



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Ingegneria

Tesi di Laurea Specialistica in:

**Ingegneria Civile**

**GENERAZIONE DI ACCELEROGRAMMI NON STAZIONARI  
COMPATIBILI CON GLI SPETTRI DELLE NTC 2008**

---

**Candidato:**

**Samuel Alfonso Maracay Méndez**

**Relatore:**

**Prof. Ing. Marcello Ciampoli**

Anno accademico 2011/2012

## RESUMEN

En el presente trabajo se busca determinar el grado de dano que puede presentar una estructura cualquiera sujeta a la accion de una forzante sismica representada a traves de acelerogramas sismicos. Para ello se tomaron en consideracion dos metodos distintos de definicion de la accion sismica de proyecto, la cual debia cumplir con las precipciones establecidas en la normativa italiana. Con esta idea en mente, se definieron 5 set de acelerogramas que en media cumplieran con la espectro – compatibilidad, y se procedio a la modificacion de dichos acelerogramas con un metodo que permite anadir contributos energeticos a traves de funciones wavelet (funciones que tienen la característica primordial de permitir su ubicacion bien precisa en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias). Luego de haber definido la accion sismica de proyecto con dichos metodos, se procedio a la definicion de un sistema a un grado de libertad, para poder realizar analisis no lineares de dichos sistemas, variando en cada uno de ellos las propiedades de resistencia y rigidez con el fin de ver, a grosso modo, como seria la respuesta de la estructura, de esta manera definida, a los diversos acelerogramas definidos precedentemente. Una vez realizado el analisis de los diferentes sistemas a un grado de libertad, se procedio al analisis de la respuesta de cada sistema a la accion sismica de proyecto, a traves de espectros de ductilidad ciclica, espectros de ductilidad cinematica, espectros de energia isteretica y el indice de Park y Ang. Una vez obtenidos los diferentes espectros de respuesta de la estructura su pudo llegar a la conclusion general que los set de acelerogramas naturales daban casi siempre una respuesta de la estructura que era ligeramente menor de cuanto se evidencio en la respuesta de la estructura sujeta a los set de acelerogramas modificados con las wavelets. Esta subestima de la respuesta se refleja mayoritariamente en los graficos de energia isteretica donde la variacion de la respuesta a los acelerogramas modificados es bastante grande, respecto a la respuesta con acelerogramas naturales.

## Sommario

|   |    |
|---|----|
| INTRODUZIONE.....   | 4  |
| 1 DEFINIZIONE AZIONE SISMICA E PRESCRIZIONI DI NORMATIVA .....  | 9  |
| 1.1 Premessa .....  | 9  |
| 1.2 Spettro elastico di normativa NTC 2008 .....                | 11 |
| 1.3 Accelerogrammi – Prescrizioni di normativa .....            | 13 |
| 1.3.1 NTC 2008 .....  | 13 |
| 1.3.2 Eurocodice 8 .....  | 14 |
| 2 ACCELEROGRAMMI – SELEZIONE E GENERAZIONE.....                 | 16 |
| 2.1 REXEL – selezione set di reali .....                        | 16 |
| 2.2 Generazione Accelerogrammi Artificiali .....                | 18 |
| 2.2.1 Accelerogrammi spettro compatibili - Cecini .....         | 19 |
| 2.2.2 Analisi Armonica con Wavelet.....                         | 20 |
| 2.2.3 Modifica per raggiungere la spettro – compatibilità ..... | 21 |
| 2.2.4 Procedura di Generazione Stocastica.....                  | 25 |
| 3 ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA .....                          | 28 |
| 3.1 Premessa – effetti dell’azione sismica .....                | 28 |
| 3.2 Caratterizzazione Sdof .....                                | 30 |
| 3.2.1 Legami Costitutivi .....                                  | 31 |
| 4 DEFINIZIONE PARAMETRI DI PROGETTO.....                        | 34 |
| 4.1 Azione sismica di progetto .....                            | 34 |
| 4.1.1 Records Naturali (REXEL).....                             | 34 |
| 4.1.2 Accelerogrammi Modificati (Cecini) .....                  | 41 |
| 4.2 Definizione parametri di progetto del sistema SDOF .....    | 46 |
| 5 ANALISI DEI RISULTATI.....                                    | 51 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1   | Spettri in duttilità cinematica.....                       | 51  |
| 5.1.1 | Legame costitutivo TAKEDA .....                            | 51  |
| 5.1.2 | Legame costitutivo Elasto – Plastico Incrudente.....       | 66  |
| 5.1.3 | Legame costitutivo Elasto – Perfettamente Plastico.....    | 77  |
| 5.2   | Spettri di duttilità ciclica .....                         | 83  |
| 5.2.1 | Legame costitutivo Takeda.....                             | 83  |
| 5.2.2 | Legame costitutivo Elasto – plastico con incrudimento..... | 95  |
| 5.2.3 | Legame costitutivo Elasto – perfettamente plastico .....   | 105 |
| 5.3   | Spettri di energia isteretica.....                         | 109 |
| 5.3.1 | Legame costitutivo Takeda.....                             | 110 |
| 5.3.2 | Legame costitutivo Elasto – plastico con incrudimento..... | 122 |
| 5.3.3 | Legame costitutivo Elasto – Plastico Perfetto.....         | 132 |
| 5.4   | Indice di Park - Ang.....                                  | 136 |
|       | CONCLUSIONI .....  | 145 |
|       | BIBLIOGRAFIA .....   | 147 |

## INTRODUZIONE

Uno degli aspetti che riguarda maggiore importanza al momento di realizzare la progettazione e valutazione di una determinata struttura, è quello rappresentato dall'azione sismica che a essa viene applicata. Questo perché, negli anni si è visto come questa azione può compromettere in maniera molto marcata la stabilità e operatività della struttura nel momento che accade un evento sismico. Questa problematica ha portato agli ingegneri ad studiare i movimenti della terra nel momento che si genera un terremoto, per cercare di definire le caratteristiche, che dal punto di vista strutturale, interessano al momento di fare il dimensionamento dell'intera struttura.

Allora, siccome questo evento naturale è del tipo aleatorio, nel momento in cui ne si vuole definire la sua variabilità, dobbiamo pensare che questa sarà determinata tramite una procedura probabilistica anziché deterministica. È a questo punto che si definisce quello che si conosce come pericolosità sismica, che è definita come la probabilità che si verifichi almeno un terremoto di intensità non inferiore ad una certa soglia in un periodo di osservazione prefissato. Questa definizione della pericolosità permette a sua volta di determinare, per un dato sito in analisi, e in base a dei parametri topografici e del tipo di terreno, uno spettro che rappresenta l'andamento della massima forzante che viene applicata alla struttura dalle scosse del terreno al variare della sua frequenza propria. Questo spettro, detto dalla normativa italiana "*spettro di risposta elastico*", rappresenta lo strumento di progettazione più importante per definire l'azione sismica che viene applicata alla struttura.

Da tutto quanto detto precedentemente, si inferisce che una qualsiasi rappresentazione dell'azione sismica sarà definita prendendo come riferimento questo spettro di risposta elastico. A questo punto entra in gioco l'accelerogramma sismico, che è uno strumento che permette di rappresentare l'andamento della accelerazione del terreno nel sito di misura nel momento in cui si presenta un terremoto. Questa è la rappresentazione più accurata e più ricca in informazione dell'azione sismica, e per questo viene utilizzata

nel momento in cui si vuole realizzare una progettazione più dettagliata di una qualsiasi struttura. Le caratteristiche degli accelerogrammi più significative da prendere in considerazione al momento di fare un'analisi di una qualsiasi struttura sono: durata significativa del record, accelerazione massima per l'intera durata dell'accelerogramma, la magnitudo e distanza epicentrale del terremoto che ha prodotto tale andamento dell'accelerazione, e il tipo di terreno sul quale si è fatta la registrazione.

Queste caratteristiche, anche se possono descrivere molto bene l'intensità di un determinato record, non necessariamente sono sufficienti per dire che quel accelerogramma rappresenta in maniera ottimale la pericolosità di un determinato sito in esame. È per questo che si debbono mettere in relazione sia l'accelerogramma, sia lo spettro di risposta elastico definito dalla normativa. Su questo la normativa propone, invece di prendere una singola registrazione di un evento sismico, prenderne un set di accelerogrammi che possono rappresentare sia la aleatorietà del fenomeno, sia la pericolosità sismica del sito in esame. Questo set di accelerogrammi, si vengono presi in considerazioni un totale di 7 registrazioni, deve essere in media, compatibile con lo spettro di progetto definito dalla normativa. In questo modo ci si assicura che la risposta della struttura a questi accelerogrammi sia il più rappresentativa in relazione alla sismicità della zona di studio.

Il problema che si presenta a questo punto è di definire il set di accelerogrammi perché non necessariamente si hanno, nel sito di riferimento, sufficienti registrazioni che permettano di definire in set che in media sia spettro compatibile con quello di normativa. È per questo si sono sviluppati dei metodi che permettono di modificare gli accelerogrammi in modo tale che essi raggiungano la spettro – compatibilità.

I metodi generalmente utilizzati per modificare gli accelerogrammi puntano, di solito, a portare delle modifiche nel dominio in frequenza perché, a livello ingegneristico, le strutture sono più vulnerabili alle variazioni della frequenza dell'azione sismica. È per questo che uno dei metodi di modifica degli accelerogrammi più conosciuti è quello basato su un'analisi armonica di Fourier, il quale permette modificare le registrazioni direttamente nelle frequenze dove lo spettro dell'accelerogramma si scosta di più rispetto a quello di progetto. Queste modifiche però, anche se sono ben focalizzate nel dominio delle frequenze, hanno lo svantaggio che modificano l'accelerogramma nell'intero dominio

del tempo e quindi modificano le caratteristiche che dipendono dalla sua variazione nel tempo.

A questo punto si presenta il metodo proposto da Cecini [], che è basato su un'analisi armonica fatta tramite delle wavelets, che sono delle funzioni che hanno la caratteristica fondamentale di permettere la loro ubicazione sia nel dominio del tempo, sia nel dominio delle frequenze. Questa caratteristica offre molti vantaggi al momento di portare delle modifiche agli accelerogrammi perché, quando i metodi basati sull'analisi armonica di Fourier modificano l'accelerogramma nella sua intera durata, questo metodo modifica la registrazione in intervalli di frequenze e di tempo ben definiti, in modo tale che le modifiche si presentino nei punti in cui l'accelerogramma ne ha bisogno per raggiungere la spettro – compatibilità.

Siccome però, il fatto di portare modifiche agli accelerogrammi perché raggiungano la spettro - compatibilità, introduce o toglie dei contributi energetici che si trovano all'interno di essi, anche se le modifiche sono localizzate nei punti desiderati, si propone di studiare la risposta di una qualsiasi struttura a diversi tipi di accelerogrammi e vedere di quanto possono cambiare i parametri di resistenza e duttilità al variare del modo in cui si rappresenta l'azione sismica.

Quest'analisi si farà sottoponendo dei sistemi ad un grado di libertà, definiti con tre legami costitutivi diversi (elasto – perfettamente plastico, elasto – plastico con incrudimento e il legame trilineare degradante definito da Takeda), e variandone le percentuali di incrudimento e i fattori di duttilità, per vedere come si possono comportare diverse strutture ad accelerogrammi sia naturali, sia scalati, e mettendo in confronto queste risposte con le risposte degli stessi sistemi sotto l'azione sismica definita dagli accelerogrammi modificati con la proposta di Cecini [].

In particolare il lavoro di tesi si articola in 6 capitoli

Capitolo 1:

In questo capitolo si definiscono le prescrizioni che vengono stabilite dalla normativa italiana (NTC 2008) e da quella europea (EC 8), per quanto riguarda le caratteristiche che devono presentare gli accelerogrammi in modo tale che possano essere presi in con-

siderazione per realizzare delle analisi sismiche durante la progettazione di una qualsiasi struttura.

## Capitolo 2:

Si stabiliscono i diversi strumenti di ricerca per generare accelerogrammi che andranno a definire l'azione sismica di progetto, e che compiono con tutte le prescrizioni stabilite dalle normative suddette. Tra gli strumenti utilizzati si trova il programma REXEL [1] che permette di definire set di accelerogrammi che in media compiono con la spettro-compatibilità rispetto allo spettro di normativa. Questi set definiti dal programma possono essere naturali, oppure scalati linearmente, cioè viene applicato un fattore di scala che permette agli accelerogrammi di aumentare la sua intensità, per essere più vicini allo spettro di risposta, senza cambiare però la sua forma spettrale.

In questo capitolo si definisce anche il metodo proposto da Cecini per la modifica degli accelerogrammi tramite l'analisi armonica con le wavelets. Viene definito anche il metodo di generazione stocastica di accelerogrammi proposta da Cecini [2] che permette di ottenere degli accelerogrammi tramite la definizione di un processo stocastico e la randomizzazione di certi parametri approfittandosi dal fatto che l'azione sismica è un fenomeno aleatorio e che l'accelerazione sismica può quindi essere definita come una variabile aleatoria.

## Capitolo 3:

Si definiscono i diversi sistemi ad un grado di libertà (SDoF), in base alle sue caratteristiche di frequenza, smorzamento, rigidità, duttilità, punto di snervamento, e forma dei tre legami costitutivi che si prenderanno in considerazione per realizzare degli analisi non lineare e vedere l'andamento della risposta strutturale sotto l'azione sismica al variare del tempo.

## Capitolo 4:

Si presentano i parametri che si utilizzeranno per mettere a confronto le risposte dei diversi sistemi sottoposti agli accelerogrammi sia naturali, sia scalati, e anche quelli modificati. Questi parametri sono gli spettri di duttilità cinematica, spettri di duttilità ciclica, spettri di energia isteretica e i coefficienti di danneggiamento Park – Ang. Questi pa-



rametri sono stati utilizzati per definire il grado di danneggiamento che può presentare la struttura sotto l'azione sismica, e quindi permetteranno di vedere quali sono quelli accelerogrammi che comportano un danneggiamento più grandi e quali sono le situazioni in qui si arriva al collasso della struttura.

Capitolo 5: ANALISI DEI RISULTATI

Capitolo 6: Conclusioni

# 1 DEFINIZIONE AZIONE SISMICA E PRESCRIZIONI DI NORMATIVA

## 1.1 Premessa

Nella ingegneria strutturale, per valutare gli effetti che certi eventi producono nelle strutture, si deve suddividere l'analisi in due fasi: una prima fase nella quale si determina l'intensità dell'evento, in base alla variazione di certe caratteristiche che potrebbero interessare la stabilità e il comportamento della struttura; una seconda fase nella quale si analizza un modello della struttura, costruito in base alle caratteristiche di resistenza, rigidità, distribuzione delle masse, ecc., oltre che dimensionali. Il modello deve approssimare al meglio il comportamento reale della struttura sotto l'azione prima definita.

Tra gli eventi che possono sollecitare una determinata struttura, quello più ampiamente studiato è il sisma. Nei codici e nelle normative che regolano l'analisi strutturale sotto azione sismica, di solito questa è caratterizzata da tre funzioni che rappresentano le 3 componenti traslazionali dell'accelerazione nel sito, che vengono considerate indipendenti l'una dalle altre (a limite due correlate e una indipendente), e ortogonali fra di loro. In funzione del tipo di analisi che si vuole sviluppare, le componenti possono essere definite tramite tre rappresentazioni:

- Accelerazione massima attesa in superficie
- Accelerazione massima e relativo spettro di risposta attesi in superficie.
- Accelerogramma sismico

Tra queste tre rappresentazioni, lo spettro di risposta è quella più diffusa, perché fornisce un buon compromesso fra accuratezza e complessità, e perché gli ingegneri hanno una conoscenza sufficiente per fare uso di tale strumento. Comunque, questa rappresentazione ha una incertezza elevata nel momento in cui si vuole fare l'analisi sismica di strutture che presentano una certa complessità, ad esempio strutture con isolatori, strutture irregolari (in altezza e in pianta), edifici molto alti, ponti o comunque strutture dove

una semplice analisi dinamica lineare non è sufficiente, e quindi c'è bisogno di un'analisi più dettagliata.

In questi casi, occorre una rappresentazione dell'azione sismica che tenga conto non solo della massima intensità dell'azione applicata alla struttura, ma anche della sua variabilità nel tempo. Questa rappresentazione è definita dall'accelerogramma sismico, ovvero da una registrazione dell'accelerazione durante l'evento sismico.

Gli accelerogrammi sono la più accurata rappresentazione di un evento sismico visto che portano con sé non solo la variazione della forzante nel tempo, ma anche l'informazione riguardante le proprietà del sisma e la natura delle onde che hanno generato il moto sismico.

Esistono quattro tipi di accelerogrammi:

- Accelerogrammi naturali
- Accelerogrammi naturali scalati
- Accelerogrammi simulati
- Accelerogrammi artificiali

I primi sono accelerogrammi che provengono da stazioni apposite nelle quali si esegue la registrazione della variazione dell'accelerazione direttamente nel momento in cui si presenta un sisma. Di queste registrazioni si sono creati database, in America, Europa e anche in Italia, che caratterizzano ogni sisma, non solo attraverso l'accelerogramma, ma anche in funzione della magnitudo del terremoto, del meccanismo di faglia che ha prodotto la scossa, della data, della distanza epicentrale, dell'accelerazione di picco al suolo (nelle tre direzioni ortogonali), del tipo di suolo nel quale è stata fatta la registrazione, ecc.

I secondi sono accelerogrammi che possono essere scalati linearmente in intensità, con fattori che dipendono dall'accelerazione di picco al suolo, in modo da soddisfare i requisiti che saranno specificati nei capitoli successivi.

Gli accelerogrammi simulati sono accelerogrammi che vengono generati tramite modelli definiti con metodi, sia deterministici, sia stocastici, capaci di simulare i processi fisici legati alla genesi del moto del suolo, ovvero genesi del terremoto, propagazione

dell'onda e risposta superficiale al sito. Il problema che presenta la generazione di accelerogrammi è che risulta molto complessa visto che si debbono definire molti parametri per la caratterizzazione del terremoto di origine e della sua propagazione.

Gli ultimi sono accelerogrammi che vengono generati attraverso la modifica degli accelerogrammi naturali, tramite diverse metodologie (che saranno specificate in seguito), in modo tale da soddisfare certi requisiti prestabiliti dalla normativa. Questi accelerogrammi saranno il centro del nostro studio e vedremo quali possono essere i vantaggi e gli svantaggi del loro impiego, confrontando i risultati delle analisi strutturali eseguite sia con questi, sia con gli accelerogrammi naturali.

## 1.2 Spettro elastico di normativa NTC 2008

Lo spettro elastico in accelerazione è una rappresentazione della risposta massima che un oscillatore elementare, definito in base ad una massa "m", un coefficiente di smorzamento "ζ", e una rigidezza "k", presenta quando viene sottoposto ad una forzante qualsiasi (che nel nostro caso sarà l'accelerogramma), che si ottiene variando il periodo fondamentale dell'oscillatore "T<sub>0</sub>" entro un range di valori che di solito varia tra 0 e 4s (che sono i valori di periodo che interessano le ordinarie strutture civili). La risposta dell'oscillatore, stabilito il periodo fondamentale, viene valutata con l'equazione del moto, definita dalla seguente espressione:

$$m\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + Kx = -m\ddot{x}_g$$

dove:

$x$  : spostamento della massa causato dall'accelerogramma

$\ddot{x}_g$  : accelerogramma di input

$\omega = 2\pi/T_0$  ; frequenza fondamentale dell'oscillatore

Lo spettro di solito viene valutato in spostamenti cioè  $Sd(T, \zeta)$  perché, da questa rappresentazione poi con una semplice relazione, presentata in seguito, si può arrivare alle rappresentazioni dello spettro in pseudo – velocità e pseudo – accelerazione:

$$Sd(T_0, \zeta) = \omega Sv(T_0, \zeta) = \omega^2 Sa(T_0, \zeta)$$

La forma spettrale definita dalla normativa è espressa in termini di pseudo – accelerazione; si deve tener conto che questa forma spettrale non sarà riferita ad una singola realizzazione di un evento sismico per una determinata località, ma sarà riferita ad un certo numero di realizzazioni dell’azione sismica che vanno a caratterizzare la pericolosità sismica del sito. Visto che il numero di realizzazioni registrate in un sito di solito sono poche, si capisce che dietro quest’analisi c’è uno studio statistico e probabilistico della pericolosità del sito.

Definita la pericolosità sismica, la normativa italiana (NTC) nella sua ultima versione del 2008, definisce lo spettro di risposta elastico in accelerazione con la seguente espressione:

$$0 \leq T \leq T_B \quad Se(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad Se(T) = a_g * S * \eta * F_0$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad Se(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left[ \frac{T_C}{T} \right]$$

$$T \geq T_D \quad Se(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

dove:

$a_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito

$S$  : coefficiente che tiene conto della categoria del sottosuolo e della topografia, e viene definito come:  $S = S_t \cdot S_s$

$\eta$  : fattore che tiene conto dello smorzamento del oscillatore

$F_0$  : fattore di amplificazione spettrale massima per un suolo di riferimento rigido e orizzontale

$T_c$  : periodo che definisce l'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, ed è definito da:  $T_c = C_c \cdot T_c^*$ , dove  $C_c$  tiene conto della categoria del sottosuolo visto che  $T_c^*$  si riferisce ad un terreno tipo A.

$T_B$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto ad accelerazione costante definito come:  $T_B = T_c/3$

$T_D$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante definito come:  $T_D = 4,0 \cdot a_g/g + 1,6$

Tutti questi fattori sono definiti all'interno della normativa, in base alla zonazione sismica definita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, e permettono di identificare l'andamento dello spettro per ogni sito del territorio nazionale.

### **1.3 Accelerogrammi – Prescrizioni di normativa**

#### **1.3.1 NTC 2008**

Come si è detto precedentemente, l'accelerogramma è una rappresentazione più accurata dell'azione sismica, rispetto a quella definita dallo spettro di risposta in accelerazione di normativa. Questo perché gli accelerogrammi forniscono l'informazione non solo sul valore massimo dell'accelerazione, ma anche sul contenuto in frequenza e sulla durata del sisma.

Gli accelerogrammi, di qualsiasi tipologia, debbono però soddisfare certe prescrizioni definite dalle normative di riferimento, perché essi possano essere presi in considerazione al momento di realizzare l'analisi di una qualsiasi struttura.

In accordo con l'Eurocodice 8 parte 1, gli accelerogrammi artificiali debbono essere generati in modo tale che lo spettro generato dall'accelerogramma, sia conforme con la forma spettrale definita nei paragrafi precedenti, per un coefficiente di viscosità pari a  $\zeta = 5\%$ . Oltre a questo, si deve soddisfare una durata minima dell'accelerogramma, in base alla magnitudo del sisma e ad altri parametri fisici che permettono la determinazione di  $a_g$

e di  $S_s$ . Quando non siano specificati i parametri del suolo nel sito, la durata minima dell'accelerogramma, nel suo tratto stazionario deve essere pari a 10s. Nel momento in cui si vuole fare un'analisi in base ad un insieme di accelerogrammi, l'Eurocodice stabilisce i seguenti requisiti:

Si debbono considerare almeno 3 accelerogrammi.

La media dei valori dello spettro corrispondenti al punto di periodo nullo deve essere maggiore di  $a_g S$  per il sito in analisi.

Nel range di periodi tra  $0,2 T_1$  e  $2 T_1$ , dove  $T_1$  è il periodo fondamentale della struttura in analisi, nella direzione di applicazione dell'accelerogramma; nessun valore della media degli spettri elastici per gli accelerogrammi considerati, calcolati con smorzamento viscoso pari a  $\zeta = 5\%$ , deve essere minore del 90% per il corrispondente valore dello spettro elastico di progetto con lo stesso valore di smorzamento.

Le NTC, sempre per accelerogrammi artificiali, stabiliscono che il range di periodi, nei quali si deve verificare quanto specificato nell'ultimo punto sopra descritto, deve essere definito tra 0,15s e 2s oppure 0,15s e  $2T_1$ . Nel caso di costruzioni con isolamento, il limite superiore dell'intervallo di coerenza deve essere pari a  $1,2 T_{si}$ , per  $T_{si}$  definito come il periodo fondamentale della struttura isolata. Nel caso in cui si vogliono fare le verifiche agli stati limiti ultimi (SLU), i valori dei periodi devono essere compresi tra 0,15s e  $1,5T_1$ . Si definiscono considerazioni anche per la durata complessiva dell'accelerogramma, che oltre ai 10s definiti prima per la parte pseudo – stazionaria, deve contenere tratti di ampiezza crescente da zero e decrescente a zero, in maniera che in complessivo la durata sia non inferiore a 25s.

### **1.3.2 Eurocodice 8**

Per quanto riguarda gli accelerogrammi naturali o simulati, l'Eurocodice 8 pretabilisce che le registrazioni utilizzate per fare l'analisi debbano essere adeguatamente scelte, con lo scopo di approssimare al meglio le caratteristiche sismogenetiche della sorgente e del suolo nel sito, e che i valori siano scalati di  $a_g S$ . Il set di accelerogrammi selezionati deve soddisfare tutte le prescrizioni stabilite dalla normativa per gli accelerogrammi artificiali.

La normativa italiana sottolinea anche che gli accelerogrammi artificiali non si debbono prendere in considerazione nel momento in cui si vogliono realizzare analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici.



## **2 ACCELEROGRAMMI – SELEZIONE E GENERAZIONE**

### **2.1 REXEL – selezione set di reali**

Siccome gli accelerogrammi sono il dato di input necessario per le analisi dinamiche non lineari, la scelta o la generazione di essi rappresenta un punto importante nella valutazione degli effetti sismici sulle strutture.

A questo punto, si vede la necessità di avere una base di dati grande, dove siano contenuti gran parte degli accelerogrammi di maggiore importanza, registrati in una zona, per poi sceglierne un insieme rappresentativo.

Ovviamente, visto che la normativa dà una gran importanza allo spettro di risposta elastico in accelerazione per definire l'azione sismica applicata alla struttura, la scelta del set di accelerogrammi deve essere basata sulla definizione di uno spettro di progetto, che sarà lo spettro target al quale dovranno fare riferimento tutti gli spettri delle singole registrazioni.

È anche per questo motivo che si presenta la necessità di avere una vasta quantità di registrazioni di accelerogrammi, visto che è molto difficile che lo spettro di risposta di una qualsiasi registrazione sia direttamente spettro – compatibile nel range di valori di  $T$  prescritti dalla normativa.

Nell'Eurocodice 8 viene specificato che, se la risposta della struttura nel tempo, ottenuta da un'analisi non – lineare dinamica, viene calcolata da un set di almeno 7 accelerogrammi, compatibili con le prescrizioni descritte precedentemente, il valore di progetto della risposta della struttura può essere calcolato come la media di tutti i valori corrispondenti al set di accelerogrammi; altrimenti si deve considerare il valore più sfavorevole della risposta corrispondente al set di “n” accelerogrammi che sia stato definito.

