAI1	20.09.99	0.0661
Northridge	USC 90081 Carson - Water St	17.01.94	0.0859
Chi Chi	CWB 9999917 WSF	20.09.99	0.0696
Whittier	USC 90081 Carson - Water St	01.10.87	0.1212
Chi Chi aftershock	CWB 99999 CHY076	25.09.99	0.1512
Loma Prieta	USGS 1590 Larkspur Ferry Terminal	18.10.89	0.1210
Loma Prieta	CDMG 58117 Treasure Island	18.10.89	0.1320
Loma Prieta	CDMG 58375 Foster City - APEEL 1	18.10.89	0.2912
Loma Prieta	USGS 1002 APEEL 2 - Redwood City	18.10.89	0.2488
Kocaeli	KOERI 99999 Ambarli	17.08.99	0.2228