REXEL è un programma a distribuzione gratuita basato sia sulla NTC 2008, sia sull'Eurocodice 8, e che genera dei set di 7, 14 o 21 accelerogrammi che rispettano le prescrizioni definite dalle normative enunciate. Per generare i set di accelerogrammi, il programma ha a disposizione tutte le registrazioni di accelerogrammi che si trovano nell'European Strong – Motion Database, nell'Archivio Accelerometrico Italiano, e nella base di dati Selected Input Motions for displacement – Based Assessment and Design (SIMBAD).

Come primo requisito, il programma ha bisogno che venga definito lo spettro di progetto, o spettro target. Questo può essere fatto in due modi: il primo modo è assegnando nel programma i parametri che sono mostrati nella finestra di dialogo del programma, per generare lo spettro, che avrà le forme definite, sia nelle NTC 2008, sia nell'Eurocodice, secondo le esigenze dell'utente; l'altra opzione è quella di inserire direttamente la forma dello spettro di progetto, tramite un file del tipo .xls, dove l'utente deve definire le ordinate e le ascisse dello spettro di progetto desiderato. Il programma in tutti e due i casi chiede sempre la classe del sito di riferimento per ragioni che verranno spiegate nel seguito. In questo primo punto, il programma offre anche la possibilità di calcolare i grafici di disaggregazione della pericolosità sismica, se il sito in analisi si trova sul territorio nazionale italiano.

Definito lo spettro di progetto, si procede a definire il database di accelerogrammi da utilizzare, e a precisare gli intervalli di magnitudo  $M$  e distanza dalla sorgente  $R$  (distanza epicentrale), dove il programma andrà a cercare, tra tutti gli eventi presenti nella base dati, quelli che sono avvenuti entro i limiti di  $M$  e  $R$  stabiliti dall'utente. Si può anche precisare se si vuole che tutti gli accelerogrammi siano stati registrati nella stessa classe di suolo del sito, o se possono appartenere a classi di suoli diversi.

Si definiscono gli intervalli nei quali si deve presentare lo spettro compatibilità degli accelerogrammi, secondo quello che stabilisce la normativa. È conveniente precisare che, anche se nella normativa non viene stabilito un limite superiore di spettro – compatibilità, è buona norma stabilirne uno per evitare una sovrastima dell'azione sismica, e che poi la struttura non sia economicamente conveniente.

Una volta avviato il programma di calcolo, si identificano tutti i set di accelerogrammi che sono spettro – compatibili secondo i requisiti stabiliti dal progettista, e i risultati vengo ordinati in base all'errore relativo quadratico medio, calcolato per lo spettro di risposta  $Sa(\mathbf{T})$ , secondo la formula:

$$mean\ error = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Sa(T_i) - Sa_{reference}(T_i)}{Sa_{reference}(T_i)} \right)^2}$$

dove  $Sa_{reference}(T)$  è l'ordinata dello spettro di risposta in pseudo – accelerazione prestabilito dalla normativa. D'accordo con gli autori, l'ordinamento preliminare dei risultati permette di valutare prima gli accelerogrammi per i quali le ordinate spettrali approssimano meglio la forma dello spettro di progetto, e hanno uno scarto minimo rispetto allo stesso spettro di riferimento.

Il programma offre anche la possibilità di generare set di accelerogrammi che vengono scalati linearmente, cioè, gli accelerogrammi vengono moltiplicati per un fattore che rappresenta una aggiunta di energia all'intera registrazione, senza variare il contenuto in frequenza, la forma e la forma spettrale.

## 2.2 Generazione Accelerogrammi Artificiali

Come si è detto precedentemente, l'analisi non – lineare di una struttura può essere eseguito prendendo in considerazione sia accelerogrammi naturali, sia accelerogrammi artificiali. La necessità di generare metodi che permettano di modificare le registrazioni naturali, o di generare accelerogrammi in base alla definizione, nel dominio del tempo o delle frequenze, delle principali caratteristiche di essi, per ottenere accelerogrammi spettro compatibili, nasce dal fatto che, di solito, sono poche le registrazioni che si hanno a disposizione di eventi che si sono verificati nel sito di studio, e che, addirittura, queste registrazioni rispettino la spettro – compatibilità richiesta dalla normativa italiana. Sotto queste condizioni si sono sviluppati due metodi per definire le principali caratteristiche del fenomeno, per poi generare accelerogrammi che sono in accordo con quelli che si sono

presentati nel sito in esame. Nel primo approccio si definiscono le caratteristiche sismologiche del meccanismo di faglia, e del percorso che possono presentare le onde sismiche, per “predire” il movimento del sottosuolo del sito. Questo tipo di approccio produce degli accelerogrammi simulati. Dopodiché, si applica una procedura che, in linea di massima, segue i passi successivi:

Il segnale viene utilizzato per investigare le caratteristiche degli accelerogrammi naturali.

I parametri del segnale vengono correlati ai parametri sismologici e geotecnici del sito.

Si fanno delle analisi strutturali per determinare quali sono i parametri del segnale che modificano o condizionano di più la risposta della struttura in analisi, anche in base al modello considerato della struttura.

Si costruisce un modello per caratterizzare il processo stocastico, e eventualmente, si fa un post – processing delle realizzazioni trovate, per definire accelerogrammi che presentino caratteristiche simili a quelle che sono state ritenute significative al momento di rappresentare la risposta strutturale.

Noi ci focalizzeremo, in questo lavoro, sugli accelerogrammi naturali e quelli artificiali generati attraverso un processo stocastico, più particolarmente sul metodo di generazione proposto da Cecini [1].

### **2.2.1 Accelerogrammi spettro compatibili - Cecini**

Come si è detto precedentemente, gli accelerogrammi forniscono un’informazione più ricca rispetto allo spettro di normativa. Questa informazione, contenuta all’interno dell’accelerogramma, permette di definire uno spettro di risposta unico per ogni accelerogramma, ma questa proprietà non è biunivoca e quindi dallo spettro di normativa non si può ottenere un’unica realizzazione dell’evento sismico, anche perché esso viene definito in base a tante realizzazioni che si sono presentate in un sito in particolare. Quindi, da un unico spettro di risposta possono essere generati infiniti accelerogrammi. In altre parole, per poter definire accelerogrammi che siano spettro-compatibili, è necessario de-

finire, oltre allo spettro di normativa, l'informazione in base al contenuto in frequenza e alla durata dell'evento sismico.

Il metodo proposto da Cecini è basato sulla trasformata armonica wavelet per generare accelerogrammi spettro-compatibili, che permette non solo di soddisfare le condizioni di compatibilità, ma anche le caratteristiche di contenuto in frequenza e durata dell'evento sismico, grazie all'utilizzo di un accelerogramma parente. Nella prima fase l'accelerogramma parente viene modificato per soddisfare i requisiti di spettro-compatibilità. Nella seconda fase, un numero arbitrario di accelerogrammi viene generato in maniera aleatoria, riproducendo le proprietà nei domini del tempo e delle frequenze dell'accelerogramma spettro-compatibile.

### **2.2.2 Analisi Armonica con Wavelet**

L'analisi con wavelet è un metodo che si è sviluppato negli ultimi trent'anni e che rappresenta un potente strumento per la rappresentazione di segnali, visto che permette una buona caratterizzazione nel tempo e nelle frequenze, e di arrivare ad una buona risoluzione in tutti e due i domini, ovviamente rispettando il principio d'indeterminazione di Heisenberg, che specifica che per determinare il valore di una funzione che è definita in due domini (in questo caso tempo e frequenza), se si vuole avere un errore minimo a piacere in uno dei domini, si deve definire un compromesso tra il grado di risoluzione della funzione che si vuole avere in entrambi i domini, determinando un compromesso tra le due rappresentazioni. In altre parole, mentre miglioro l'approssimazione della funzione nel dominio del tempo, peggioro l'approssimazione della stessa funzione nel dominio delle frequenze, e viceversa.

Il vantaggio dell'uso delle wavelet è che queste funzioni, che saranno definite in seguito, permettono una buona rappresentazione della proprietà di non – stazionarietà del segnale, sia nel dominio del tempo, che nel dominio delle frequenze, permettendo di fornire a priori un certo grado di risoluzione in tutti e due i domini.

Le wavelet sono funzioni a media nulla, e sono normalizzate e centrate a  $t = 0$ . Una famiglia di atomi in tempo – frequenza, viene ottenuta scalando e traslando le funzioni di un valore  $u$ , cioè:

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right)$$

Sempre sotto la considerazione che le wavelet vengano scalate e traslate per poter raggiungere una certa ubicazione in un dato intervallo di tempo e frequenza, nel metodo proposto da Cecini, le wavelet hanno, nel dominio del tempo, una forma del tipo:

$$w_{m,n}\left(t - \frac{k}{n-m}\right) = \frac{e^{i n 2\pi\left(t - \frac{k}{n-m}\right)} - e^{i m 2\pi\left(t - \frac{k}{n-m}\right)}}{i 2\pi(n-m)\left(t - \frac{k}{n-m}\right)}$$

e nel dominio delle frequenze una forma del tipo:

$$W_{m,n,k}(\omega) = \begin{cases} \frac{2\pi}{n-m} \exp\left(\frac{-i\omega}{n-m}\right) & \text{per } 2\pi m \leq \omega \leq 2\pi n \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

I coefficienti “n” e “m” definiscono la larghezza di banda della wavelet nel dominio delle frequenze e quindi, vanno a modificare la frequenza d’onda della wavelet nel dominio del tempo. Il fattore “k” regola la traslazione della wavelet nel dominio del tempo. In questo modo si ha un modo per ubicare la funzione nell’intervallo che vogliamo. I coefficienti {m,n} definiscono quindi anche il livello della wavelet, con n > m.

Da queste formule possiamo arrivare alla formula di ricostruzione del segnale, che sarà definita dalla:

$$f(t) = 2Re \left\{ \sum_{\{m,n\}} \sum_{k=0}^{n-m} a_{\{m,n\},k} \Psi_{\{m,n\},k}(t) \right\}$$

Il segnale è rappresentato dalla somma di tutte le paia di m,n wavelets in tutti i k-esimi indici, nel dominio del tempo. In questo modo si può controllare la risoluzione in entrambi i domini, e modificare i parametri per ottenere una risoluzione migliore nei punti di interesse.

### 2.2.3 Modifica per raggiungere la spettro – compatibilità

Il metodo adottato si basa sul seguente criterio: una volta che si è verificato il valore massimo della risposta di un sistema ad un grado di libertà, quello che succede dopo non condiziona lo spettro di risposta, e quindi non c’è motivo di portare modifiche alla parte

successiva del segnale. Per riuscire a focalizzare le modifiche nel punto di massimo, si deve determinare quando si raggiunge il massimo, e poi effettuare le modifiche nell'intorno del punto in considerazione.

Il vantaggio di questo metodo rispetto a quello "classico" [2], è che si riesce a rappresentare la non – stazionarietà del segnale visto che, una volta definita la larghezza di banda da modificare, si può identificare il sotto – segnale da modificare grazie alla sommatoria di un trend di  $n - m$  wavelets, centrate al tempo  $k/[(n - m)T_0]$  (con  $T_0$ : durata dell'accelerogramma), dove  $k$  varia da 0 a  $n - m$ , e quindi la prima wavelet viene centrata al tempo  $t = 0$ , e l'ultima al tempo  $t = T_0$ .

Prima di iniziare con il metodo, che procederà in maniera iterativa a correggere il segnale per renderlo spettro – compatibile, si scala lo spettro di risposta dell'accelerogramma, rispetto a quello di progetto, in forma lineare, per cercare di far rimanere invariato il contenuto in frequenza del segnale. Questo si fa con lo stesso parametro di scala implementato dal programma REXEL [3] visto precedentemente, e che per ragioni di comodità viene riportato in seguito:

$$mean\ error = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Sa(T_i) - Sa_{reference}(T_i)}{Sa_{reference}(T_i)} \right)^2}$$

Alla  $r$  – esima iterazione il programma presenta i seguenti passi:

Si calcolano i rapporti fra il valore dello spettro di progetto e lo spettro di risposta del segnale in ogni punto dove viene definito lo spettro secondo la seguente formula:

$$R_j^{(r)} = \min \left\{ \frac{S_{PA}^{(r)}(T_j)}{S_{ED}^b(T_j)}, \frac{S_{ED}^\#(T_j)}{S_{PA}^{(r)}(T_j)} \right\}$$

dove  $S_{ED}^b(T_j)$  e  $S_{ED}^\#(T_j)$  rappresentano le ordinate dello spettro di risposta della normativa, moltiplicate rispettivamente per 0.9 e 1.3 per ottenere i limiti della zona che definisce la compatibilità dello spettro di risposta dell'accelerogramma in analisi.  $S_{PA}^{(r)}(T_j)$  è l'ordinata dello spettro di risposta del segnale per il periodo  $T_j$ . Se tutti i rapporti sono  $R_j^{(r)} \geq 1$ , la compatibilità spettrale è stata raggiunta e si blocca la procedura iterativa. Se

questo non si verifica, il punto messo peggio in termini di compatibilità spettrale, nel range di interesse, si definisce come:

$$j^* = \arg \min_{1 \leq j \leq N_T} \{R_j^{(r)}\}$$

In questo modo l'iterazione è centrata nel punto che ha la massima distanza relativa dalla zona di compatibilità, e la correzione per la  $r$  – esima iterazione sarà localizzata nel dominio del tempo per  $t = T^{(r)} = T_{j^*}$ , e nel dominio delle frequenze per  $\omega = \Omega^{(r)} = \omega_{j^*}$ .

La banda da correggere viene definita nel dominio delle frequenze, tenendo in considerazione che, per raggiungere una risoluzione minima nel dominio del tempo, essa deve essere maggiore di un certo valore (nelle ricerche fatte da Cecini questo è pari a  $n - m = 9$ ). Allora, si definisce la banda da correggere nel dominio delle frequenze tramite una frequenza centrale e una larghezza di banda definite come segue:

$$B^{(r)} = (N_{\omega}^{(r)} - 1)\Delta\omega,$$

e quindi:

$$\omega_m^{(r)} = \Omega^{(r)} - \frac{B^{(r)}}{2}; \quad \omega_n^{(r)} = \Omega^{(r)} + \frac{B^{(r)}}{2},$$

sotto le condizioni di larghezza minima di banda definite come:

$$N_{\omega}^{(r)} \geq N_{\omega, \min}; \quad \frac{2\pi}{\omega_m^{(r)}} - \frac{2\pi}{\omega_n^{(r)}} \geq \Delta T_{\min},$$

A questo punto, definita la banda da correggere, si calcola il sotto – segnale al quale verranno applicate le correzioni localizzate nel dominio del tempo e delle frequenze. Innanzitutto, si calcolano i coefficienti  $a_{\{m^{(r)}, n^{(r)}\}, k}^{(r)}$  con l'espressione:

$$a_{\{m^{(r)}, n^{(r)}\}, k}^{(r)} = \sum_{l=0}^{N_t} f_l^{(r)} \Psi_{\{m^{(r)}, n^{(r)}\}, k} \left( \frac{t_l}{t_f} \right); \quad k = 1, \dots, (n - m),$$

e quindi, il sotto – segnale viene ottenuto come prima, per la  $r$  – esima iterazione, come:



$$\tilde{f}^{(r)}(t) = 2Re \left\{ \sum_{\{m,n\}} \sum_{k=0}^{n-m} a_{\{m^{(r)},n^{(r)},k\}}^{(r)} \Psi_{\{m^{(r)},n^{(r)},k\}} \left( \frac{t_l}{t_f} \right) \right\}$$

dove “ $k$ ” sono gli indici rientranti nell’intervallo di tempo nei quali il totale delle modifiche, teoricamente, si concentrano, e questo intervallo finisce al  $k$  – esimo indice subito dopo che si raggiunge il punto di massima risposta, e comincia al  $k$  – esimo indice subito prima il punto di massima risposta, meno la durata convenzionale transitoria  $\Delta T^{(r)} = \Delta T(\Omega^{(r)})$ .

Viene calcolata la risposta del sistema a un grado di libertà per il sotto – segnale, determinato nel punto precedente, risolvendo l’equazione:

$$\ddot{u}_{j^*}^{(r)}(t) + 2\zeta_o \omega_{j^*} \dot{u}_{j^*}^{(r)}(t) + \omega_{j^*}^2 \tilde{u}_{j^*}^{(r)}(t) = -f^{(r)}(t),$$

dopodiché si calcola il prodotto tra la risposta del sistema a un grado di libertà all’accelerogramma, con le modifiche che siano già stati fino all’iterazione in corso, e la risposta dello stesso oscillatore al sotto – segnale, definendo  $P_l^{(r)}$  come:

$$P_l^{(r)} = u_{j^*,l}^{(r)} \tilde{u}_{j^*,l}^{(r)}$$

e se ne calcola l’indice dove diviene massima, cioè:

$$l^* = \arg \max_{0 \leq l \leq N_t} \{P_l^{(r)}\}$$

Il fattore di correzione è calcolato secondo la relazione:

$$\alpha^{(r)} = \frac{D^{(r)} - u_{j^*,l^*}^{(r)}}{\tilde{u}_{j^*,l^*}^{(r)}}$$

dove:

$$D^{(r)} = \frac{1}{(\Omega^{(r)})^2} \begin{cases} 1.05 S_{ED}^b(T_{j^*}^{(r)}) & \text{se } S_{ED}(T_{j^*}^{(r)}) > S_{PA}^{(r)}(T_{j^*}^{(r)}); \\ 0.95 S_{ED}^\#(T_{j^*}^{(r)}) & \text{se } S_{ED}(T_{j^*}^{(r)}) < S_{PA}^{(r)}(T_{j^*}^{(r)}); \end{cases}$$

con  $T_{j^*}^{(r)} = 2\pi/(\Omega^{(r)})$ . Alla fine, la segnale modificata per la  $(r + 1)$  iterazione si calcola come:

$$f^{(r+1)}(t) = f^{(r)}(t) + \alpha^{(r)} \tilde{f}^{(r)}(t),$$

e si ricomincia con un'altra iterazione se non si è raggiunta ancora la spettro – compatibilità.

È da notare che, visto che la componente rappresentata dal sotto – segnale è stata calcolata in funzione del valore dello spettro da correggere, si verifica che la migliore correlazione fra le due risposte del sistema a un grado di libertà  $u$  e  $\tilde{u}$  si ottiene nel momento in cui il prodotto tra queste due raggiunge il suo valore massimo. È per questo che ci si riferisce alle risposte verificatesi nel momento di massima correlazione, per calcolare il fattore di correzione dell'accelerogramma. Nell'ultimo passo, si presentano i limiti della zona di compatibilità che vengono moltiplicati per  $1 \pm 0.05$ ; questo perché lo scopo dell'algoritmo non è quello di raggiungere esattamente i valori dei limiti della zona di compatibilità, ma i valori all'interno della zona. Questo in altre parole comporta un vantaggio a livello operativo.

#### 2.2.4 Procedura di Generazione Stocastica

Una volta definiti gli accelerogrammi artificiali che rispettano la spettro compatibilità, si presenta la problematica di generarne, prendendo come punto di riferimento il segnale modificato, una quantità prestabilita di accelerogrammi che siano definiti tenendo conto dell'incertezza del fenomeno sismico. L'approccio di Cecini affronta il problema tramite la generazione di un campione rappresentato da un processo Gaussiano stazionario, assumendo un numero elevato di coseni, e facendo una randomizzazione delle loro fasi, nella forma:

$$f(t) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_{ff}(\omega_j)\Delta\omega} \cos(\omega_j T + \varphi_j),$$

dove  $S_{ff}(\omega)$  è la funzione di densità di potenza spettrale del processo aleatorio,  $\varphi_j$  sono variabili indipendenti uniformemente distribuite nell'intervallo  $[0, 2\pi)$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $\omega_j = j\Delta\omega$ , e  $f(t)$  è il campione generato. Sotto queste condizioni, i campioni possono essere modulati tramite l'uso di una funzione deterministica  $A(t)$ , ma il contenuto in frequenza rimarrebbe stazionario. Per rendere la generazione completamente non – stazionaria si può fare un'estensione del tipo:

$$f(t) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^N \sqrt{2A^2(t, \omega_j) S_{ff}(\omega_j) \Delta\omega} \cos(\omega_j T + \varphi_j),$$

dove  $A^2(t, \omega)$  è la funzione che definisce la non – stazionarietà, sia in ampiezza, sia in contenuto in frequenza. Quindi ora resta da definire come sarà fatta quest'ultima funzione in modo tale da costruire completamente il processo stocastico.

Si utilizza la trasformata armonica delle wavelet per definire la funzione delle ampiezze, e si applica una randomizzazione delle fasi, il che significa moltiplicare la parte immaginaria di queste per un'ampiezza unitaria; quindi si ottiene che, valutando per  $k = 0$  e senza perdere generalità:

$$\tilde{w}_{m,n;k}(t)|_{k=0} = \frac{1}{2\pi(n-m)} \sum_{j=m}^{n-1} \exp(i\omega_j t_0 + i2\pi\theta_k)$$

dove  $\theta_k = u\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$ , con  $u$  vettore di variabili aleatorie uniformemente distribuite.

Sostituendo nella equazione (...), si ottiene il seguente risultato:

$$f(t) = 2Re \left\{ \sum_{\{m,n\}} \sum_{k=0}^{n-m-1} \frac{a_{\{m,n\},k}}{2\pi(n-m)} \sum_{j=m}^{n-1} \exp(i\omega_j t_0 + i2\pi\theta_k) \right\}$$

dove: 
$$t_k = t_0 + k_0 = \frac{t}{T_0} + \frac{k}{n-m}$$

ovvero:

$$f(t) = \sum_{\{m,n\}} \sum_{k=0}^{n-m-1} \frac{a_{\{m,n\},k}}{\pi(n-m)} \sum_{j=m}^{n-1} \cos(\omega_j t_k + \varphi_{m,n;k})$$

con

$$\varphi_{m,n;k} = \arctan \frac{Im(a_{\{m,n\},k})}{Re(a_{\{m,n\},k})}$$

Per raggiungere invece la randomizzazione della posizione della  $k$  – esima wavelet, si seguono le stesse considerazioni per randomizzare le fasi, ma tenendo conto che in uno

schema ortogonale,  $k$  è definito nell'intervallo  $[0, n - m - 1]$ , avendo  $\tilde{k} = k + \theta_k$ . Si ottiene quindi:

$$f(t) = \sum_{\{m,n\}} \sum_{k=0}^{n-m-1} \frac{a_{\{m,n\},k}}{\pi(n-m)} \sum_{j=m}^{n-1} \cos(\omega_j t_k + \varphi_{m,n;k} + \frac{j}{n-m} 2\pi\theta_k)$$

### **3 ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA**

#### **3.1 Premessa – effetti dell'azione sismica**

Il potenziale di danno di un determinato terremoto si può valutare attraverso la caratterizzazione delle registrazioni accelerometriche che si hanno nel sito in esame. Questo però non evidenzia il potenziale totale di danno che possiede un terremoto, visto che si deve valutare anche la risposta di una determinata struttura all'azione sismica considerata. Questa analisi della risposta della struttura può essere fatta in vari modi, e quelli più diffusi sono l'analisi lineare e l'analisi non lineare o inelastica. Ognuno di essi può a sua volta essere suddiviso in due categorie: l'analisi dinamica e l'analisi statica. In ordine crescente di difficoltà:

- Analisi lineare statica
- Analisi lineare dinamica
- Analisi non – lineare statica
- Analisi non – lineare dinamica

Le prime due sono analisi nelle quali, le proprietà dei materiali sono costanti nel tempo. La differenza tra le due è che nella prima, l'azione sismica si definisce come una forza statica equivalente che viene applicata alla struttura e l'equilibrio quindi viene trattato in maniera statica; nella seconda, la forzante sismica viene caratterizzata come forza d'inerzia.

Le altre due analisi (quelle non lineari) tengono in considerazione la variazione delle proprietà meccaniche e geometriche della struttura, attraverso la definizione di legami costitutivi. Nell'analisi non lineare statica, la forzante sismica è caratterizzata da forze statiche che sono fatte crescere monotonamente, fino al raggiungimento del collasso della struttura per degrado del materiale. L'analisi non lineare dinamica prende in considera-

zione la variazione dell'accelerazione nel tempo. In quest'ultima analisi l'equilibrio viene trattato ad ogni passo dinamicamente.

Di tutte queste analisi, quella che ci interessa è l'analisi non lineare dinamica che, anche se presenta delle difficoltà teoriche, è quella che offre l'informazione più ricca per quanto riguarda la risposta della struttura.

Per realizzare un'analisi non lineare dinamica, è necessaria, oltre alla definizione accurata della variazione dell'accelerazione durante l'evento sismico, anche la definizione di un legame costitutivo che tenga conto del degrado del materiale sottoposto all'azione sismica.

Il comportamento dinamico di una struttura può essere studiato secondo due approcci diversi. Un primo approccio suppone che il collasso della struttura avvenga nel momento in cui, sotto i carichi ciclici, si raggiunge il limite del contenuto di energia che può essere dissipata dalla struttura. Il secondo approccio suppone che il collasso avvenga quando la struttura raggiunge il valore massimo dello spostamento può subire sotto carichi ciclici. Il primo approccio è più adatto per strutture che, sotto carico ciclico, presentano una risposta, anch'essa ciclica, caratterizzata da meccanismi di degrado progressivo, e che ha delle escursioni nel range inelastico per una grande quantità di cicli; il collasso avviene quindi per un accumulo di energia plastica dissipata. Il secondo approccio è più adatto se può essere assunto che il collasso avvenga nel momento di massima escursione inelastica, indipendentemente della quantità di energia dissipata durante la risposta isteretica.

Al momento di valutare il grado di danneggiamento di una struttura, è buona norma, secondo quanto detto in precedenza, che si tengano in considerazione i due approcci, perché la risposta vera della struttura, sotto una certa azione sismica, dipende anche della variazione della forzante nel tempo. Un accelerogramma che presenta un unico picco massimo di accelerazione ben definito, con una durata molto corta, a cui corrisponde una forzante quasi impulsiva, può portare a collasso la struttura facendole raggiungere uno spostamento massimo; quindi l'approccio in duttilità, per valutare il danneggiamento alla struttura, sarebbe sufficiente. Questo tipo di accelerogrammi tende a sollecitare di più le strutture che hanno una frequenza fondamentale molto alta, cioè strutture molto rigide.

Se invece l'accelerogramma presenta un andamento omogeneo in tutta la sua durata, e questa è elevata, è più probabile che la struttura abbia una risposta rappresentata da molti cicli con escursione nel range inelastico, e quindi un approccio di tipo energetico è il più adatto per valutare il danneggiamento. Gli accelerogrammi che presentano questa forma tendono a sollecitare di più strutture con una frequenza fondamentale bassa che tendono ad accumulare molta energia man mano che si sviluppa l'evento sismico. Tutto questo però è molto variabile visto che la risposta di una struttura dipende da molti parametri che possono far variare di molto il suo andamento. [zara hall]

Per eseguire la valutazione del danneggiamento di una struttura, secondo i due approcci precedenti, c'è bisogno di definire i parametri da considerare e che tengano conto delle caratteristiche dissipative e di duttilità. Alcuni parametri sono:

- Spettri di duttilità cinematica.
- Spettri di duttilità ciclica (approccio in duttilità).
- Spettri di energia isteretica (approccio in energia).
- Indice di Park e Ang.

Questi parametri saranno definiti nei paragrafi successivi più dettagliatamente.

### **3.2 Caratterizzazione Sdof**

Da quanto si è detto precedentemente, per valutare la risposta della struttura ad una data azione sismica, è importante definire il modello che verrà a rappresentare le caratteristiche di resistenza e duttilità della struttura. Si definiscono a questo punto due tipi di sistemi:

Sistemi ad un grado di libertà (SDOF).

Sistemi ad N gradi di libertà (MDOF).

I primi sono sistemi che riescono a rappresentare la risposta della struttura in maniera macroscopica, cioè, permettono di valutare grosso modo il comportamento della struttura tenendo conto delle leggi isteretiche che governano la risposta sismica. I secondi

invece permettono un'analisi strutturale più dettagliata perché tengono conto della distribuzione delle masse e delle rigidità nella intera struttura, approssimando meglio la risposta sismica del sistema. Visto che lo scopo di questo lavoro di tesi è realizzare una verifica del metodo proposto da Cecini [ ] basta considerare un sistema ad un grado di libertà, e assegnare a questo diversi legami costitutivi per vedere il grado di danneggiamento che presenterebbe una qualsiasi struttura sotto l'azione sismica.

Un sistema SDOF, soggetto ad una forzante sismica, che varia nel tempo, può essere rappresentato dal seguente schema:

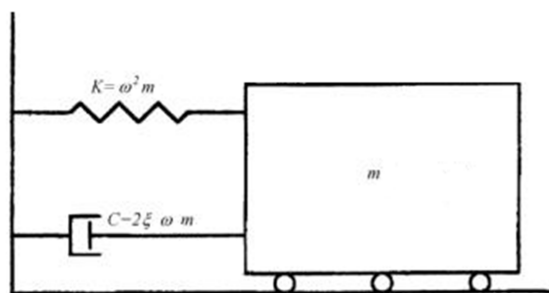


Figura 3.1 Sistema ad un grado di libertà

e dalla equazione di equilibrio dinamico definita dall'espressione:

dove  $R(t,k)$  è la funzione che rappresenta il legame costitutivo della struttura. Questo legame costitutivo individua efficacemente il reale comportamento isteretico della struttura, e può essere definito in modi diversi.

### 3.2.1 Legami Costitutivi

La modellazione del comportamento di strutture sotto carichi ciclici è basata su due punti fondamentali:

La definizione di un criterio di collasso per risposte isteretiche del sistema.

L'introduzione di leggi che regolano l'andamento isteretico dei legami costitutivi.



La definizione del criterio di collasso può essere fatta identificando i parametri che andranno a determinare il grado di danneggiamento della struttura, e definendo le soglie che permetteranno di dire il momento nel quale si è raggiunto il collasso della stessa.

La definizione di leggi che regolano il comportamento della struttura sotto carichi ciclici è fatta tramite dei legami costitutivi che possono essere caratterizzati con dei modelli diversi. In particolare è possibile distinguere tre tipi di modelli: modelli non evolutivi, nei quali lo stato del sistema al tempo  $t_{i+1}$  dipende esclusivamente dello stato al tempo  $t_i$ ; modelli evolutivi, cioè modelli nei quali lo stato del sistema al tempo  $t_{i+1}$  dipende da vari stati precedenti  $t_j$ ; modelli degradanti, ovvero modelli dove lo stato del sistema al tempo  $t_{i+1}$  dipende dallo stato a vari tempi  $t_j$  e dai valori di appropriati indici di danneggiamento al tempo  $t_j$ . Quelli che si prenderanno in considerazione sono i tre legami seguenti:

- Legame elasto – plastico perfetto. (EP)
- Legame elasto – plastico incrudente. (EPI)
- Legame elasto – plastico di tipo Takeda. (TAK)

Nel primo legame costitutivo si definisce una struttura la quale si comporta come perfettamente elastica, con una rigidezza  $k$ , fino a quando viene raggiunto il punto di snervamento definito dallo spostamento di snervamento  $u_y$ , da cui parte un ramo perfettamente plastico. Questo modello è rappresentato dal seguente schema:

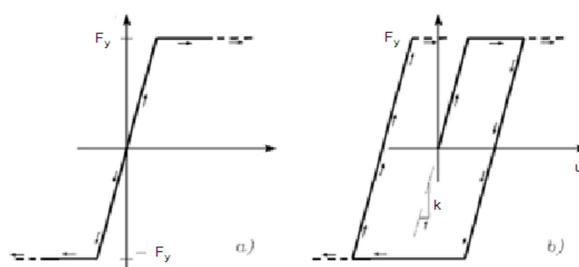


Figura 3.2 Legame elasto – plastico perfetto per carico monotono e ciclico.

Nel secondo legame costitutivo si ha un cambiamento del ramo plastico rispetto al legame costitutivo definito precedentemente. Una volta raggiunto lo spostamento di snervamento si presenta un ramo plastico con un incrudimento pari (ad esempio) al 3% della rigidezza considerata per il ramo elastico. Sotto queste considerazioni, il legame costitutivo avrà una forma del tipo:

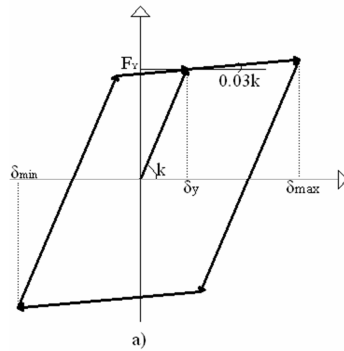


Figura N 3.3 Legame costitutivo elastico – plastico incoercito.

Il caso del legame costitutivo definito da Takeda, rappresenta un legame costitutivo tri – lineare degradante nel quale si presenta, dopo il punto di snervamento, una rigidezza secondaria diversa da quella principale, e un'entità di forza residua pari al 10% del valore allo snervamento. Questo legame costitutivo viene rappresentato in Figura 3.4

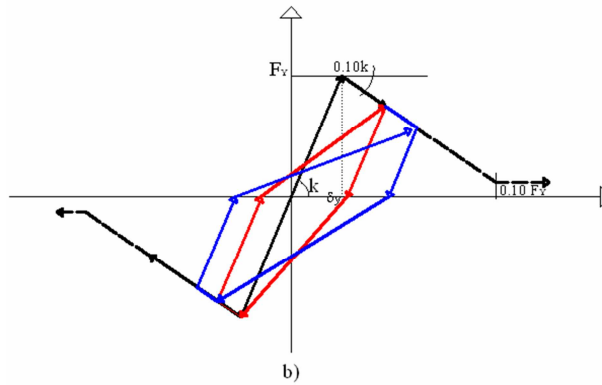


Figura 3.4 Legame costitutivo tri – lineare degradante di tipo Takeda.

## 4 DEFINIZIONE PARAMETRI DI PROGETTO

### 4.1 Azione sismica di progetto

#### 4.1.1 Records Naturali (REXEL)

Come avevamo detto precedentemente, la scelta degli insiemi di accelerogrammi naturali, spettro -compatibili con quello definito dalla normativa, sarà fatta con il programma REXEL. Per far questo si devono definire i parametri necessari perché il programma generi gli insiemi di accelerogrammi richiesti.

Come sito di analisi si è preso in considerazione, secondo le mappe interattive di pericolosità sismica, che si trovano sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, il punto della griglia riferito all'Aquila che, dopo la ricerca, ha presentato dei risultati ottenuti in tabella 4.1.

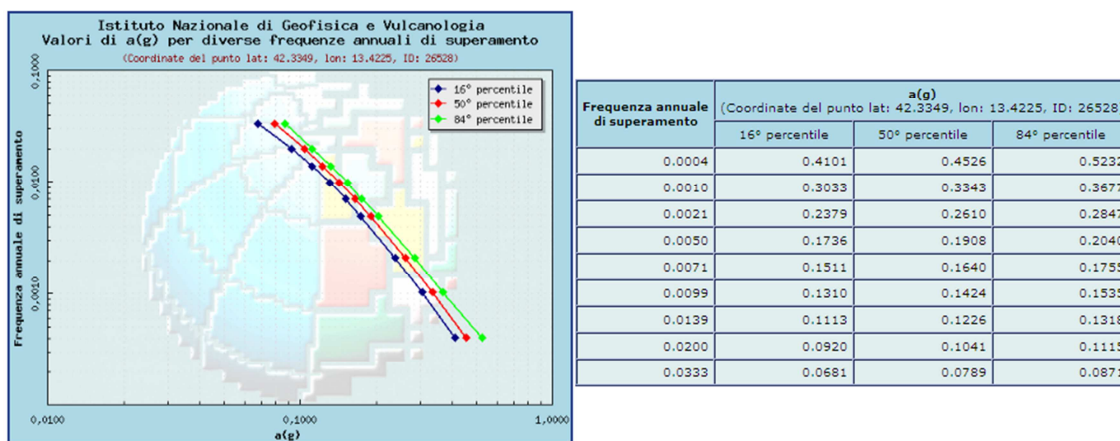


Tabella 4.1 Frequenza annuale di superamento e valore dell'accelerazione orizzontale del terreno per le diverse probabilità di superamento.

Definite le coordinate del sito in esame si inseriscono nel programma i valori necessari per definire lo spettro di progetto secondo la normativa italiana. Questi parametri sono elencati in seguito:

- Coordinate del punto della griglia in esame:

Latitudine: 42,3349°      longitudine: 13,4225      ID: 26J28

- Suolo Tipo: B
- Categoria topografica: T1
- $T_R = 475$  anni (Vita nominale  $V_n = 50$  anni, e probabilità di superamento in 50 anni per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) pari al 10%).
- $a_g = 2,610 g$
- Smorzamento  $\zeta = 5\%$
- $T_c^* = 0.347s$  ,  $F_o = 2,364$

Dopodiché, si definiscono i parametri che permettono al programma di realizzare una ricerca preliminare degli accelerogrammi che possono soddisfare al meglio l'intensità e la forma spettrale dello spettro di progetto. Una volta definite le coordinate del sito in esame, REXEL può calcolare anche la disaggregazione della pericolosità sismica, permettendo di vedere la magnitudo  $M$  e la distanza epicentrale  $R$  dei terremoti che più contribuiscono alla pericolosità sismica del sito. La disaggregazione della pericolosità sismica per l'Aquila viene rappresentata in Figura 4.1. Da questo grafico si può concludere che i terremoti più significativi per definire la pericolosità del sito sono quelli nell'intervallo 5,5 – 7  $M$  e tra 0 – 30 Km. Sotto queste considerazioni si deve fare una ricerca preliminare basata in questi range che definisce la disaggregazione del sito in esame.

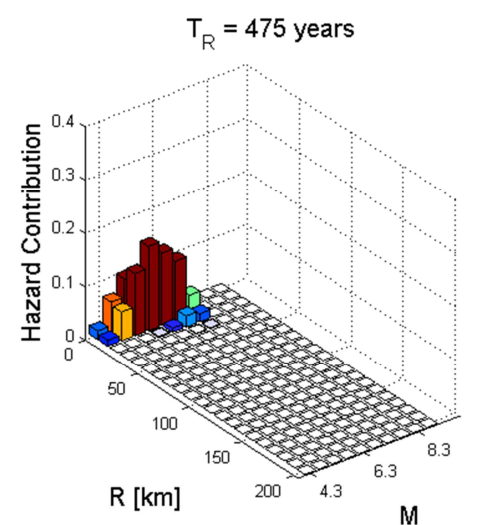


Figura 4.1 Disaggregazione della pericolosità sismica per l'Aquila.

Con questo in mente, si è suddiviso il range di magnitudo e distanza epicentrale in altri successivi range definiti in seguito:

- Range di Magnitudo:

Magnitudo: 4,5 – 5,5 *M*, 5 – 5,5 *M*, 5,5 – 6 *M*, 6 – 6,5 *M*, 6,5 – 7 *M*

- Range di Distanze epicentrali:

Distanze epicentrali: 0 – 10 Km *R*, 10 -30 Km *R*

Così facendo, si fanno 20 analisi diverse, visto che si devono definire sia record scalati che quelli non scalati, per vedere se il programma riesce a trovare un set di accelerogrammi spettro-compatibili in media, per i valori di *M* e *R* elencati. Si deve tener conto anche del fatto che il programma presenta al suo interno due database, e quindi si farà l'analisi dei set di accelerogrammi per tutti e due i database.

Il programma richiede anche di assegnare i limiti di spettro-compatibilità che deve rispettare la media dei set di accelerogrammi, e questi sono definiti come segue:

- Tolleranza minima di matching: 10%
- Tolleranza massima di matching: 30%

Range dei valori di periodo nei quali deve essere rispettata la spettro – compatibilità: [0.15 – 2s]

Per questo lavoro di tesi verrà definita l'azione sismica in un'unica direzione e quindi al programma verrà chiesto di identificare un set di sette accelerogrammi spettro – compatibili secondo quanto prescritto dalla normativa.

Dai risultati ottenuti con REXEL si può evidenziare che per i range di 5,0 – 5,5 *M* (0-10 Km e 10-30 Km) in tutti e due i database, 5,5 – 6,0 *M* (0-10Km e 10-30 Km) per il database italiano e tra 0-10 Km per il database europeo, 6,0 – 6,5 *M* (0-10 Km e 10-30 Km) per il database italiano e tra 0-10 Km per il database europeo, 6,5 – 7 *M* (0-10 Km e 10-30 Km) per il database italiano e tra 0-10 Km per il database europeo, REXEL non riporta nessun set spettro compatibile secondo i limiti prestabiliti prima, né per accelerogrammi naturali né per quelli scalati. Quindi, i risultati ottenuti con questo programma si presentano solo

per i range 5,5 – 6 *M* con *R* = 10-30 Km (solo accelerogrammi scalati, nel database europeo), 6 – 6,5 *M* con *R* = 10-30 Km (per accelerogrammi sia scalati che non scalati, nel database europeo) e 6,5 – 7 *M* con *R* = 10 – 30 Km (per accelerogrammi sia scalati che non scalati, nel database europeo).

L'azione sismica viene alla fine definita con 35 accelerogrammi provenienti da 14 eventi isolati. Gli spettri dei 5 set vengono riportati in Figura 4.2

Dal programma si ottiene anche la media dei fattori di scala applicati a tutti i records, per i set che sono stati scalati affinché raggiungano la spettro – compatibilità. I fattori sono riportati in seguito.

| Set REXEL        | Media Fatt. scala |
|------------------|-------------------|
| 5,5 – 6 <i>M</i> | 4,1465            |
| 6 – 6,5 <i>M</i> | 4,9225            |
| 6,5 – 7 <i>M</i> | 1,0716            |

Tabella 4.2 Media dei fattori di scala per i set di accelerogrammi ottenuti con REXEL

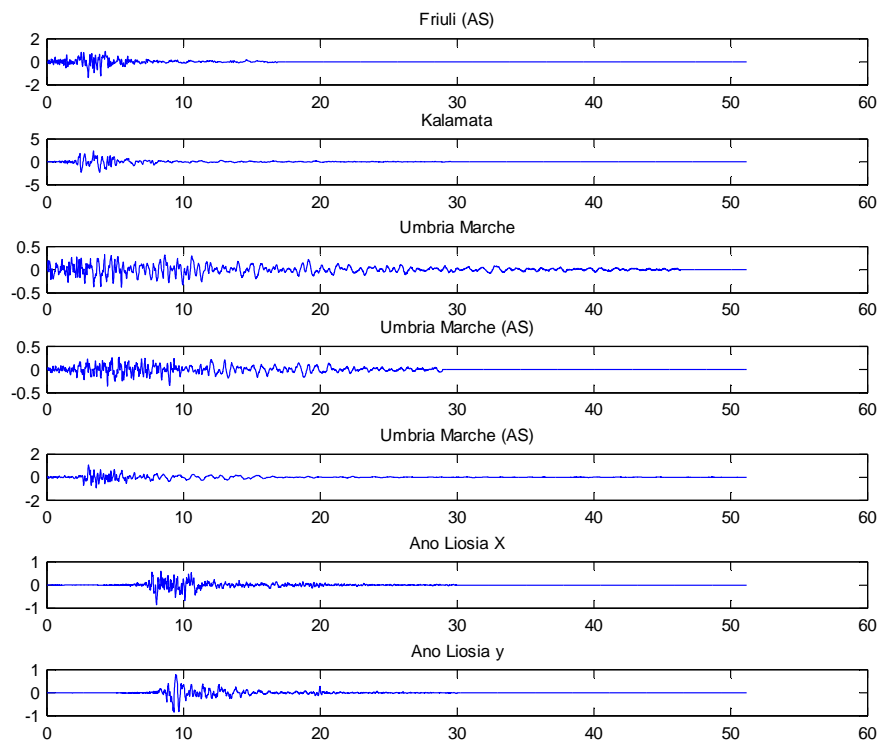
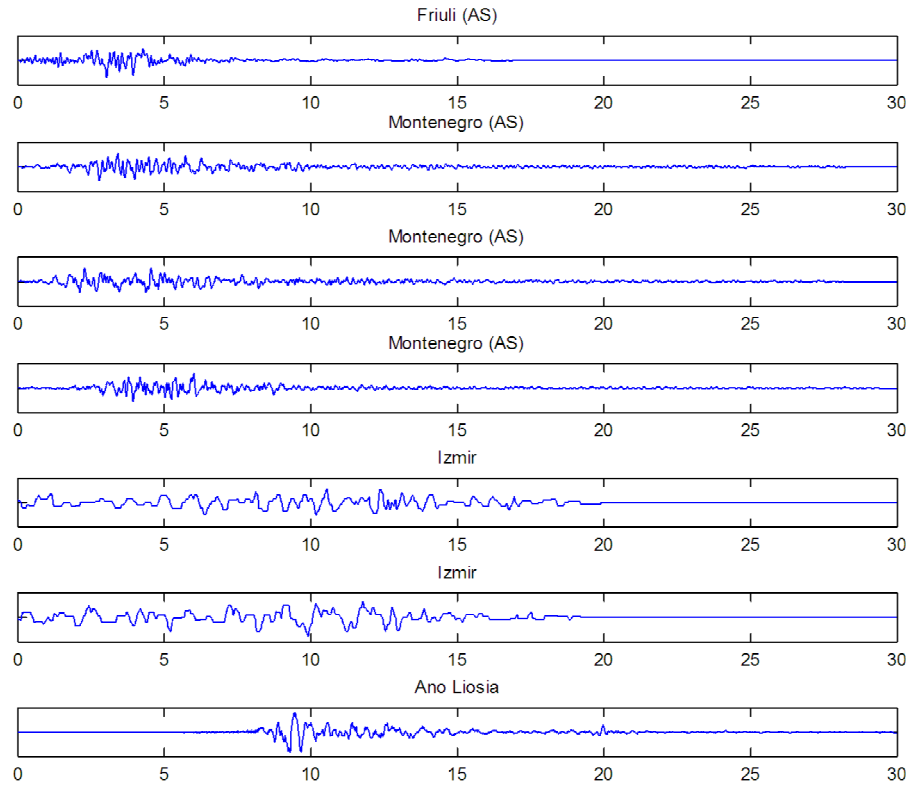
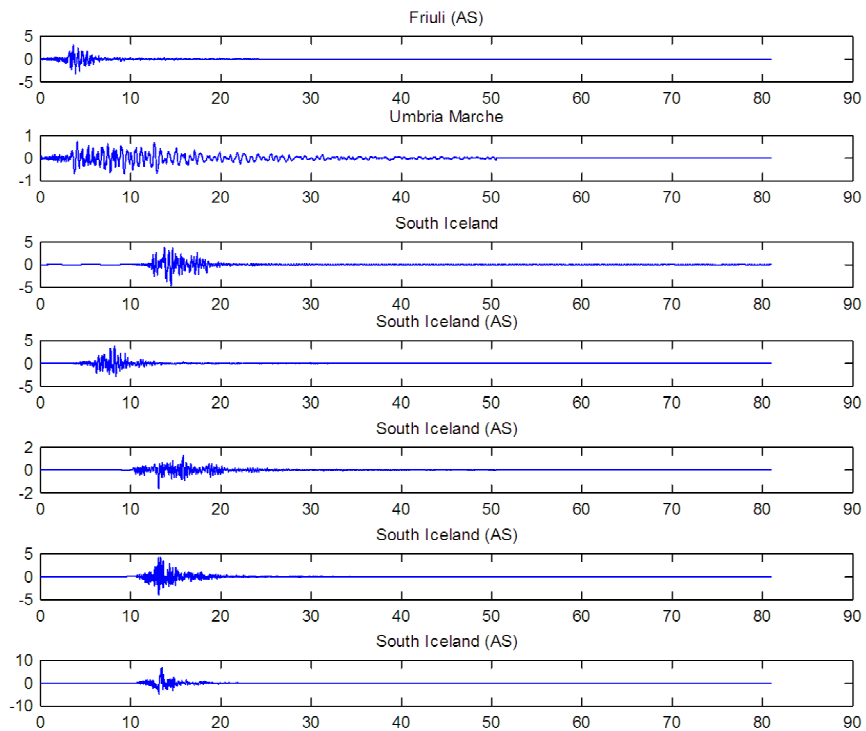


Figura 4.2 Set Accelerogrammi Naturali REXEL (Set 5,5 – 6M Acc. Scalati)

Set 6 - 6,5M Acc Non Scalati



Set 6 - 6,5M Acc. Scalati

Figura 4.2 Set Accelerogrammi Naturali REXEL

Set 6,5 - 7M Acc. Non scalati

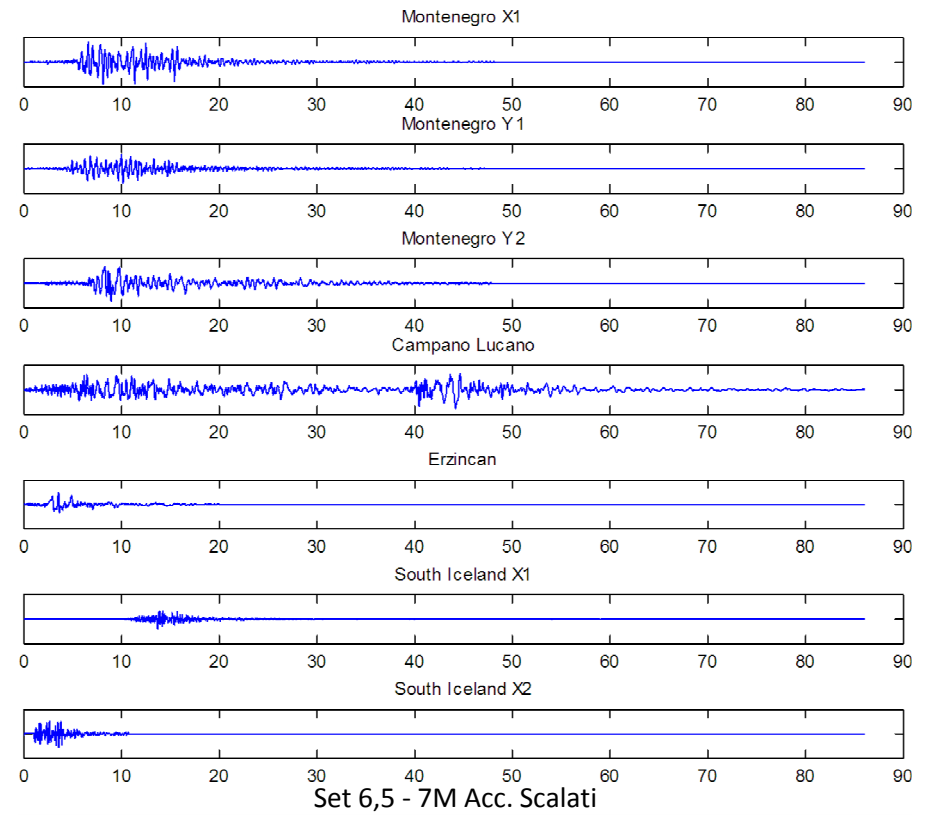
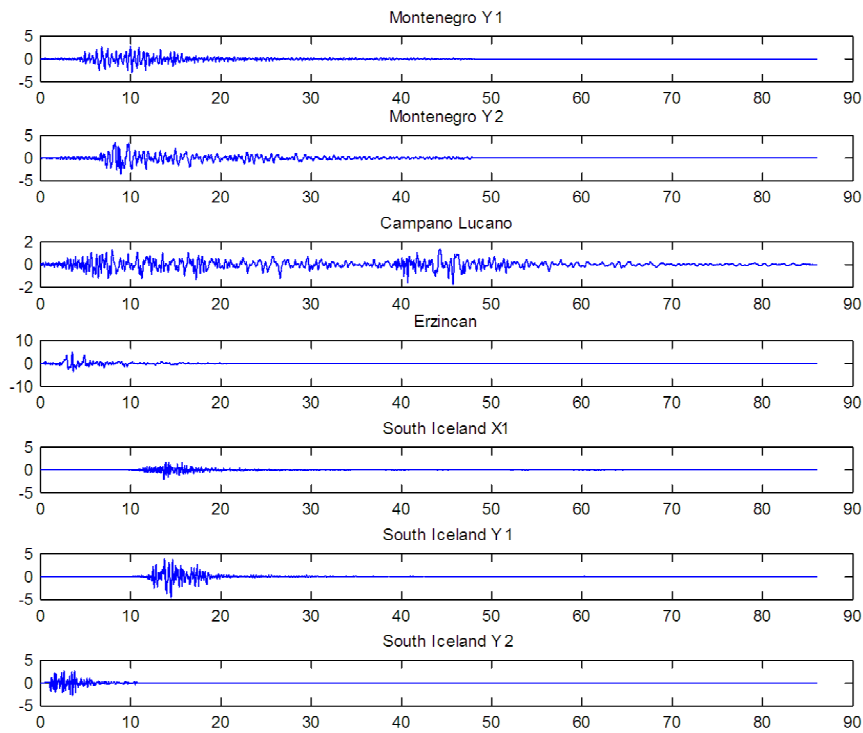
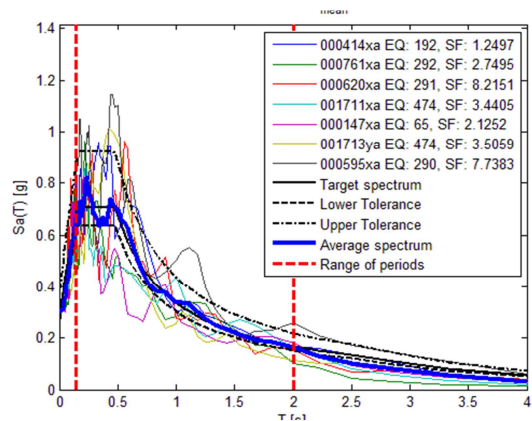
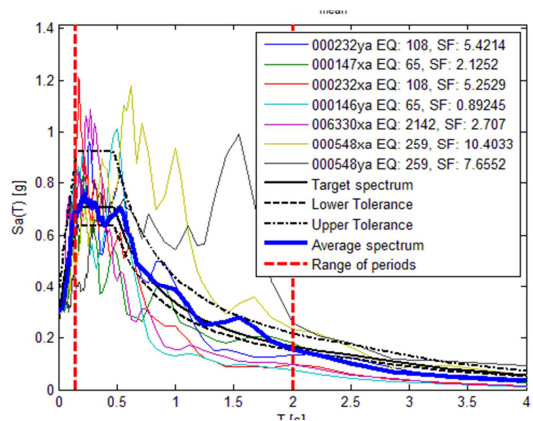


Figura 4.2 Set Accelerogrammi Naturali REXEL

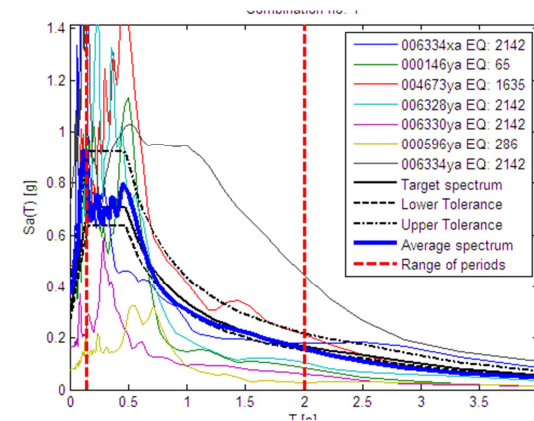




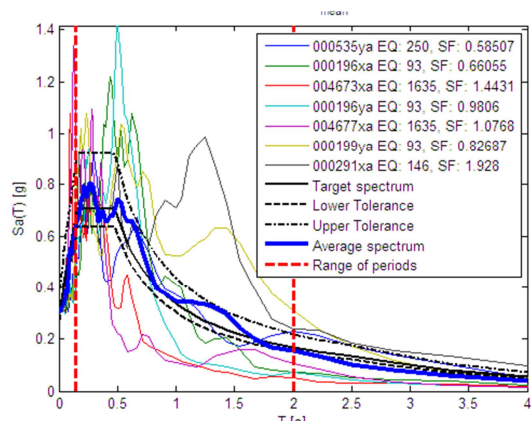
REXEL Scalati 5,5 - 6 M



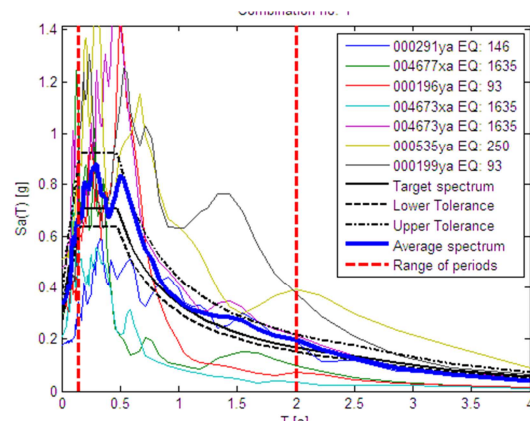
REXEL Scalati 6 - 6,5 M



REXEL Non Scalati 6 - 6,5 M



REXEL Scalati 6,5 - 7 M



REXEL Non Scalati 6,5 - 7 M

Figura 4.3 Spettri di risposta elastica in accelerazione per i 5 set definiti con REXEL

Vediamo da questi risultati che gli spettri, soprattutto quelli definiti per i set 6 – 6,5  $M$  e 6,5 – 7  $M$ , presentano una dispersione abbastanza alta rispetto allo spettro definito dalla normativa italiana. Anche si verifica che, solo in pochi punti, in riferimento ai singoli spettri, rientrano entro i limiti di matching che sono stati stabiliti precedentemente. Comunque si vede che la spettro – compatibilità viene raggiunta, in media, per ogni set definito da REXEL. Nel riquadro allegato in ogni grafico della Figura 4.3, si può vedere anche l'informazione riguardante al codice identificativo di ogni record corrispondente al database europeo, e, per il caso dei set scalati, anche il fattore di scala applicato ad ogni spettro perché si raggiunga la spettro - compatibilità.

#### **4.1.2 Accelerogrammi Modificati (Cecini)**

A questo punto, una volta definiti i set di accelerogrammi che, scalati o naturali, rispettano la spettro – compatibilità, si applica il metodo di correzione [] per rendere lo spettro del singolo accelerogramma compatibile con quello definito dalla normativa italiana. Soltanto per chiarire, se la spettro-compatibilità viene soddisfatta per ogni singolo accelerogramma, è data per scontata anche la spettro-compatibilità in media del set di records definito da REXEL; quindi in questo caso perde senso parlare di spettro-compatibilità in media, cosa che non accade con i set definiti da REXEL.

Quello che si fa è prendere ogni singolo accelerogramma del set e applicare la proposta di correzione []. Quello che otterremo è un accelerogramma corretto con una procedura che, come si è detto prima, modifica gli accelerogrammi tramite delle wavelet per aggiungere o togliere, in certi punti, contenuti energetici in modo tale che lo spettro di risposta rientri entro i limiti prestabiliti di compatibilità.

Se si prende in considerazione l'accelerogramma registrato a Campano Lucano (CI: 000291xa), appartenente al set di accelerogrammi scalati tra 6,5 – 7  $M$ , si ottiene l'andamento mostrato in Figura 4.4

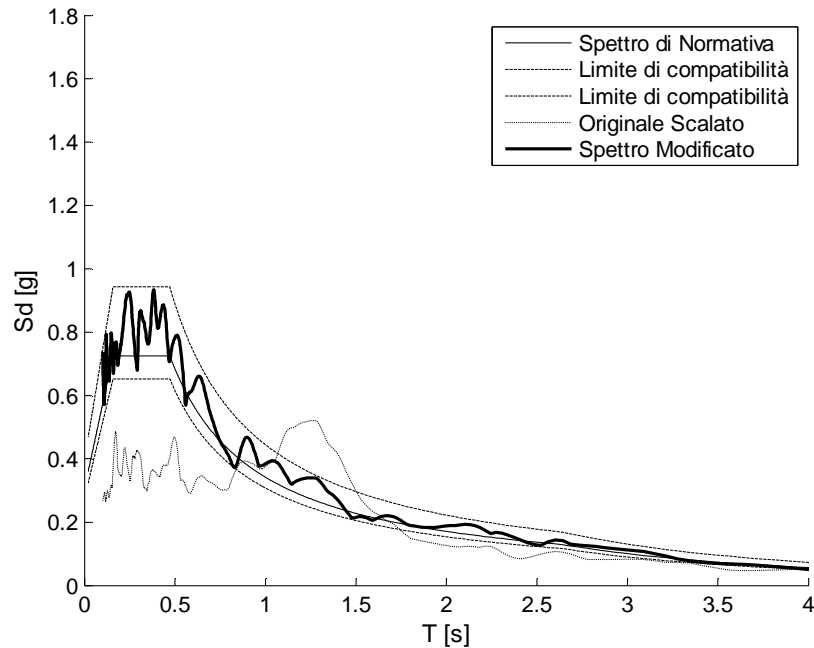


Figura 4.4 Spettro di risposta elastica dell'accelerogramma Campano Lucano.

Si vede quindi che per il range di periodi tra 0 s – 1 s lo spettro di risposta dell'accelerogramma tende ad avere uno scarto molto grande, in difetto, rispetto ai limiti di compatibilità, mentre che per il range di periodi tra 1 s - 1,5 s, tende a presentare valori molto più alti rispetto allo spettro di progetto. Allo stesso tempo si vede, però, che, applicata la procedura di modifica, lo spettro di risposta dell'accelerogramma modificato rientra perfettamente entro i limiti prestabiliti, e non solo per il range di periodi definiti su REXEL (0.15 s -2 s) ma anche per periodi fino a 4 s.

Una volta applicata la procedura di correzione a tutti i 35 accelerogrammi dei 5 set definita con REXEL, l'andamento degli spettri presenta una forma del tipo mostrato in Figura 4.5

Come si vede in figura, tutti gli spettri di risposta corrispondenti agli accelerogrammi appartenenti al set di record modificati rientrano nei limiti di spettro – compatibilità, e quindi la media dei sette spettri è anche entro questi limiti.

Allora, la proposta di correzione proposta da Cecini ha il grande vantaggio di lavorare con delle wavelet, che permettono di portare all'accelerogramma dei cambiamenti sia nel dominio del tempo, sia nel dominio delle frequenze. Un altro vantaggio è di poter ge-

nerare una qualsiasi quantità di accelerogrammi a partire da quello modificato; questo grazie alla randomizzazione dei parametri del accelerogramma base, considerando che questo permetta di rappresentare un processo stocastico dell'evento sismico.

Tenendo questo in considerazione, si possono prendere gli accelerogrammi che definiscono i 5 set sopra definiti e generarne altri accelerogrammi che saranno funzione dei primi. Si è voluto generare 10 accelerogrammi per ogni accelerogramma modificato, il che significa avere 350 accelerogrammi generati con la randomizzazione proposta []. I risultati della randomizzazione per l'accelerogramma South Iceland Aftershock (CI: 006334ya) del set di 6 – 6,5 *M* sono riportati in Figura 4.6

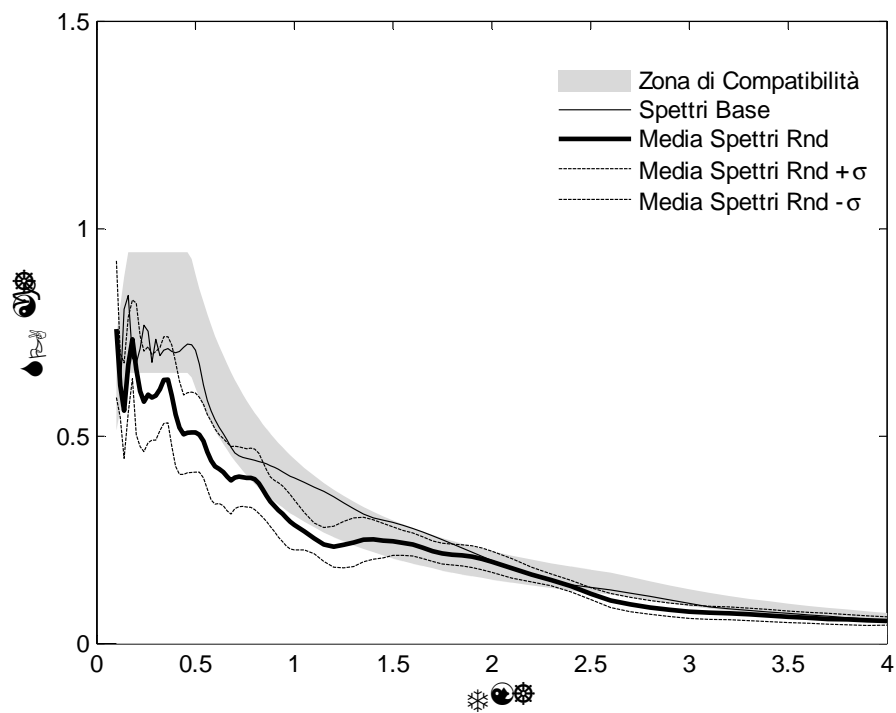
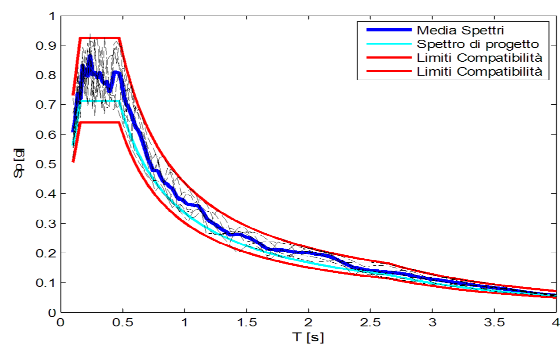
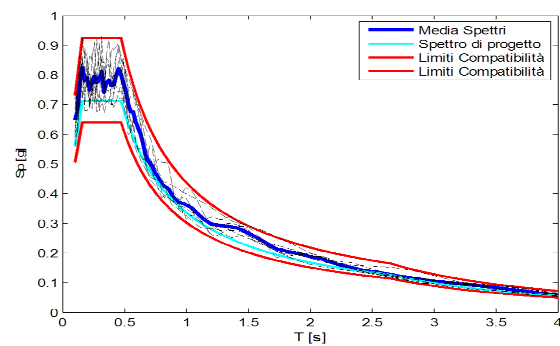


Figura 4.6 Media degli spettri degli accelerogrammi generati con la procedura di randomizzazione stocastica.

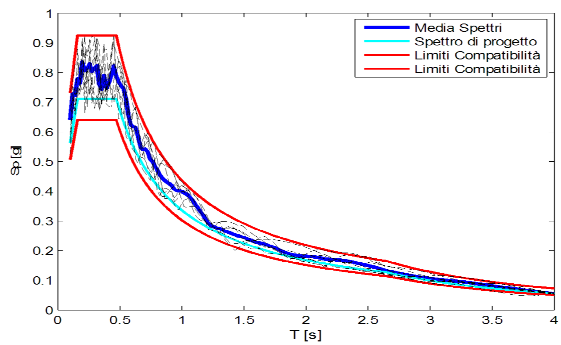
Dai risultati ottenuti si può osservare che la media dei 10 accelerogrammi generati con la proposta di randomizzazione, è molto vicina all'accelerogramma base utilizzato per la generazione, che significa che la proposta mantiene praticamente invariate le caratteristiche di ampiezza dell'accelerogramma di base.



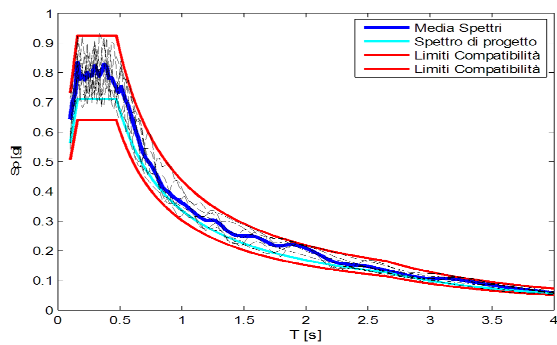
Spettri modificati Set S  
5,5 - 6 M



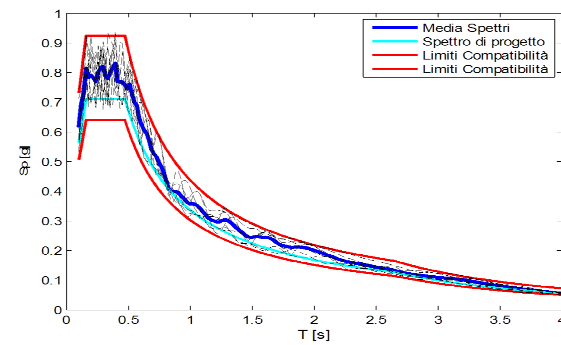
Spettri modificati Set  
NS 6 - 6,5 M



Spettri modificati Set S  
6 - 6,5 M



Spettri modificati Set  
NS 6,5 - 7 M



Spettri modificati Set S  
6,5 - 7 M

Figura 4.5 Spettri modificati con le wavelet per tutti i 5 set generati da REXEL.

Dall'altra parte si può osservare che, anche se gli accelerogrammi generati, in media, si avvicinano di molto a quello di base, quando si vanno a calcolare gli spettri di risposta di quelli generati, e se ne fa la media, si ottiene che questa non rispetta la compatibilità, cioè, in certi intervalli del periodo la media degli spettri non rientra nei limiti stabiliti di compatibilità. Quindi, per rendere la media spettro-compatibile si potrebbe cercare di modificare ancora gli accelerogrammi, dando però più importanza a quelli che hanno uno scarto maggiore, rispetto allo spettro di risposta dell'accelerogramma di base. Si sceglie però di rendere direttamente spettro-compatibili tutti gli accelerogrammi. I risultati ottenuti con la correzione del set di 10 accelerogrammi sono presentati in Figura 4.7.

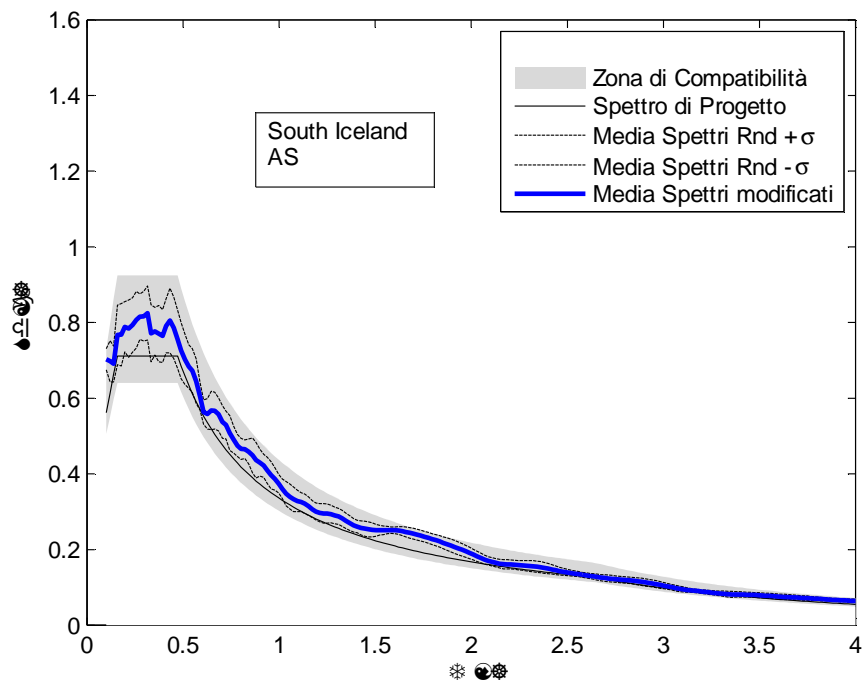


Figura 4.7 Media degli spettri degli accelerogrammi generati con la procedura di randomizzazione stocastica.

Quindi, in questo modo tutti gli accelerogrammi rispettano la spettro compatibilità, e si vede come sia la media, sia lo scarto rispetto alla media rientrino nei limiti di compatibilità.

In complessivo si ha il seguente elenco dei set di accelerogrammi riportati sotto:

- Set di 7 accelerogrammi naturali, spettro compatibili in media.

- 35 set di 10 accelerogrammi modificati con il metodo Cecini, dove ognuno degli accelerogrammi soddisfa la spettro compatibili.

## 4.2 Definizione parametri di progetto del sistema SDoF

Si è visto che la caratterizzazione di qualsiasi sistema, può essere fatta sia in maniera dettagliata, definendo un sistema a vari gradi di libertà per avere una risposta della struttura più approssimata a quella vera, sia in maniera macroscopica con un sistema ad un grado di libertà che presenta dei parametri di rigidità e resistenza uguali a quelli della struttura vera. Si è detto anche che, siccome lo scopo di questo lavoro di tesi è fare una valutazione generalizzata dei sistemi strutturali sottoposti alla azione sismica, definita con gli accelerogrammi ottenuti con il metodo precedentemente stabilito, si prende in considerazione il sistema ad un grado di libertà e ne si definiscono i suoi parametri di rigidità e resistenza.

Quindi, a questo punto possiamo definire i seguenti parametri, secondo l'equazione di equilibrio dinamico del SDoF definita in eq.[..], che per comodità viene riportata in seguito insieme ai parametri:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + R^*(t, k) = -m\ddot{x}_g$$

Dove:

$$m = 1$$

$$\omega^2 = k/m$$

$$v = 2\%$$

$$b = 2 v \sqrt{km}$$

Con

$m$  = massa del SDoF che verrà supposta unitaria

$\omega$  = pulsazione fondamentale della struttura e che viene definita dalla seguente relazione

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$u$  = percentuale di smorzamento viscoso

$b$  = costante di smorzamento viscoso che moltiplica la componente cinematica dell'equazione di equilibrio dinamica

La percentuale di smorzamento viscoso viene supposta pari al 2% visto che l'energia dissipata dalla struttura dipende non solo dal coefficiente di smorzamento, ma anche dal ciclo isteretico che si istaura nel sistema nel momento in cui questo viene sottoposto alla forzante ciclica rappresentata dall'accelerogramma.

I periodi da considerare nell'analisi saranno definiti come segue:

$$T \begin{cases} \text{passo} = 0.1 \text{ per } T \in [0.1 - 2s] \\ \text{passo} = 0.5 \text{ per } T \in [2 - 4s] \end{cases}$$

Questa discretizzazione si fa in questo modo perché sono i periodi tra 0.1 – 2s quelli che ci interessano di più al nostro analisi, visto che sono i periodi che di solito presentano le strutture, quindi la discretizzazione si fa meno fitta per i periodi al di fuori di questo intervallo. Questo si fa anche perché nel range di valori del periodo [0.1 – 2s] di solito si presenta il valore di massima amplificazione dell'azione dinamica per le strutture civili.

#### 4.2.1 Parametri legami costitutivi

Definiti i parametri del SDof, è importante ora definire anche i parametri dei diversi legami costitutivi che sono stati elencati nei paragrafi precedenti.

Per tutti i legami costitutivi si deve definire innanzitutto lo spostamento di snervamento, che sarebbe lo spostamento per il quale la risposta del sistema non viene più definita dal ramo elastico, ma viene rappresentata dalla somma della deformazione in campo elastico, più quella in campo plastico.

A questo punto entra in gioco anche il parametro della duttilità. La duttilità è un parametro che mette in relazione la resistenza e la rigidità della struttura, e quindi per-



mette in un certo modo di controllare il grado di danneggiamento che la struttura soffre sotto l'azione sismica. La duttilità richiesta dal sisma ad una struttura è calcolata come:

Dove:

: spostamento atteso sotto sisma.

: spostamento massimo della struttura.

Quindi, visto che questo parametro, regola la variazione delle caratteristiche di rigidità e resistenza di una qualsiasi struttura, esso deve essere preso in considerazione nel momento in cui si vuole progettare una struttura affinché presenti un danneggiamento controllato sotto l'azione sismica.

Si definisce anche lo Strength Reduction Factor  $R_{\mu}$ , che fornisce il rapporto tra la forza di snervamento  $F_y$  per la quale deve essere progettata una struttura, in modo tale che questa subisca un danneggiamento riconducibile ad una duttilità  $\mu$ , e la resistenza che dovrebbe avere la stessa struttura per non subire danni, quindi per rimanere nel campo elastico. Questo parametro quindi viene definito dall'espressione:

Dove i parametri di  $F_{EL}$  e  $F_D$  sono stati schematizzati in Figura 4.8

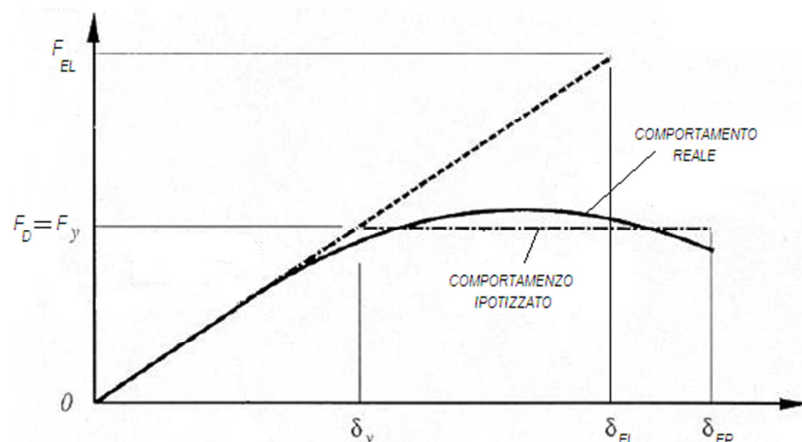


Figura 4.8 Comportamento della struttura sotto l'azione sismica per la determinazione del fattore  $R_{\mu}$ .

Allora, per mettere in relazione il fattore di riduzione della resistenza con il fattore di duttilità ci sono due approcci: il primo, nel quale si fa l'ipotesi di uguaglianza degli spostamenti massimi raggiunti dalla struttura sia nel comportamento elastico sia nel comportamento ipotizzato come reale; il secondo, dove si fa l'ipotesi di uguaglianza dell'energia di deformazione che presenta la struttura sottoposta a carico. Per semplicità si considererà il primo dei due approcci e che da come punto di partenza il grafico di Figura 4.9.

Da l'ipotesi di uguaglianza degli spostamenti si ottiene che:

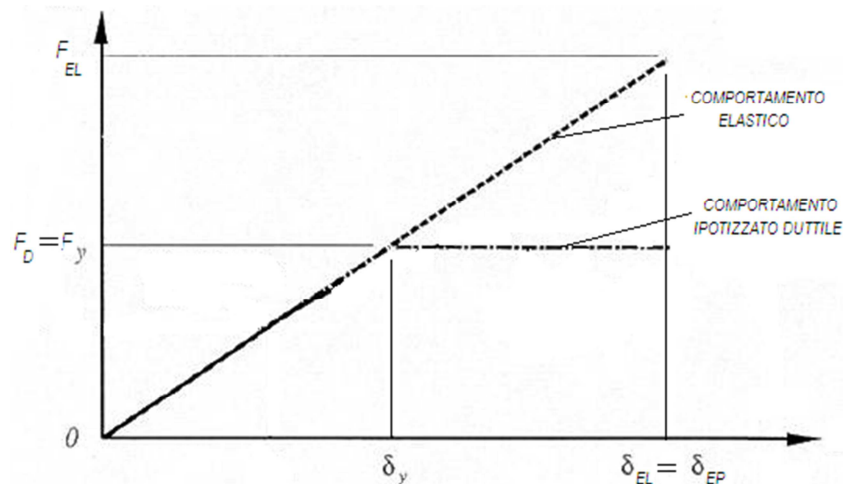


Figura 4.9 Ipotesi di uguaglianza degli spostamenti per il calcolo del fattore  $R_\mu$ .

Da quest'ultima relazione quindi, si può calcolare la forza di snervamento del sistema in analisi, visto che:

Si sa anche che la forza elastica di progetto viene caratterizzata dallo spettro elastico di progetto, che nel nostro caso è rappresentato anche dallo spettro che definisce la spettro – compatibilità. Da questa relazione quindi possiamo dire che

E quindi si definisce in questo modo la forza di snervamento  $F_y$  per l' $i$ -esimo sistema (visto che si hanno diversi valori del periodo fondamentale della struttura da analizzare), una volta si è fissato il fattore di riduzione della resistenza. Questo approccio viene detto anche di "*Constant Strength*". Con questo in mente si definiscono diversi livelli di duttilità, ovvero, si fa variare il fattore  $R_{\mu}$  che assumerà valori pari a 2, 4, 6, 8 e 10, per valutare la variazione della risposta del sistema al variare della sua duttilità.

Calcolati i parametri corrispondenti al punto di snervamento del SDof, si definiscono ora le percentuali di incrudimento per ogni legame costitutivo. Allora, per quanto riguarda al legame Elasto – Plastico con incrudimento (EPI), le percentuali di incrudimento che si terranno in considerazione saranno del 1% e del 3%. Per quanto riguarda il legame costitutivo trilineare degradante definito da Takeda, le percentuali di incrudimento considerate saranno del -2%, -5%, -8% e -10%. In questo modo si definiscono dei sistemi che non variano solo nella loro duttilità ma anche nella sua capacità di resistere a sforzi che rientrano nel ramo plastico della struttura.

## 5 ANALISI DEI RISULTATI

### 5.1 Spettri in duttilità cinematica

#### 5.1.1 Legame costitutivo TAKEDA

Si è definito, nei paragrafi precedenti, il fattore di duttilità che regola il danneggiamento della struttura sotto carichi dinamici. Questo fattore di duttilità, da quanto detto precedentemente sui metodi per determinare il danneggiamento di una struttura, permette quindi di valutare la risposta della struttura in base allo spostamento massimo raggiunto da essa nel momento in cui viene sottoposta al sisma. Questo fattore di duttilità può essere scritto anche sotto la forma:

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y}$$

Si può vedere che il fattore di duttilità definito con l'espressione eq n., per valori minori dell'unità, vuol dire che il sistema, secondo le caratteristiche di resistenza e rigidità, non snerva, cioè, rimane elastica durante l'intera durata dell'accelerogramma, e quindi a questo punto non ha senso parlare di duttilità, dato che la struttura non si danneggia.

Sono stati scelti due tipi diversi di accelerogrammi per studiare i casi più estremi nella nostra progettazione, cioè l'approccio in duttilità e l'approccio energetico che sono stati descritti nei paragrafi precedenti. Il primo accelerogramma è quello definito come Friuli (Aftershock), corrispondente al set di 6 – 6,5M Non Scalati, visto che questo presenta un andamento con dei picchi massimi concentrati tra 0 e 10s seguiti da picchi di intensità più bassi per il resto della durata dell'accelerogramma. Questo, insieme al fatto che la sua durata è molto più corta rispetto agli altri accelerogrammi del set, fa supporre che la risposta di una struttura soggetta a questo tipo di accelerogramma è di tipo impulsivo, e quindi il rispettivo collasso di essa si possa presentare per il raggiungimento in pochi cicli

dello spostamento massimo che essa possa subire. Il secondo accelerogramma è quello di Campano Lucano, appartenente al set di 6,5 – 7M, sia scalati, sia non scalati. Si prenderanno in considerazione tutti e due per mettere a confronto l'accelerogramma modificato, con l'accelerogramma naturale e quello scalato, in modo tale di vedere la variazione delle risposte in tutti e tre gli accelerogrammi. Si considera questo accelerogramma per il fatto che il suo andamento presenta dei picchi diffusi in maniera molto omogenea sull'intera durata dell'accelerogramma, il che fa pensare che la risposta della struttura soggetta all'azione sismica rappresentata in questo modo, sia caratterizzata da tanti cicli isteretici, che non necessariamente inducano alla struttura ad una escursione molto grande in spostamento, ma che comunque la possano portare al collasso grazie al raggiungimento della massima energia che può dissipare la struttura prima di collassare, cioè che compia la condizione fondamentale dell'approccio energetico.

Allora, per presentare i risultati, visto che noi abbiamo considerato una modifica dell'accelerogramma per renderlo spettro – compatibile, e abbiamo apportato un'altra modifica agli accelerogrammi che sono stati generati tramite la procedura di randomizzazione proposta da Cecini [], si riportano nelle figure successive i confronti tra i set di accelerogrammi generati stocasticamente, gli accelerogrammi modificati, e gli accelerogrammi naturali in modo tale di vedere quali sono gli effetti di queste modifiche sulla risposta della struttura.

Quindi, i risultati vengono suddivisi, oltre a quanto detto prima, anche in base al legame costitutivo utilizzato, e alla variazione della percentuale di incrudimento scelta per ogni legame costitutivo. Si ricorda che per il legame costitutivo trilineare degradante definito da Takeda [], sono state scelte quattro percentuali di incrudimento diverse e si hanno quattro sistemi definiti come S1, S2, S3 ed S4. Per il legame costitutivo elasto – plastico con incrudimento, sono stati scelti 2 percentuali di incrudimento diverse e quindi si definiscono i sistemi S1 ed S2.

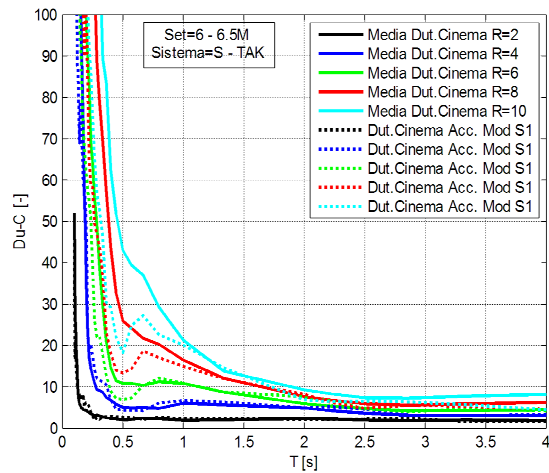
Allora, nella Figura 5.1 si rappresentano gli spettri di risposta in duttilità cinematica per l'accelerogramma Friuli (AS) che è stato definito precedentemente. Si rappresentano i sistemi S1, S2, S3 ed S4 (con percentuali di incrudimento diverse), variando per ogni sistema il fattore di duttilità. In questa figura si fa un confronto tra gli accelerogrammi che sono stati modificati con il metodo di Cecini [] e quelli che sono stati generati con la pro-

cedura di randomizzazione proposta dallo stesso. Si vede dalla figura che, i sistemi che hanno una percentuale di incrudimento più alta, cioè, il ramo incrudente ha una pendenza negativa più accentuata, essi presentano una richiesta in duttilità leggermente maggiore rispetto a quelli con percentuale di incrudimento più bassa. Questo si presenta perché, questi sistemi si degradano più rapidamente, permettendo alla struttura di raggiungere livelli di spostamenti massimi più alti di quelli che si hanno per percentuali di incrudimenti più basse, il che comporta un aumento diretto della duttilità richiesta dal sistema. Si può evidenziare anche che, i sistemi che sono stati soggetti agli accelerogrammi generati con la procedura stocastica, presentano in quasi tutto il range di periodi una duttilità richiesta maggiore, rispetto all'accelerogramma che è stato preso dai set di reali e poi modificato. Questo vuol dire che per questo tipo di accelerogramma, in linea di massima, la procedura di generazione e modifica per raggiungere la spettro – compatibilità, comporta un piccolo aumento dell'intensità dell'accelerogramma, e quindi un aumento della duttilità richiesta dal sistema, ma che comunque questo cambiamento rimane sufficientemente piccolo da seguire bene l'andamento definito dall'accelerogramma base. Anche in questa figura si può vedere il cambiamento che comporta la variazione del fattore di duttilità nel sistema. È quindi evidente che all'aumentare di esso, la struttura presenta un punto di snervamento più piccolo e quindi entra nel rango plastico per spostamenti piccoli di essa, e quindi si degrada più rapidamente, e quindi viene richiesta dal sistema una duttilità maggiore rispetto ai sistemi con duttilità minori, ovvero più rigidi.

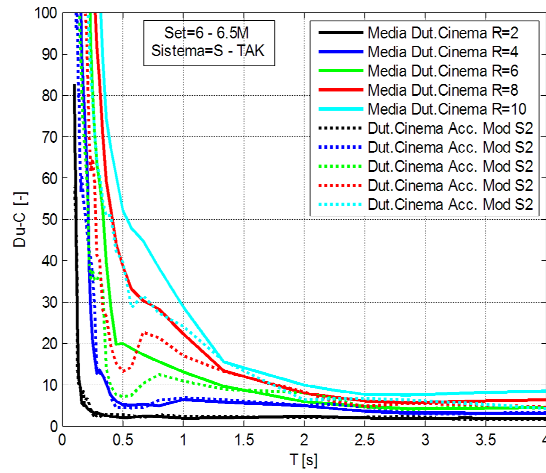
In Figura 5.2 si presentano gli spettri in duttilità cinematica, confrontando sia il set di accelerogrammi modificati sia quello generato tramite REXEL. In questo caso si presenta il confronto delle medie per il set di 6 -6,5M Non Scalato. Si può vedere che sia in funzione dell'incrudimento, sia in funzione del fattore di duttilità, la risposta del sistema in duttilità, per quanto riguarda il set di accelerogrammi modificati, presenta dei valori leggermente più alti rispetto alle risposte definite dai sistemi per il set di naturali. Questa modifica non comporta una variazione molto grande dell'andamento degli spettri dei due set, quindi si può dire che la variazione rappresentata dalla modifica degli accelerogrammi non rappresenta un cambiamento molto importante in duttilità cinematica.

Nei grafici di Figura 5.3 vengono confrontati gli spettri di risposta in duttilità cinematica per l'accelerogramma Friuli (AS), sia quello naturale, sia quello modificato. Si vede

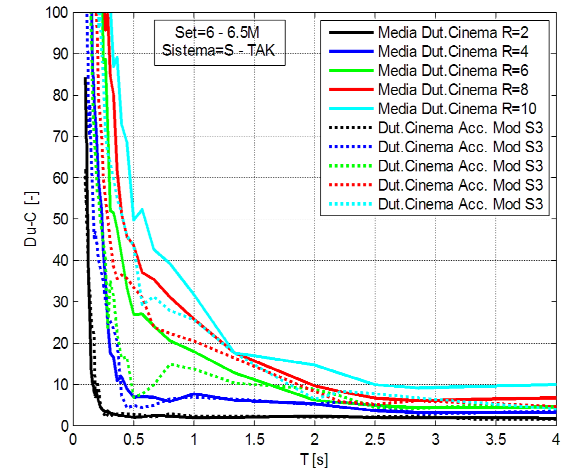
che le modifiche apportate all'accelerogramma per raggiungere la spettro - compatibilità, fanno variare lo spettro nel range di periodi tra 0.3 e 3s. il che comporta che la risposta in duttilità sia maggiore per l'accelerogramma modificato in questi punti. Dalla seconda figura si vede che per le duttilità più alte si genera uno scarto maggiore tra i due spettri per lo stesso sistema (stessa percentuale di incrudimento), rispetto a quelli spettri con fattore di duttilità più basso. Questo per il fatto che la struttura con una fattore di duttilità minore, essendo più rigida, permette spostamenti più piccoli, e quindi se le variazioni della forzante sono piccole, si risente di meno di questi cambi.



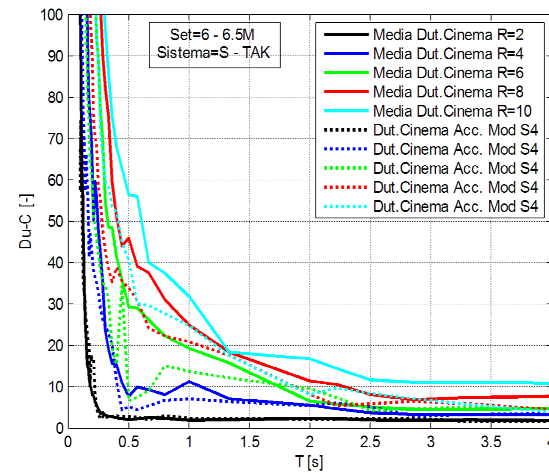
S 1



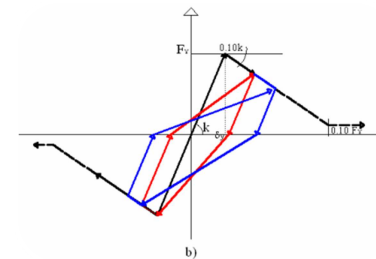
S 2



S 3



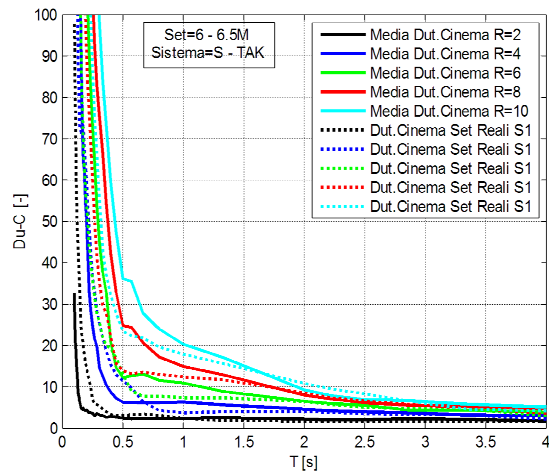
S 4



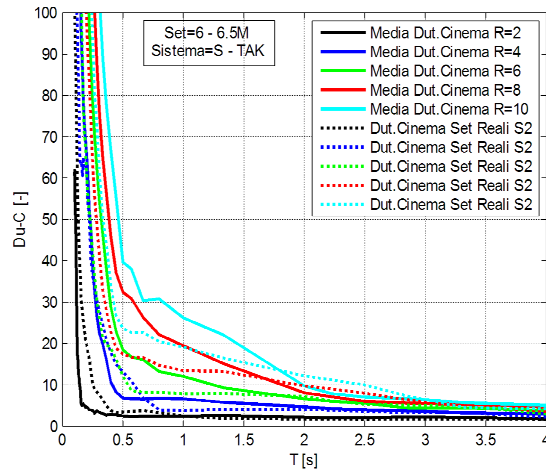
Legame costitutivo Takeda

Figura 5.1 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)

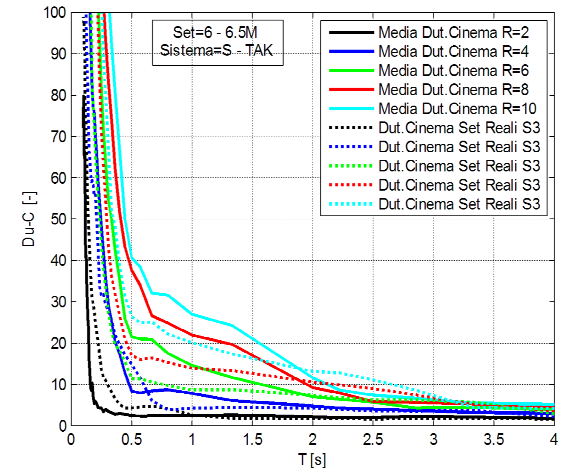




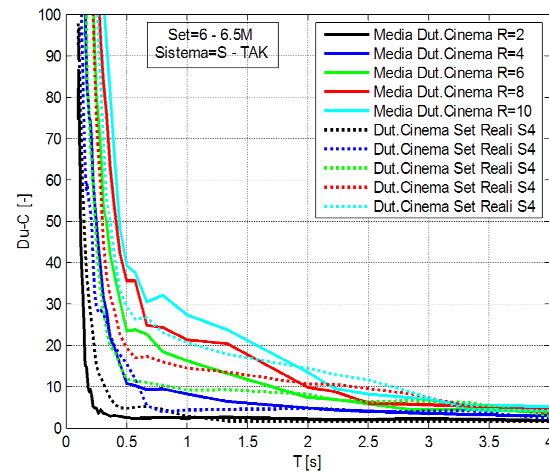
S 1



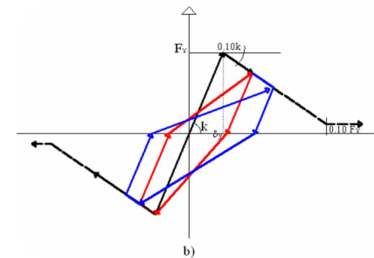
S 2



S 3



S 4



Legame costitutivo Takeda

Figura 5.2 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (medie modificati e naturali)

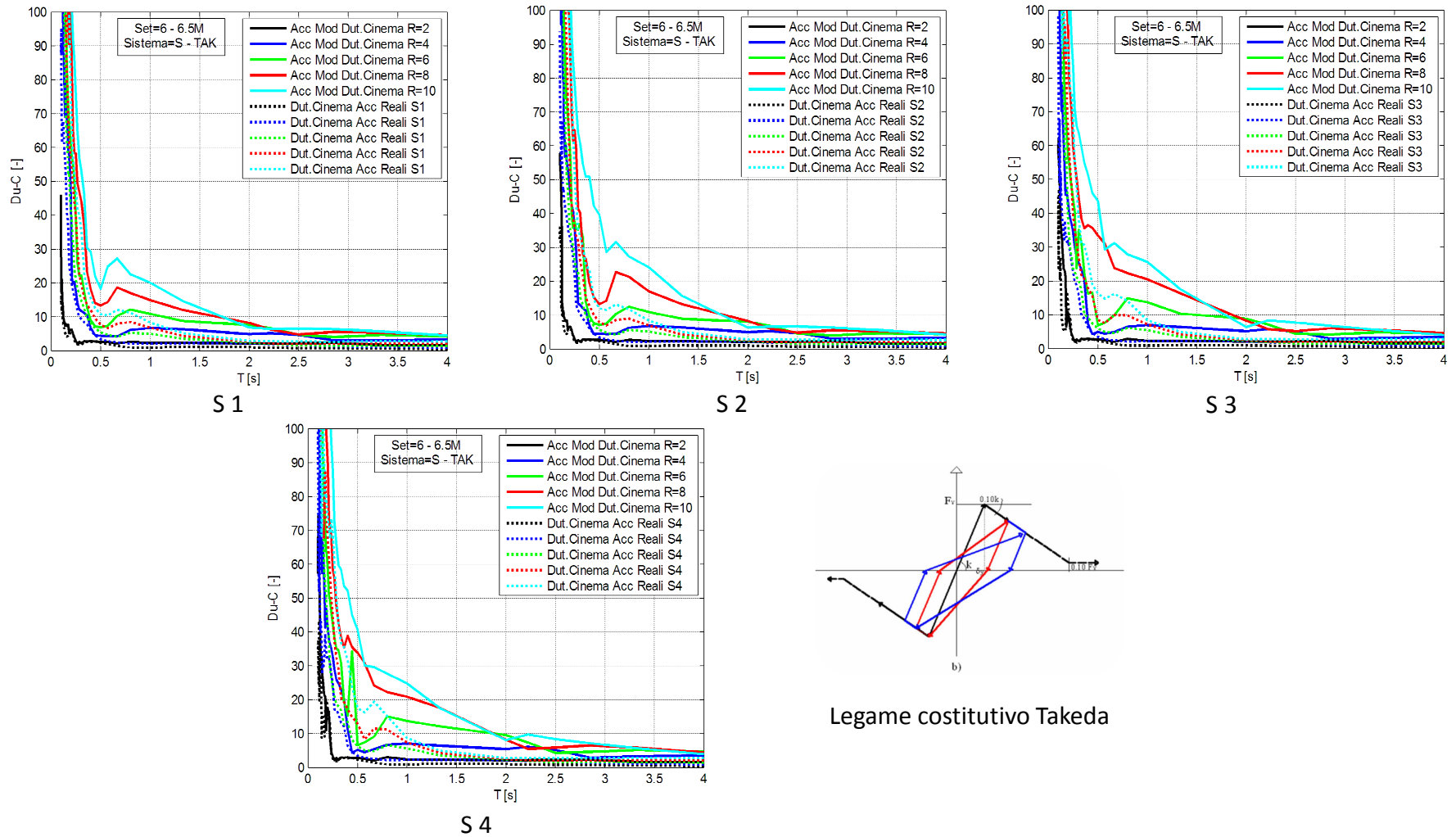


Figura 5.3 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)

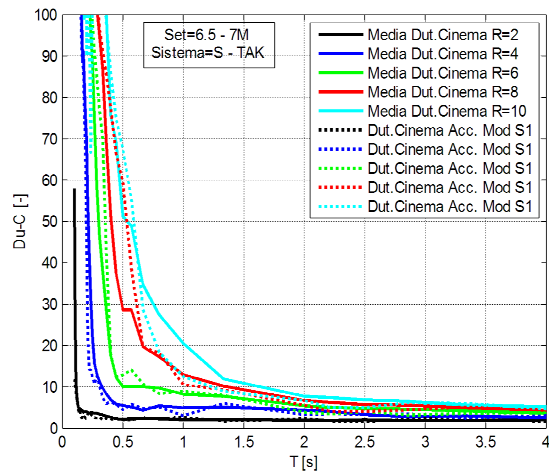
Nel caso dell'accelerogramma Campano Lucano, si sono presi in considerazione i risultati ottenuti in base all'accelerogramma naturale, quello scalato (visto che appartiene anche al set di scalati 6.5 – 7M), e anche il suo modificato. Questo per vedere quanto può variare la risposta della struttura anche con una scalatura lineare.

In Figura 5.4 si presenta il confronto tra gli accelerogrammi generati stocasticamente (e ulteriormente modificati) e quelli naturali che sono stati modificati. Si può vedere che in certi range di periodi la media della risposta in duttilità cinematica per il set di 10 accelerogrammi è maggiore rispetto al loro accelerogramma base. In altri punti però si presenta la situazione opposta, cioè, l'accelerogramma base ha una risposta in duttilità più alta. Questo accade perché anche se l'accelerogramma base è stato modificato per renderlo spettro – compatibile, esso comunque tenderà a presentare una certa dispersione che sarà sempre maggiore dalla media del set di 10 accelerogrammi generati. Comunque, si può vedere che, per ogni singolo sistema, la media degli spettri in duttilità per gli accelerogrammi generati, si adatta molto bene alla risposta di quello di base, il che può condurre a pensare che la modifica, per quanto riguarda la duttilità cinematica, in questo tipo di accelerogramma sia ben contenuta. Ovviamente questi risultati saranno uguali a quelli ottenuti sia per l'accelerogramma naturale, sia per quello scalato visto che il metodo proposto da Cecini [ ] presenta la stessa procedura di scalatura lineare che viene utilizzata dal programma REXEL. Fasiche

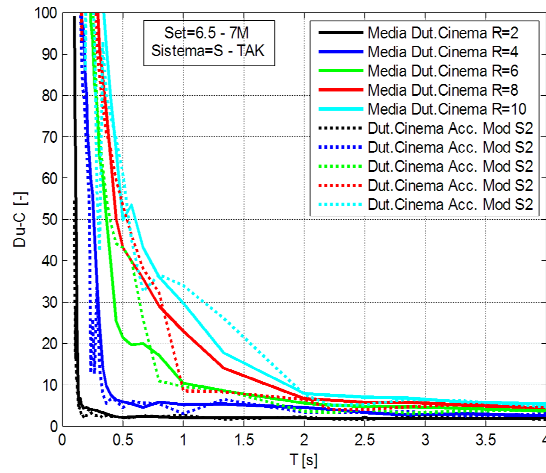
In Figura 5.5 si presenta il confronto tra la media della risposta in duttilità per il set di accelerogrammi scalati 6.5 – 7M, e per il set di modificati. Si può vedere come tutte le medie seguono un andamento molto simile tra di loro, anche se quelli scalati presentano un andamento un po' più irregolare, ma questo scarto è da aspettarsi visto che anche gli spettri di risposta elastici in accelerazione, rappresentati in figura N , anch'essi presentano degli scarti molto grandi rispetto allo spettro elastico di progetto. Si può vedere quindi che la modifica fa in modo tale che l'andamento sia molto più regolare grazie al fatto che si adegua meglio alla forma dello spettro di progetto.

Nella Figura 5.6 invece, vengono rappresentati gli spettri in duttilità cinematica per l'accelerogramma Campano Lucano, sia quello modificato sia quello scalato. In questo grafico si evidenzia una forte differenza tra i risultati ottenuti con i due accelerogrammi, dove la risposta del sistema per quello scalato è decisamente più alta rispetto a quella de-

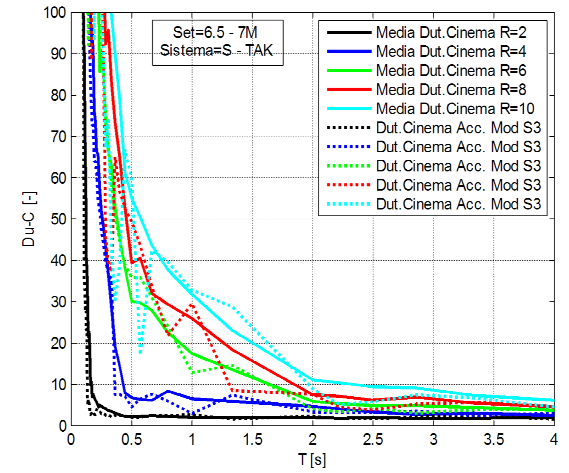
finita dall'accelerogramma modificato. Questo si presenta perché il primo, essendo scalato linearmente tramite un fattore di scala, vede variare la sua intensità in maniera molto accentuata, senza tener conto del contributo in frequenze che esso possa avere. Siccome questo accelerogramma presenta un contributo in frequenze molto alto, visto che, come si è detto prima, la sua durata è molto lunga con tanti picchi di accelerazione al suo interno, il fatto di modificare soltanto la sua intensità in accelerazione



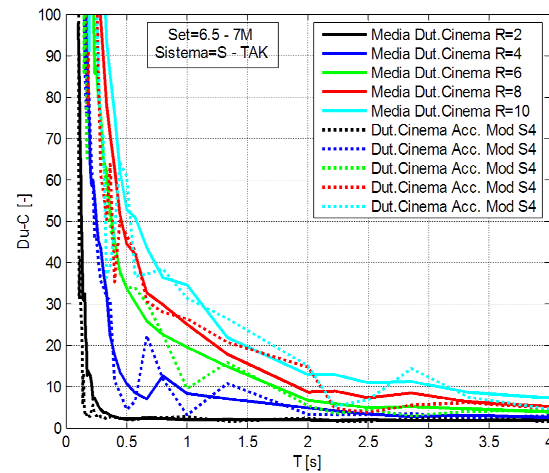
S 1



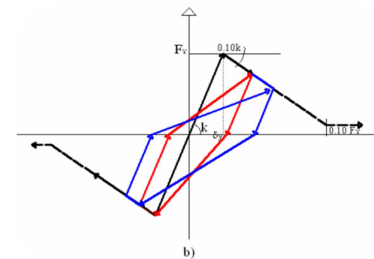
S 2



S 3

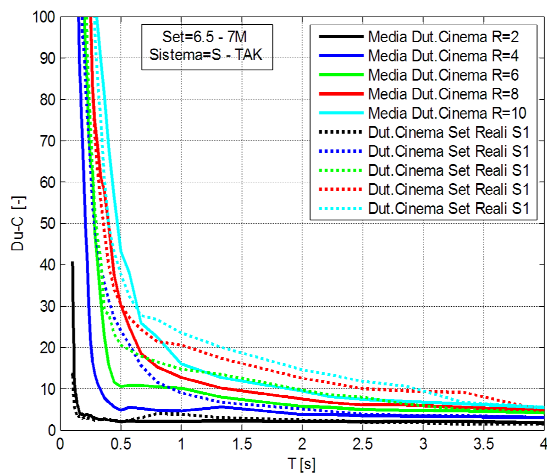


S 4

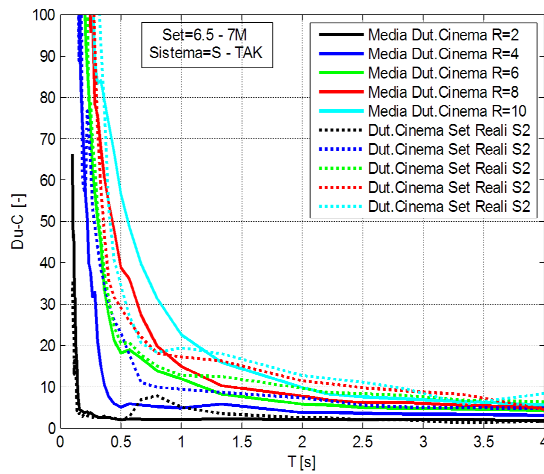


Legame costitutivo Takeda

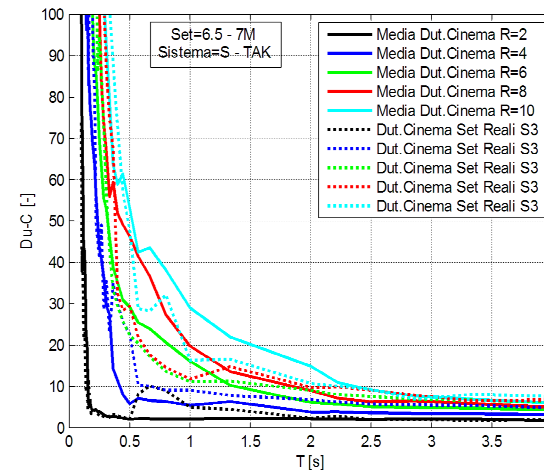
Figura 5.4 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificati e media dei generati)



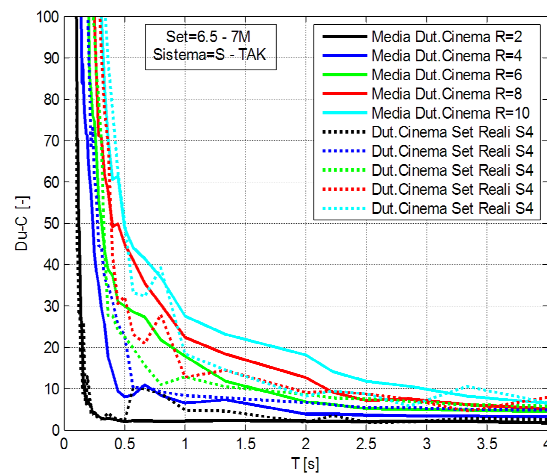
S 1



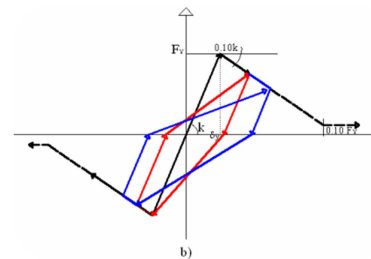
S 2



S 3



S 4



Legame costitutivo Takeda

Figura 5.5 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (medie modificati e naturali)

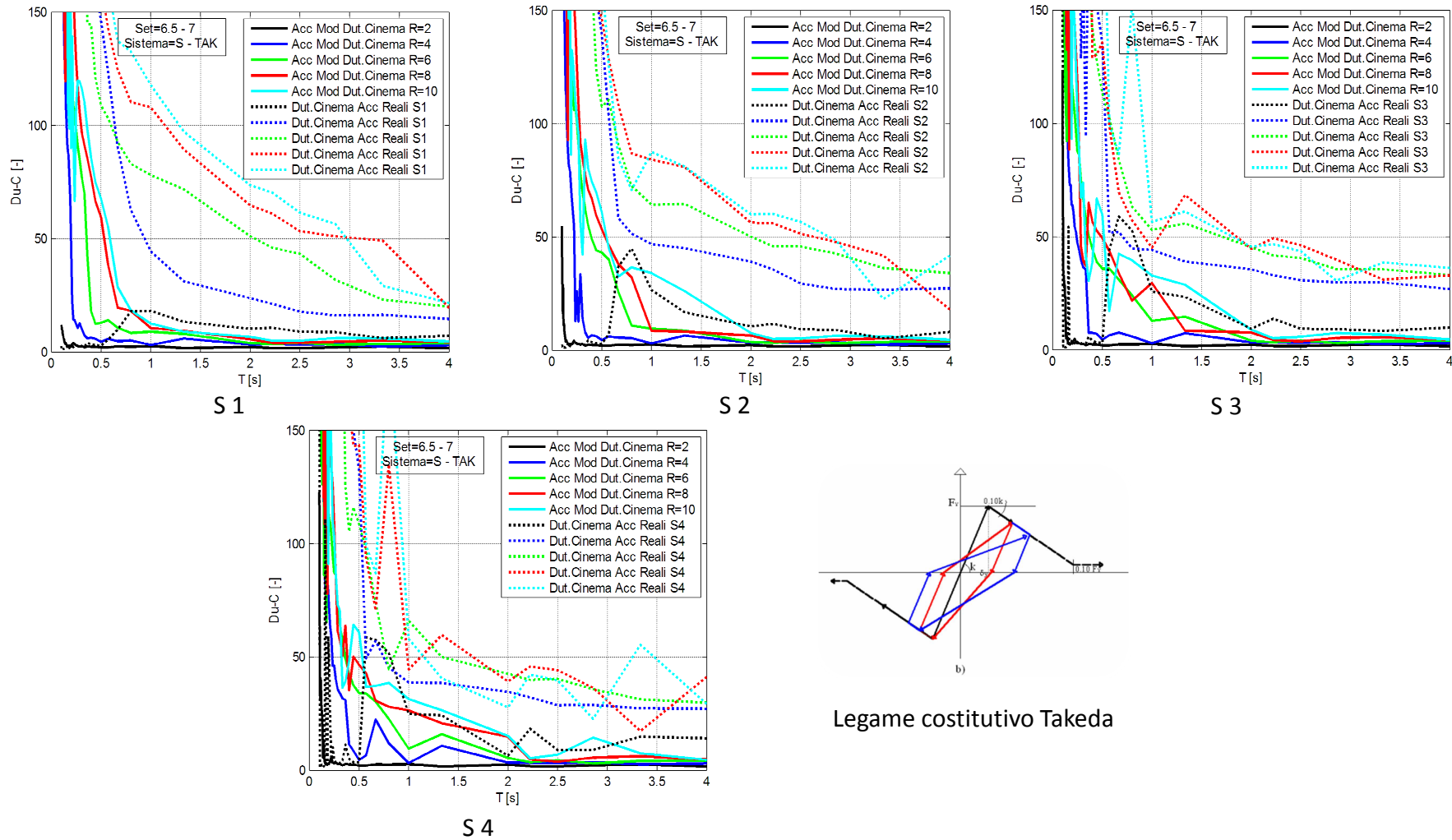


Figura 5.6 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificato e naturale)

moltiplicandola per un valore costante, non tiene conto del fatto che, per avere un incremento in intensità definito in quel modo, questo comporterebbe anche una variazione del suo contenuto in frequenza, e quindi una variazione anche nella sua forma spettrale. In questo modo sono state trascurate le caratteristiche in frequenza e quindi, anche se in media il set di accelerogrammi scalati, per quanto riguarda la risposta in duttilità cinematica, si adatta bene all'andamento del set di accelerogrammi modificati, prendere la risposta generata da una singola realizzazione dell'evento sismico, scalata in questo modo, non sarà molto rappresentativa della sua vera risposta sotto una qualsiasi realizzazione che si presenti nel sito in analisi. Queste differenze si vedranno meglio quando si faccia il confronto con la risposta ottenuta dall'accelerogramma non scalato.

In Figura 5.7 si rappresentano gli spettri in duttilità cinematica per il set di accelerogrammi naturali non scalati e il set di accelerogrammi modificati. Si vede come l'andamento dei due set è molto simile per tutti i sistemi e anche al variare del fattore di duttilità  $R$ . Per le duttilità più basse si può vedere come gli spettri naturali presentino dei valori leggermente più alti rispetto a quelli modificati, mentre per le duttilità più alte si presenta il caso contrario. Comunque si può dire che le modifiche apportate al set non rappresentano una variazione molto alta della risposta in duttilità che si avrebbe con il set di naturali per accelerogrammi di questo tipo.

Nella figura 21 si mette a confronto l'accelerogramma naturale con quello modificato, e a differenza da quanto ottenuto per l'accelerogramma scalato, per quello naturale, lo scarto presente tra le due risposte in duttilità è decisamente più basso, e i suoi andamenti sono abbastanza simili. Si presenta anche qui la particolarità che per valori bassi della duttilità, l'accelerogramma naturale ha dei valori di risposta in duttilità leggermente più alti, mentre per valori altri della duttilità accade l'opposto, ma comunque gli andamenti sono abbastanza vicini l'uno dall'altro.



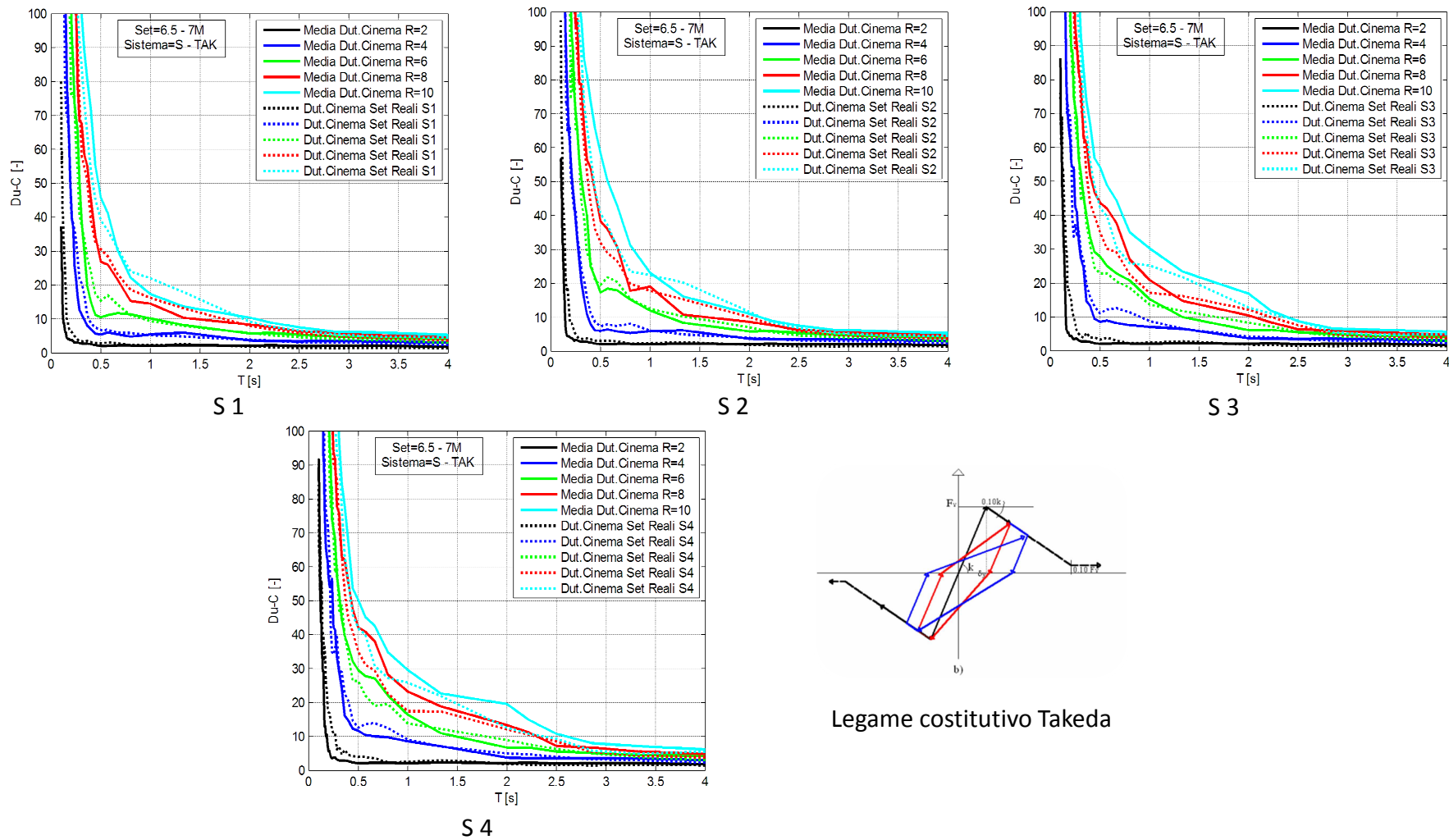
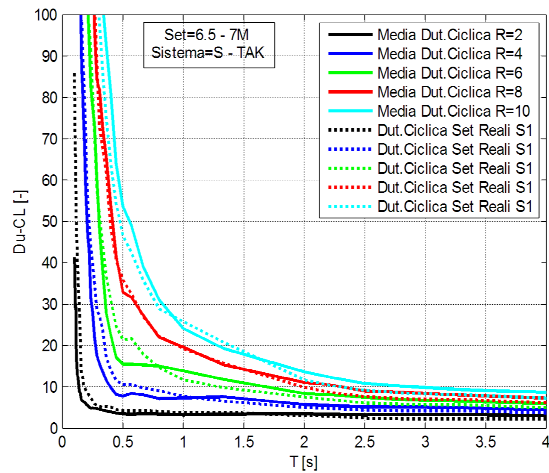
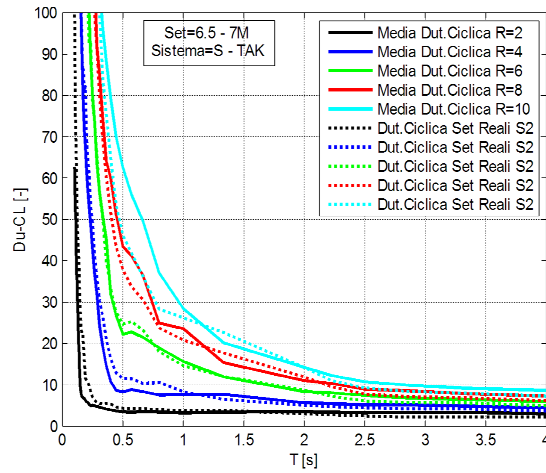


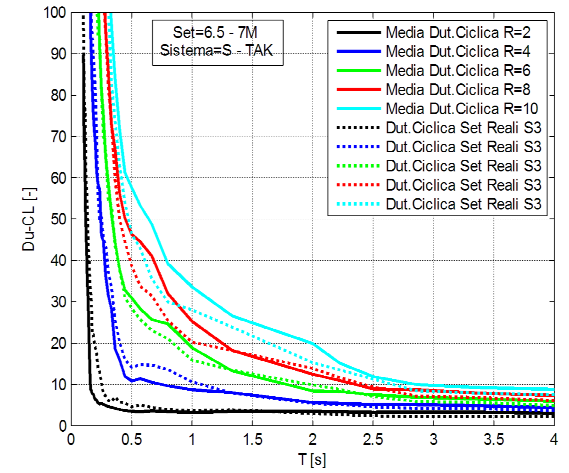
Figura 5.7 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano N (medie modificati e naturali)



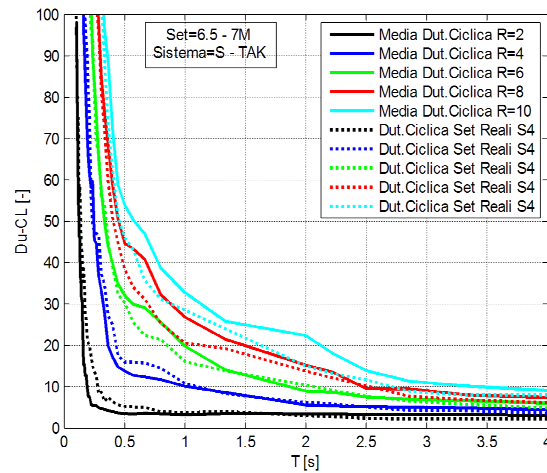
S 1



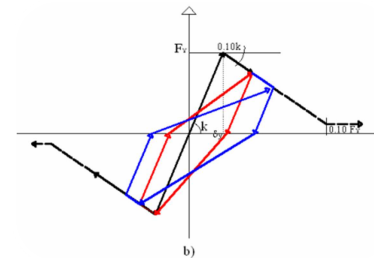
S 2



S 3



S 4



Legame costitutivo Takeda

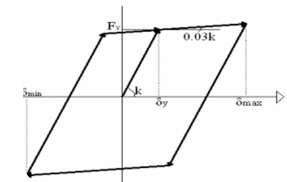
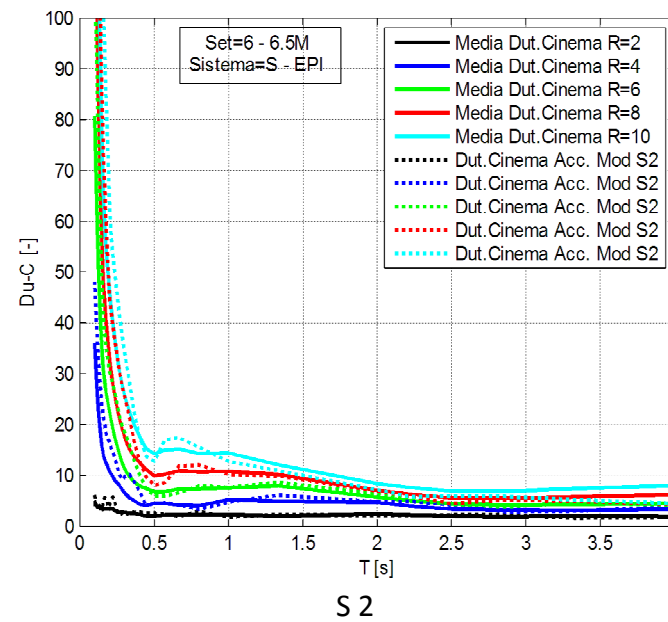
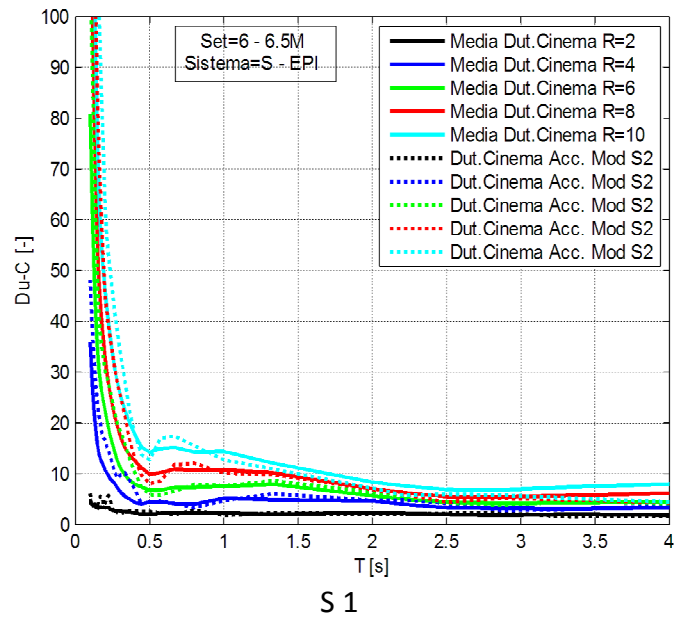
Figura 5.8 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)

### 5.1.2 Legame costitutivo Elasto – Plastico Incrudente

Prendendo l'accelerogramma Friuli (AS), si presenta in Figura 5.9 la risposta in duttilità cinematica per i due sistemi S1 ed S2 che sono stati presi in considerazione, in base ad una variazione della percentuale di incrudimento. Si utilizzano sempre i cinque fattori di duttilità R definiti precedentemente. In questo caso si presentano dei risultati più bassi rispetto a quelli ottenuti per il legame costitutivo Takeda. È evidente che sia così, visto che l'incrudimento in questo caso è positivo e quindi, una volta che il sistema entra in rango plastico, esso resiste a delle forze più alte rispetto a quelle presenti nel legame Takeda, plasticizzandosi sempre, ma mantenendo una resistenza più alta durante il ramo plastico. Questo risultato è molto evidenziato per il fattore di duttilità  $R = 2$ . Comunque i risultati ottenuti sono molto simili a quelli ottenuti precedentemente, per quanto riguarda l'andamento degli spettri: si presentano dei punti di cambio nei quali gli spettri dell'accelerogramma modificato sono più alti rispetto a quelli della media del set di 10 generati, ma con scarti molto bassi l'uno dall'altro.

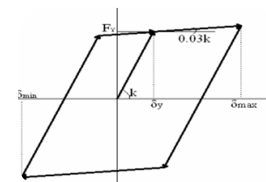
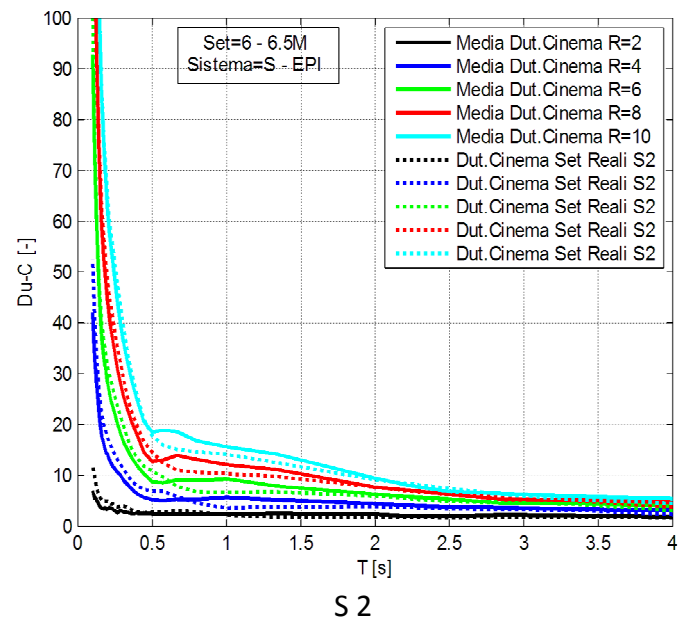
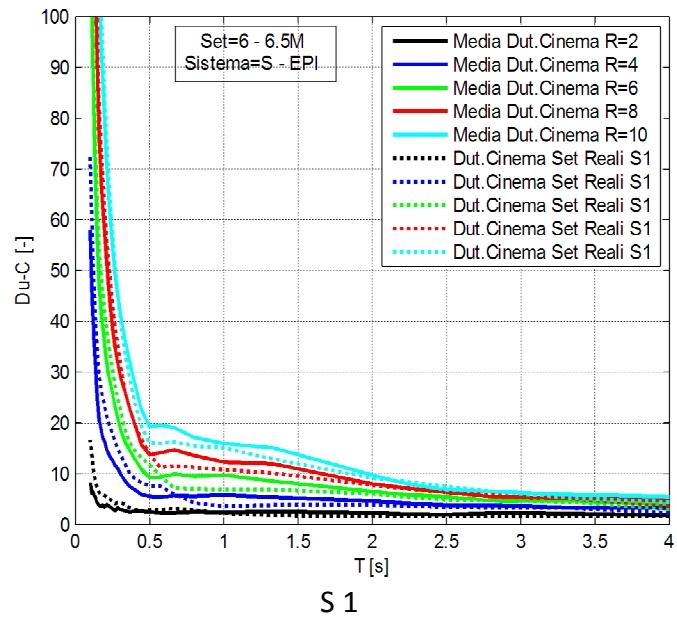
In 5.10 si presentano gli spettri in duttilità mettendo a confronto il set di modificati rispetto a quello dei naturali, e si vede come per fattori di duttilità alti, gli spettri di duttilità dei modificati sono leggermente più alti rispetto a quelli naturali. Stesso risultato era stato ottenuto con il legame Takeda.

In 5.11 sono rappresentati i valori di duttilità cinematica per l'accelerogramma Friuli (AS) naturale e per quello modificato, ottenendosi i risultati visti anche nei paragrafi precedenti per il legame Takeda. Si vede come lo scarto tra i due set di spettri si accentua di più nel range di periodi tra 0.5 e 2s, range nel quale ricadono di solito le strutture d'interesse nell'ingegneria civile. Quindi, il metodo di correzione, anche in questo caso, produce delle modifiche che si possono ritenere accettabili all'ora di valutare la risposta in duttilità del sistema.



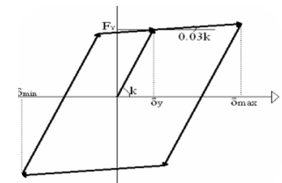
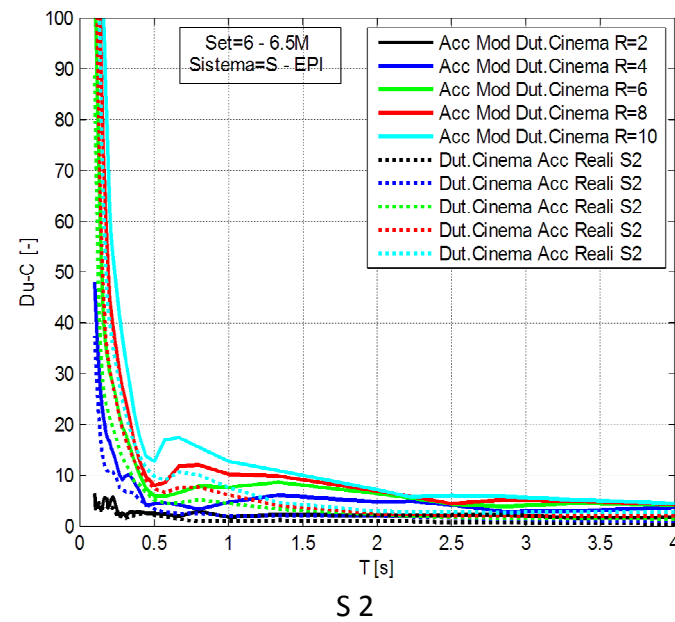
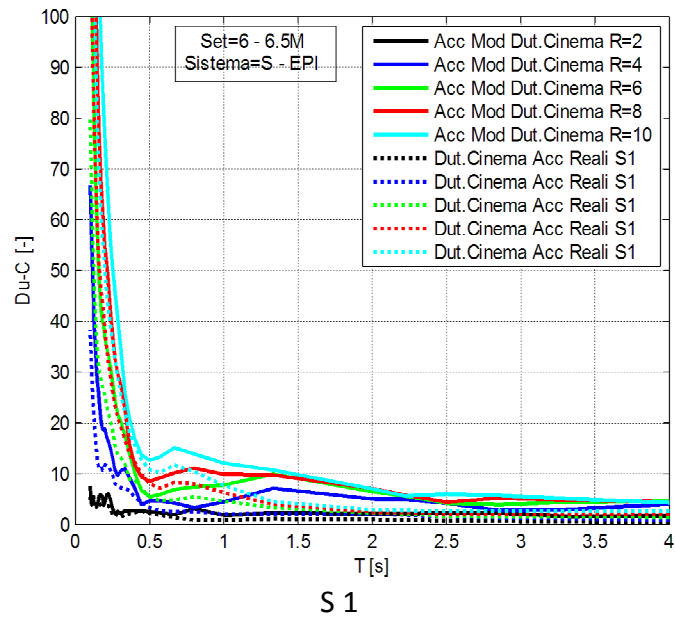
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.10 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)



Legame costitutivo EP INC

Figura 5.11 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (media modificati e naturali)



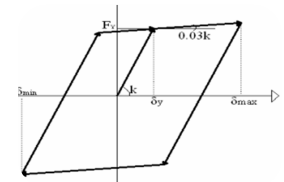
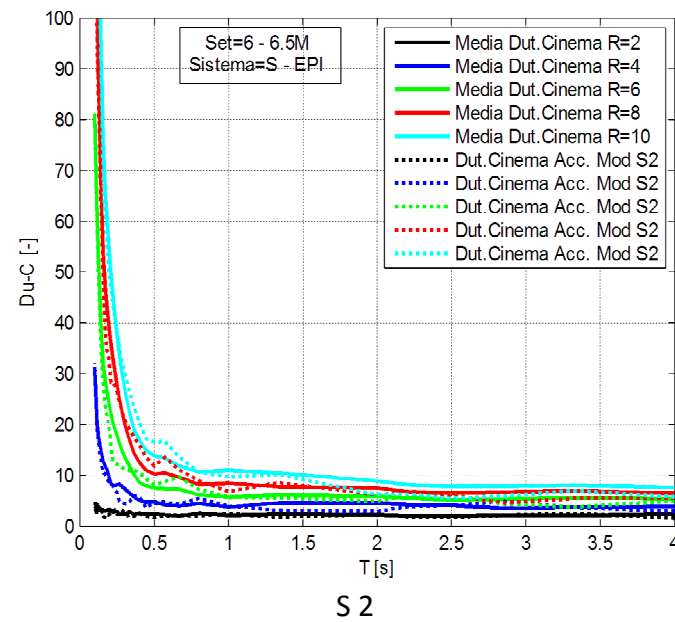
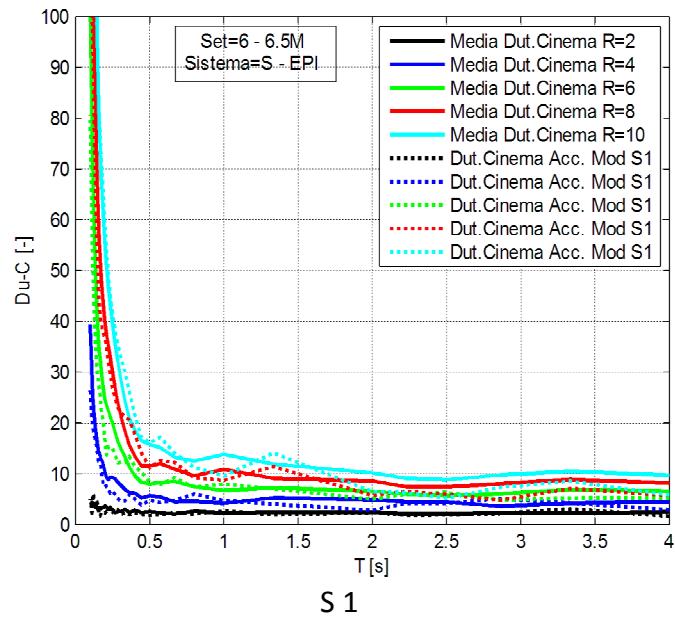
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.12 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)

Nella Figura 5.13 si rappresentano i risultati ottenuti per gli spettri in duttilità cinematica, in questo caso per l'accelerogramma Campano Lucano appartenente al set di Scalati. Anche qui si presentano dei risultati leggermente minori di quanto si ottiene per l'accelerogramma Friuli (AS). Le modifiche ancora una volta non comportano una variazione molto spiccata della risposta del sistema all'azione dell'accelerogramma modificato, rispetto al set di 10 accelerogrammi generati. Gli andamenti però, andandoli a confrontare con quei risultati ottenuti con il legame costitutivo definito da Takeda, presentano valori decisamente più piccoli. Si può inferire che questi risultati abbiano questo andamento, grazie al fatto che l'incrudimento in questo sistema è positivo, il che comporta uno stato di resistenza maggiore per il legame EP INC, rispetto a quello di Takeda, a parità di spostamento.

Nella Figura 5.14, dove vengono rappresentati gli spettri in duttilità per i set di modificati e quelli scalati, si può osservare la stessa tipologia di risultati ottenuti con il legame precedente: si ha che per i sistemi con fattore di duttilità maggiori, il set di accelerogrammi scalati presenta valori più alti di duttilità rispetto a quelli con fattore di duttilità minore. Si può evidenziare anche che, mettendo in confronto i due sistemi S1 ed S2, per quest'ultimo, che ha una percentuale di incrudimento più alta (3% rispetto al 1% del sistema S1), ha dei valori di duttilità leggermente più bassi (come si spera che siano), però, in questo caso il distacco tra il set di scalati e il set di modificati, a parità di fattore di duttilità, è ancor più pronunciato.

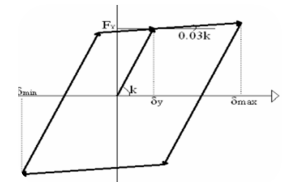
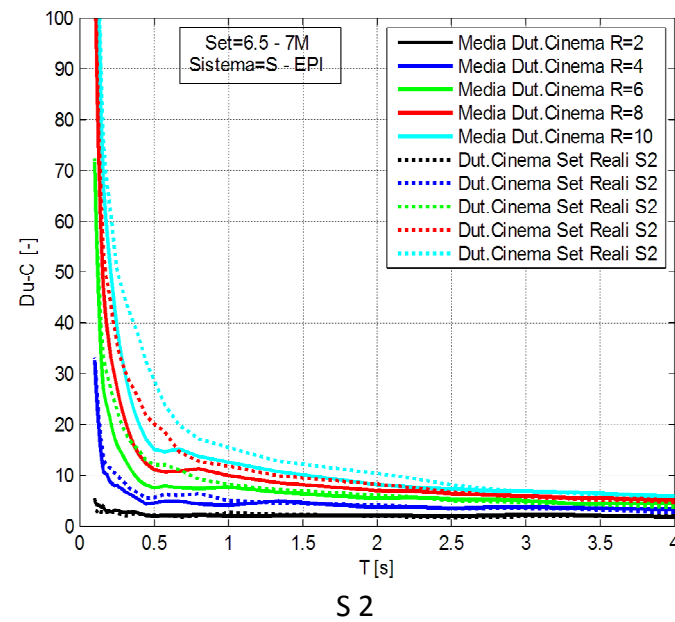
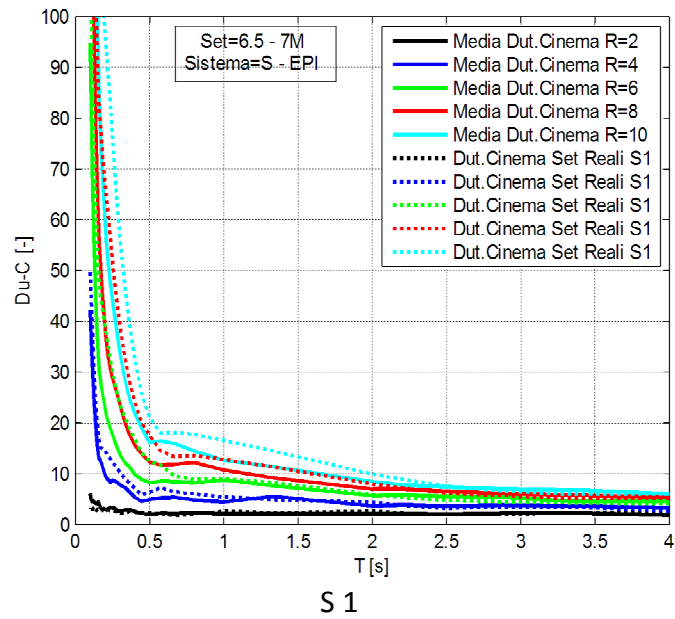
In Figura 5.15 si hanno i risultati di duttilità cinematica per l'accelerogramma Campano Lucano scalato e modificato. Questi risultati riflettono la stessa problematica descritta precedentemente nei risultati mostrati per il legame costitutivo di Takeda. Si hanno dei valori in duttilità cinematica molto alti rispetto a quelli modificati e quindi perde senso in confronto per vedere quale potrebbe essere la risposta reale della struttura. Si evidenzia che questa differenza si deve anche al fatto che lo spettro di questo accelerogramma (scalato), presenta uno scarto molto grande nel range di periodi tra 0,5 e 2s. e quindi si può vedere anche come in questo range si genera lo scarto maggiore nei grafici di duttilità cinematica.



Legame costitutivo EP INC

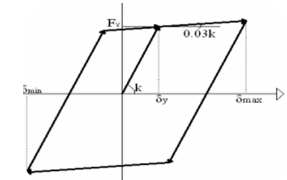
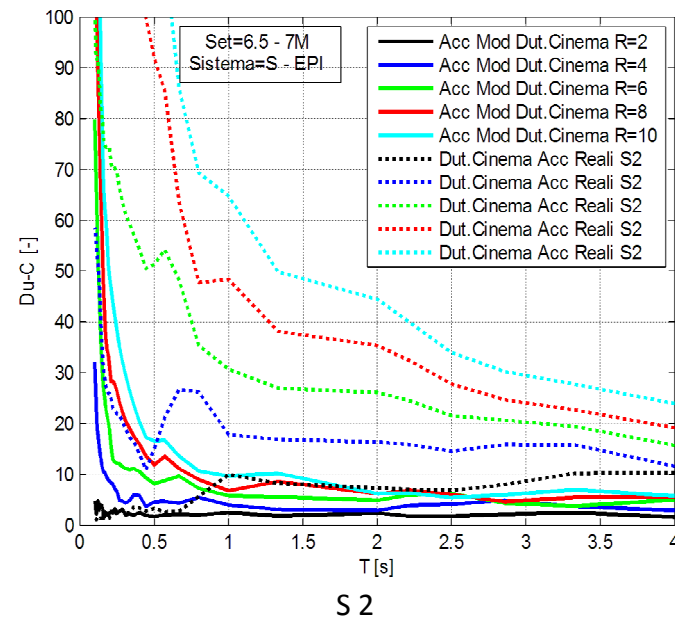
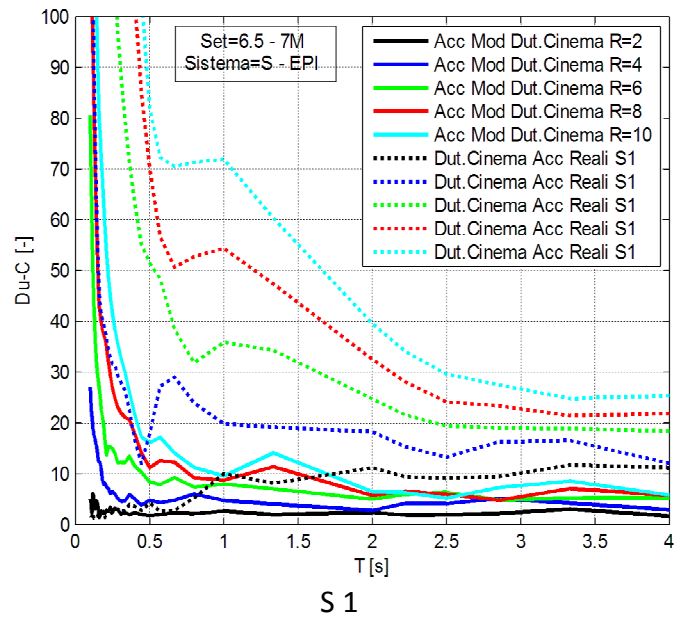
Figura 5.13 Spettri in dutt. cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificati e media dei generati)





Legame costitutivo EP INC

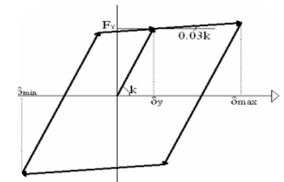
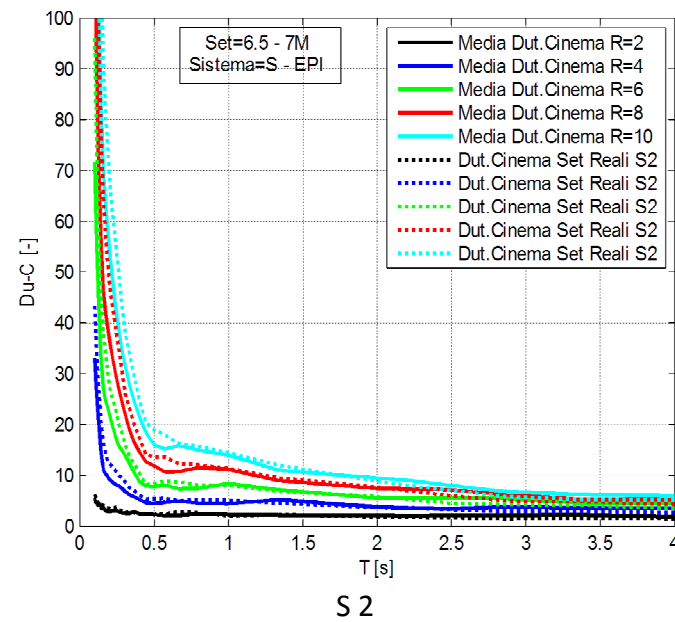
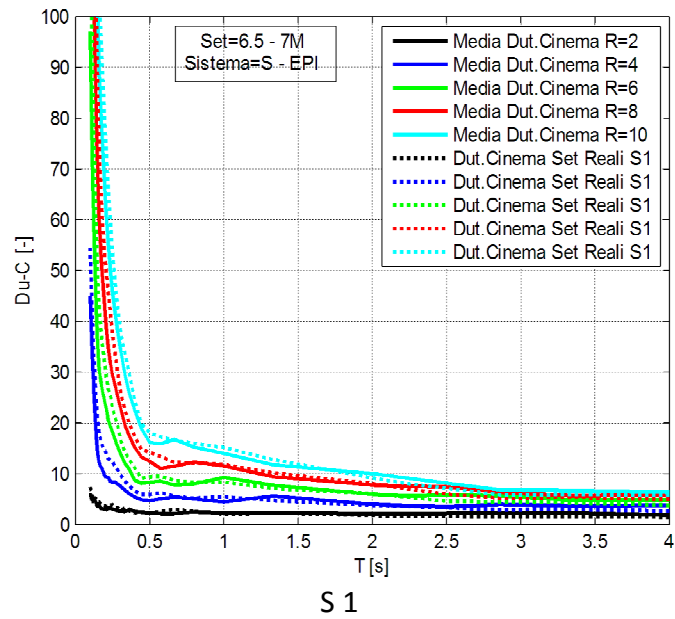
Figura 5.14 Spettri in dutt. cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalati (media modificati e naturali)



Legame costitutivo EP INC

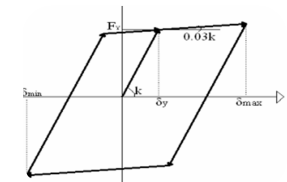
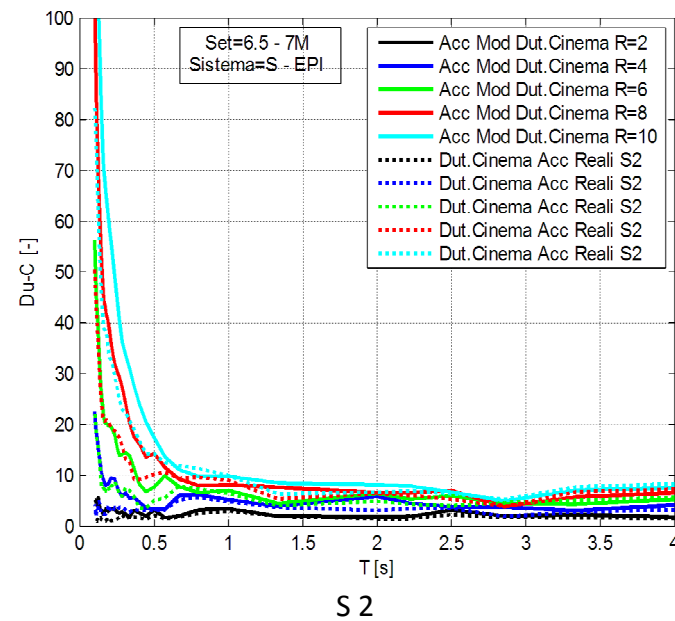
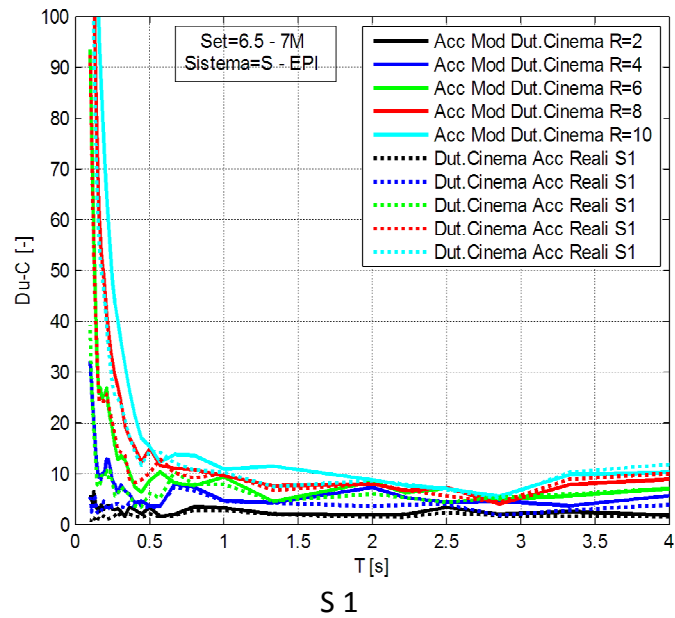
Figura 5.15 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificato e naturale)

Per quanto riguarda i risultati dell'accelerogramma Campano Lucano appartenente al set di non scalati, in Figura 5.16 si presentano gli spettri in duttilità cinematica per i set di modificati e quello degli accelerogrammi naturali (Set 6,5 – 7M). Si osserva che lo scostamento dei due set di spettri, per tutti e due i sistemi, è molto basso, avendo gli spettri praticamente gli stessi andamenti. Dobbiamo ricordare che i risultati sono basati nella media del set, e quindi si inferisce che questa sarebbe la reale risposta della struttura sotto l'azione sismica definita da questo accelerogramma. Si può osservare anche che questi valori sono particolarmente più piccoli rispetto a quelli ottenuti con il legame Takeda. Questo, come abbiamo detto prima, accade per il fatto che l'incrudimento abbia pendenza positiva. In Figura 5.17 si vede il confronto tra l'accelerogramma Campano Lucano naturale e quello modificato, e si vede come gli andamenti sono molto simili e si presentano degli scarti tra le risposte dei due accelerogrammi molto piccoli. Anche per questo accelerogramma quindi. Le modifiche apportate dal metodo sono molto piccole sia per la singola realizzazione, sia per la media dei set.



Legame costitutivo EP INC

Figura5.16 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano N (modificati e media dei generati)



Legame costitutivo EP INC

Figura 5.17 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)

### 5.1.3 Legame costitutivo Elasto – Perfettamente Plastico

Per quanto riguarda l'ultimo legame costitutivo, cioè quello elasto - plastico perfetto, si presentano dei risultati in Figura 5.17, per l'accelerogramma Friuli (AS) definito nei paragrafi precedenti. In particolare si vede il confronto tra quello modificato e il set di 10 accelerogrammi generati.

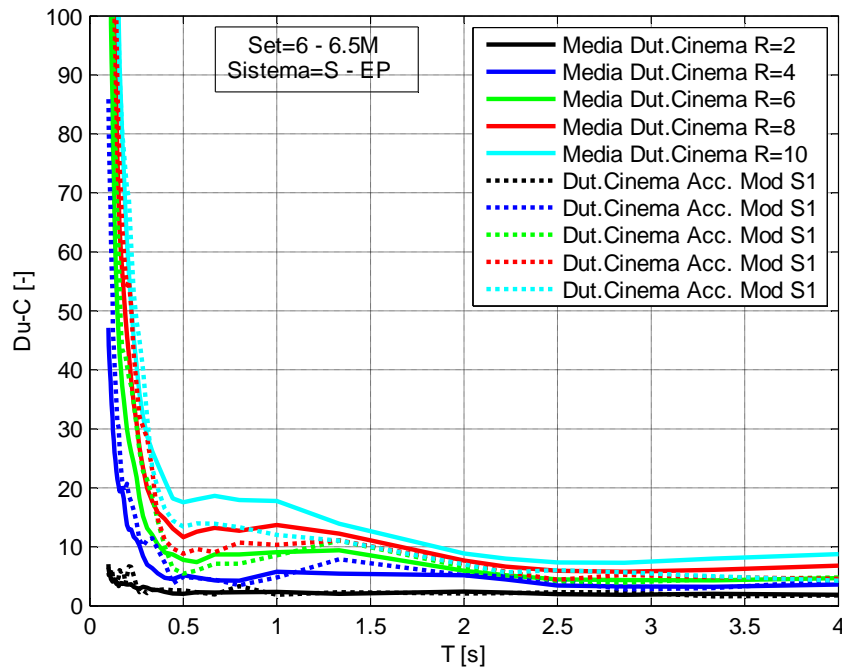


Figura 5.17 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)

Questi risultati, com'è evidente, sono molto simili a quelli ottenuti per il legame costitutivo EP INC, anche se non presenta incrudimento, però siccome la percentuale d'incrudimento nel legame precedente è molto sottile, le differenze che si riscontrano sono molto basse anche queste. Nella figura si vede che ci sono degli scarti concentrati praticamente all'interno del range di valori del periodo tra 0,3 e 2s. e dove la singola realizzazione modificata presenta dei valori leggermente più grandi di duttilità rispetto alla media del set.

In Figura 5.18 si presentano gli spettri per i set di accelerogrammi sia quelli reali, sia quelli modificati. Si può osservare che gli andamenti delle medie dei due set sono molto vicine tra di loro, con un piccolo scarto in eccesso per quelli modificati nei sistemi con fat-

tore di duttilità maggiori, degli scarti in difetto per quei sistemi con fattore di duttilità R più bassi.

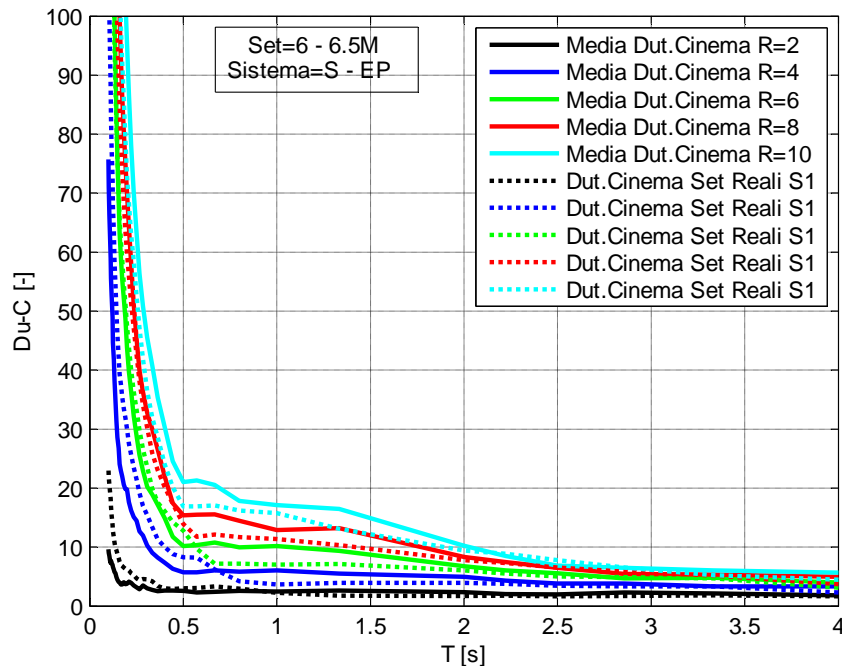


Figura 5.18 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (media modificati e naturali)

Nella Figura 5.19 si hanno dei risultati in duttilità cinematica per l'accelerogramma Friuli (AS) modificato e quello reale: si vede come quello modificato presenta, tra i valori di periodo 1 - 2s. lo scarto più grande tra le due risposte, per praticamente tutti i sistemi a fattore di duttilità variabile.

Ora si rappresentano in Figura 5.20 gli spettri di duttilità cinematica per l'accelerogramma Campano Lucano (set scalati). In questo caso, la media del set di 10 accelerogrammi (linea tratteggiata) segue molto bene l'andamento della risposta in duttilità per l'accelerogramma di base (modificato, linea continua), anche se quest'ultimo presenta una certa dispersione, ma questo giusto perché si sta facendo l'analisi del singolo accelerogramma.

In Figura 5.21 si presenta il confronto tra i set di modificati e naturali per il set 6,5 - 7M scalati. Si vede in questo caso come, per il set di scalati si ottiene una media dei valori della risposta in duttilità maggiore rispetto a quella per il set di modificati. Questa condi-

zione si presenta soprattutto per i sistemi con fattore di duttilità elevata, il che significa che gli spettri modificati hanno una intensità un po' più bassa rispetto a quelli scalati, ma è così piccola da non essere notevole per i sistemi più resistenti (sistemi a fattore di duttilità maggiore).

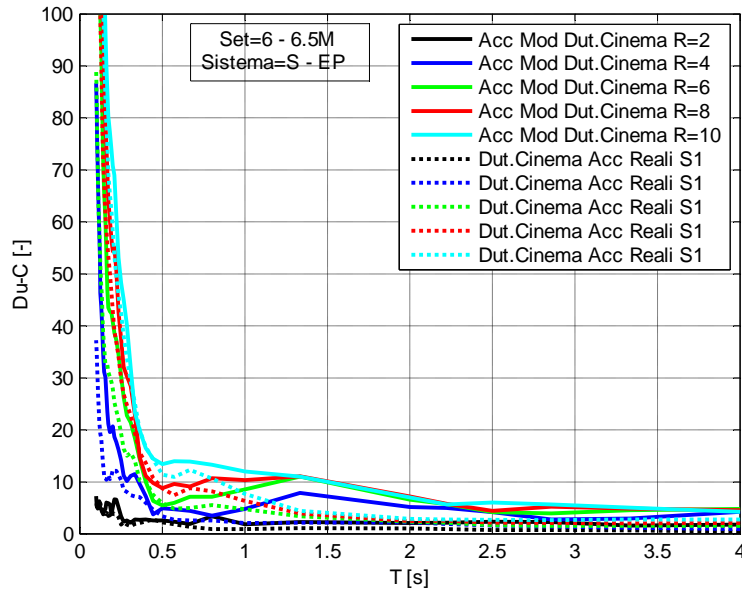


Figura 5.19 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)

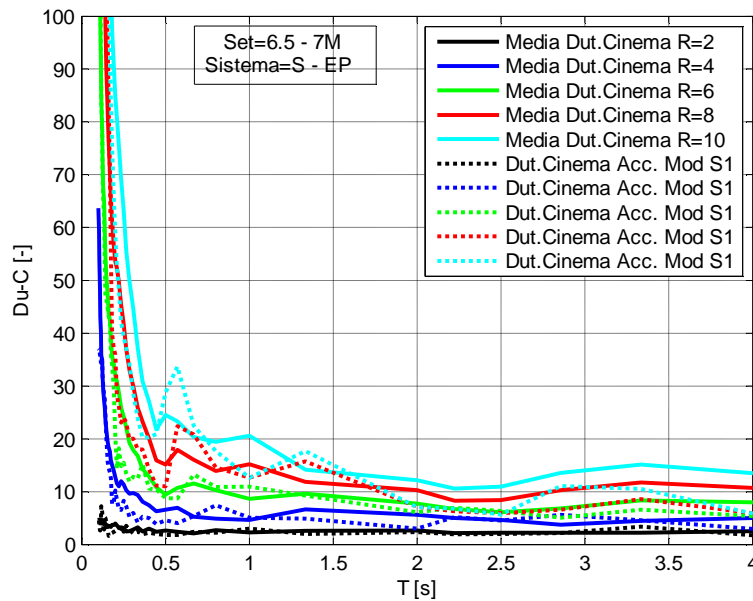


Figura 5.20 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificato e media generati)



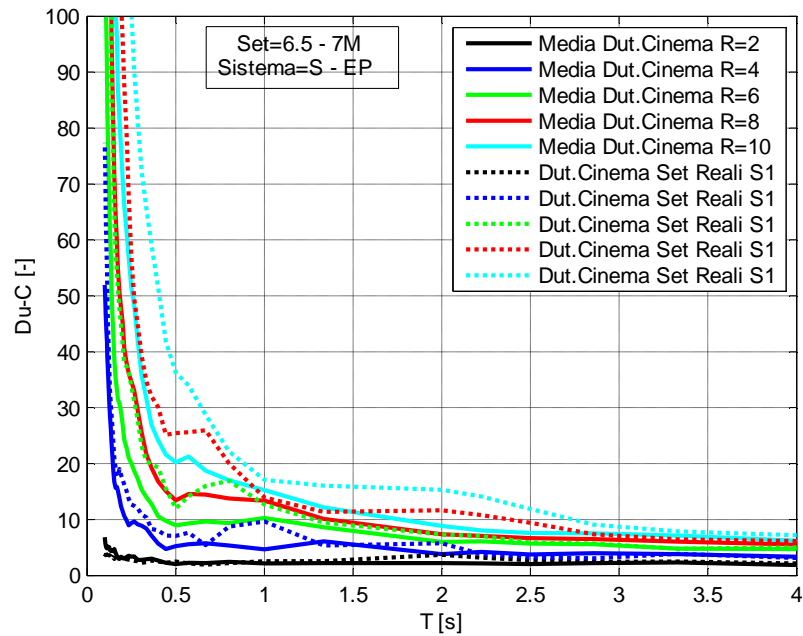


Figura 5.21 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (media scalati e modificati)

Si osservi in Figura 5.22 che anche in questo caso si presenta lo stesso andamento degli spettri per l'accelerogramma scalato rispetto a quello modificato. Le considerazioni sono le stesse dei legami precedenti.

Nella figura 23 si può osservare come, ancora una volta, la media per il set di accelerogrammi modificati vari di poco rispetto a quello per gli accelerogrammi reali. Si vede come la risposta dei naturali, mettendola a confronto con la risposta degli scalati rappresentati in Figura 5.21 sia minore, e quindi dimostra come in termini di duttilità cinematica, gli accelerogrammi modificati danno una risposta, in media, più vicina a quella che può essere la risposta ritenuta "reale" della struttura.

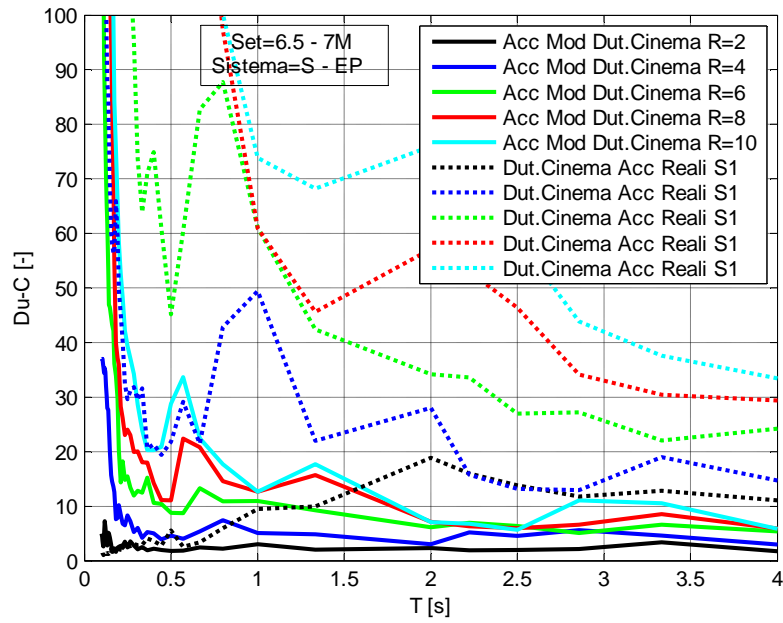


Figura5.22 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (scalato e modificato)

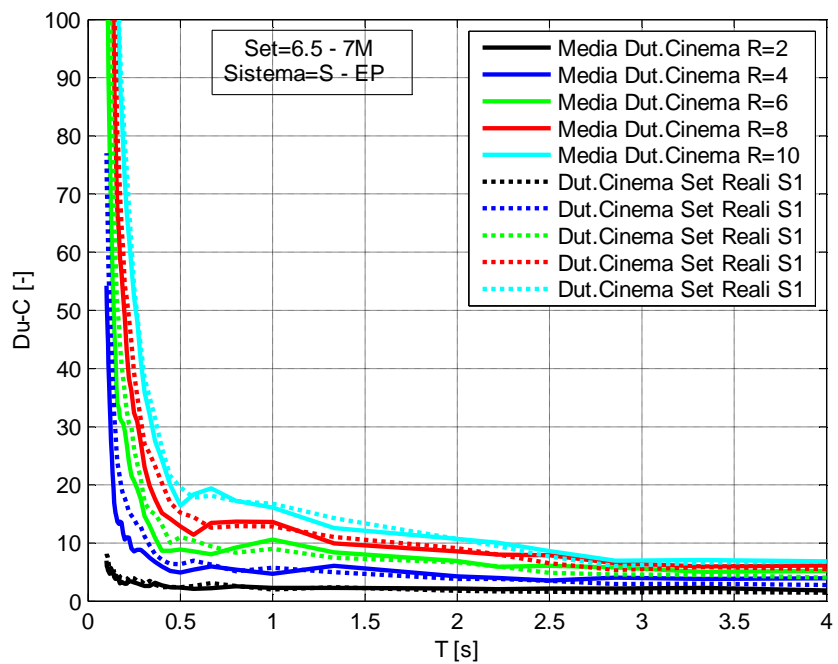


Figura 5.23 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (media modificati e generati)

In Figura 5.24 vengono rappresentati gli spettri di risposta per l'accelerogramma naturale e quello modificato. Si osserva una dispersione più grande dei valori per lo spettro in duttilità dell'accelerogramma naturale, con questo tipo di legame costitutivo.

Si è visto che per il range di periodi dove si genera lo scarto dell'accelerogramma modificato rispetto a quello scalato, si presenta anche una dispersione molto grande dello spettro dell'accelerogramma reale rispetto all'andamento dello spettro di progetto. Questa differenza si presenta in eccesso ed è per questo la risposta della struttura sottoposta all'accelerogramma naturale è maggiore da quella ottenuto con l'accelerogramma modificato, visto che quest'ultimo tende a seguire meglio l'andamento dello spettro di progetto.

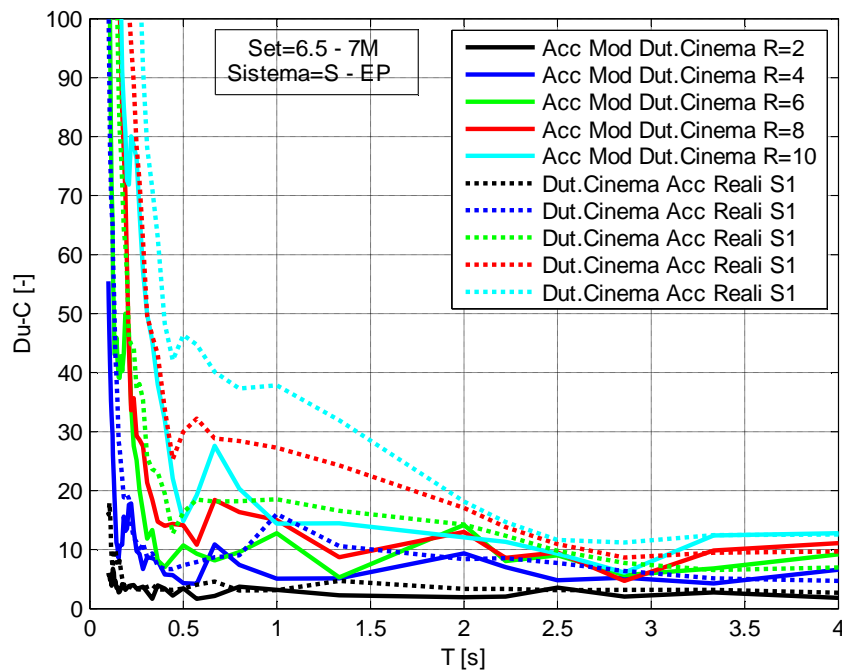


Figura 5.24 Spettri in duttilità cinematica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificato e media generati)

## 5.2 Spettri di duttilità ciclica

Nel punto precedente si è definita la duttilità cinematica come rapporto fra lo spostamento massimo (in qualsiasi direzione) raggiunto dalla struttura e lo spostamento di snervamento della stessa. Questo parametro però, non tiene conto del fatto che la risposta della struttura sotto carichi ciclici è anch'essa ciclica e quindi, non necessariamente riesce a caratterizzare correttamente il danneggiamento subito dalla struttura.

Un parametro che può aiutare a valutare questo effetto è la duttilità ciclica della struttura, che viene definita come la somma del massimo spostamento negativo (in valore assoluto) e di quello massimo positivo, in modo di calcolare approssimativamente la massima escursione subita dalla struttura sul ramo plastico, e quindi il fattore di duttilità viene definito dalla:

$$\mu_c = \frac{\delta_{min} + \delta_{max}}{\delta_y}$$

Sia questo fattore di duttilità, sia quello descritto per la duttilità cinematica, sono fattori che appartengono all'approccio di determinazione del danneggiamento della struttura in duttilità, cioè, sono basati sull'ipotesi fondamentale che il collasso della struttura avvenga nel momento in cui si è raggiunto lo spostamento massimo che la struttura può subire, senza tener conto del fatto che la struttura ha un potenziale di dissipazione di energia, proveniente dall'azione sismica, limitato.

### 5.2.1 Legame costitutivo Takeda

Si prendano quindi in considerazione gli stessi accelerogrammi utilizzati in precedenza nell'analisi dei risultati della duttilità cinematica. Con questo in mente vengono quindi definiti in Figura 5.25 gli spettri di risposta in duttilità ciclica per l'accelerogramma Friuli (AS) del set di reali 6 – 6,5M, mettendo a confronto sia l'accelerogramma modifica, sia la media del set di 10 accelerogrammi generati stocasticamente. Si vede quindi come gli andamenti della media del set di 10 realizzazioni (linea tratteggiata) abbiano un'andamento all'incirca uguale a quello che si presenta per l'accelerogramma di base. Salvo nel range di valori tra 0.3 – 1s. tutti gli altri valori di risposta in duttilità ciclica sono abbastanza simili. Confrontando questi risultati con quelli ottenuti per la risposta in dutti-

lità cinematica, si può osservare che, anche se, come si spera che sia, i valori di duttilità ciclica sono maggiori rispetto a quelli in duttilità cinematica (figura 15), gli andamenti variano soprattutto per il range di valori tra 0,5 e 1s. che sarà quindi la zona dove questo accelerogramma condiziona di più la risposta in duttilità della struttura.

Nel caso degli spettri per i set di naturali e quelli modificati, si presentano in Figura 5.26 i risultati ottenuti, vedendosi come gli scarti tra i due set, per il range di valori di periodo suddetti, si accentuano di più rispetto ai risultati ottenuti per la duttilità ciclica. Si vede anche che gli accelerogrammi modificati sono molto più gravosi, per quanto riguarda la duttilità ciclica, da quanto possono essere quelli reali.

Nella Figura 5.27 si vede amplificato, ancora di più questo effetto, sempre negli stessi range di valori del periodo, e quindi si evidenzia come, ad esempio, per fattori di duttilità  $R = 10$ , la risposta in duttilità della struttura è quasi il doppio di quella che si ottiene per l'accelerogramma non modificato.

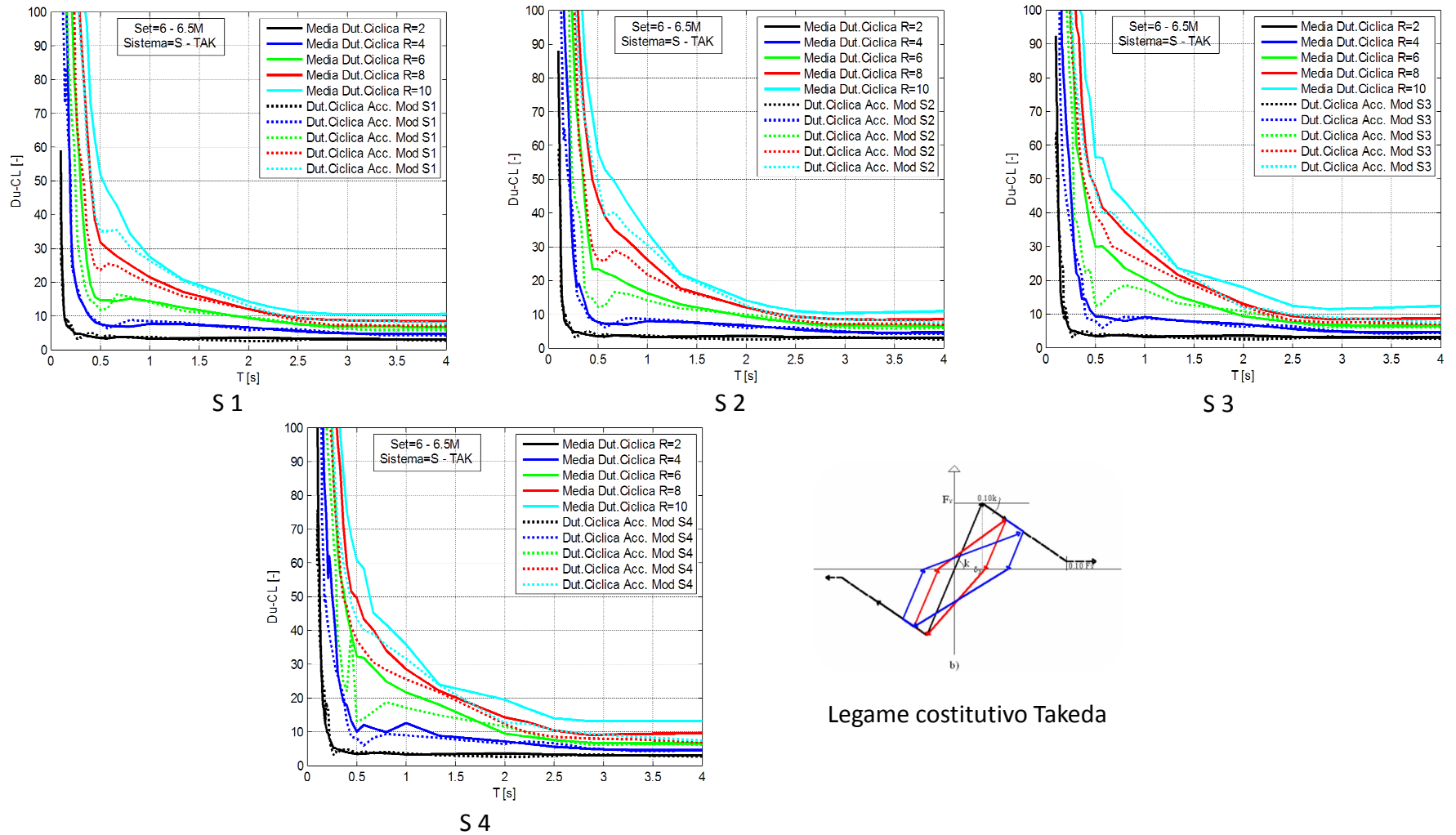
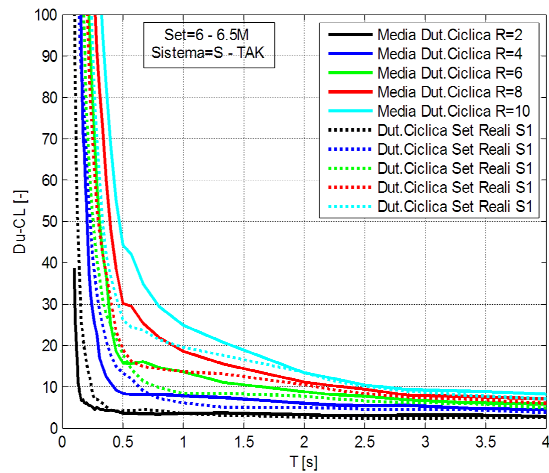
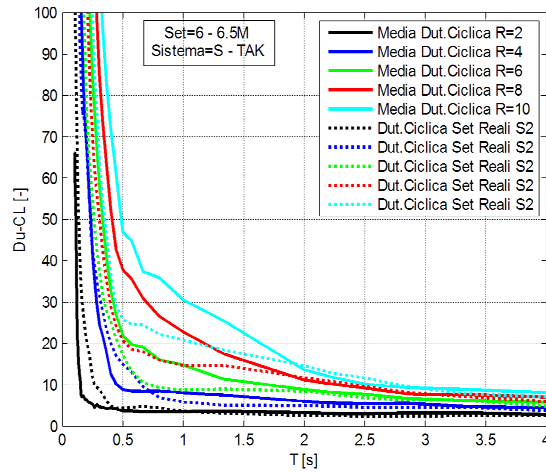


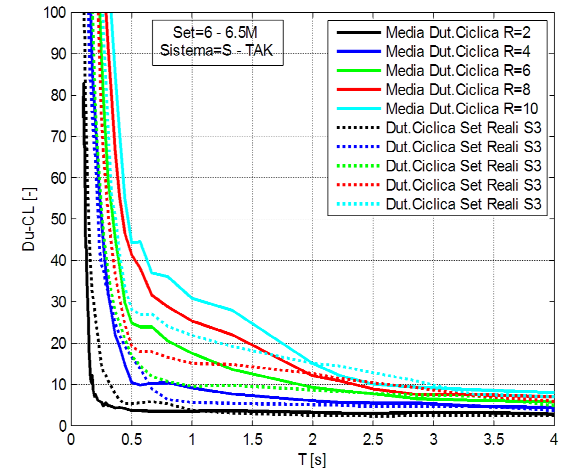
Figura 5.25 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)



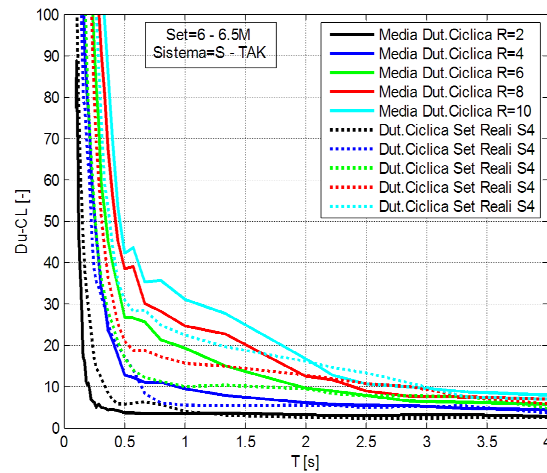
S 1



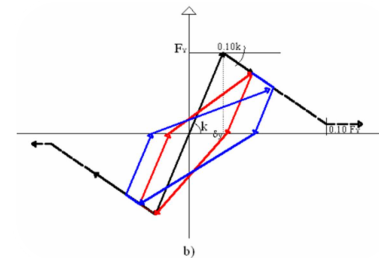
S 2



S 3



S 4



Legame costitutivo Takeda

Figura 5.26 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (medie modificati e naturali)

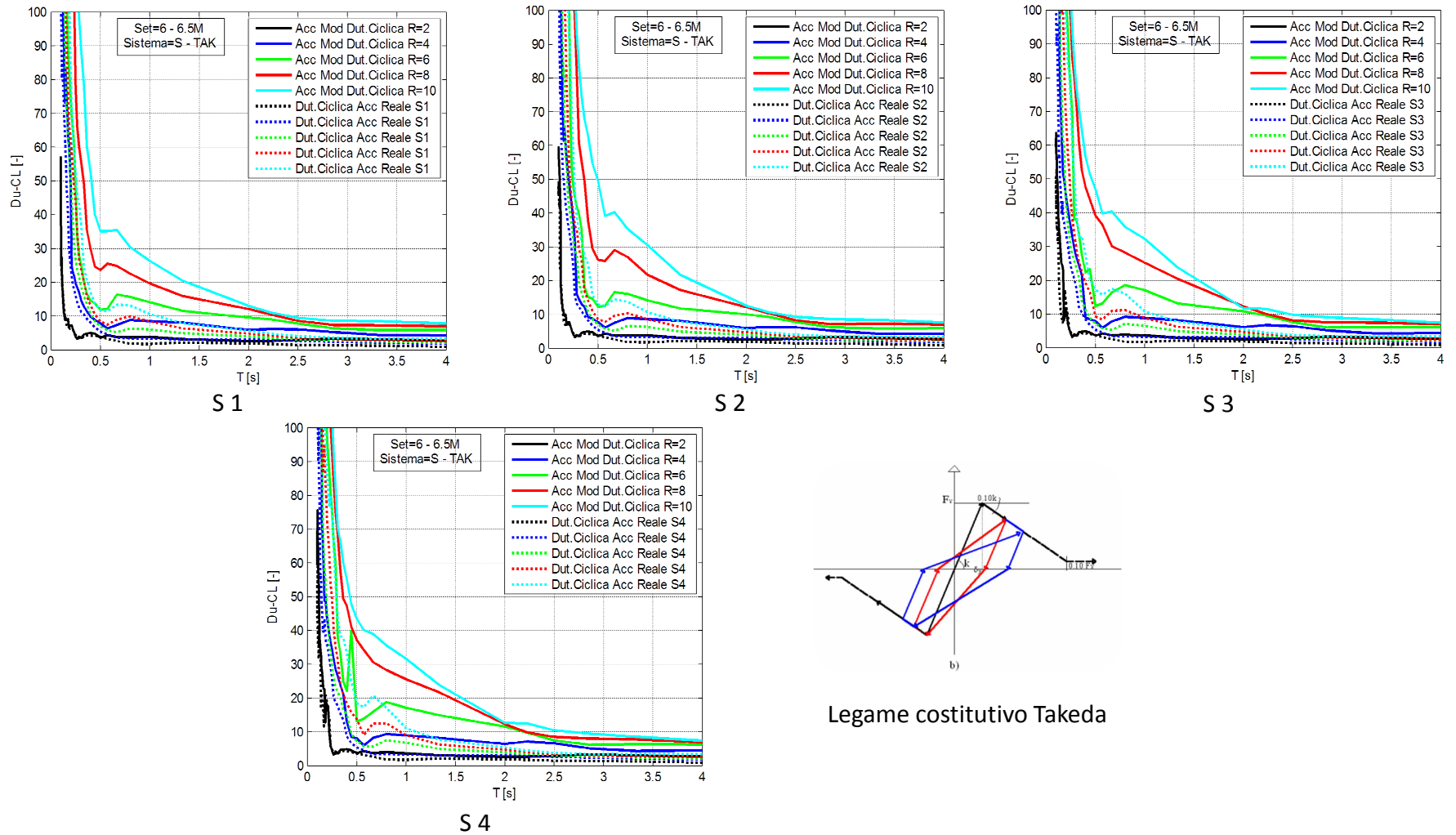
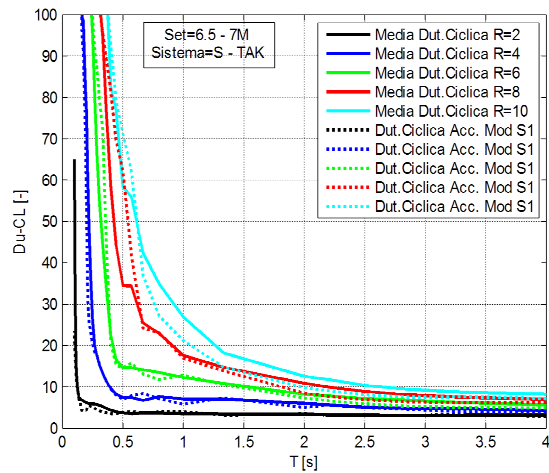


Figura 5.27 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)

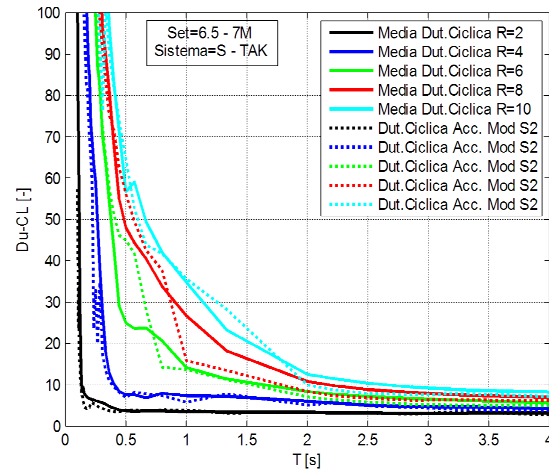


Per quanto riguarda l'accelerogramma Campano Lucano appartenente al set di scalati 6,5 – 7M, in Figura 5.28 si rappresentano gli spettri in duttilità cinematica per il set di 10 accelerogrammi generati e per l'accelerogramma di base modificato. I risultati non presentano troppe differenze in quanto gli andamenti dei due set sono molto simili se gli mettiamo a confronto con quelli a duttilità cinematica. I primi però, evidenziano dei valori più elevati, come giusto che sia se consideriamo che la risposta della struttura è ciclica.

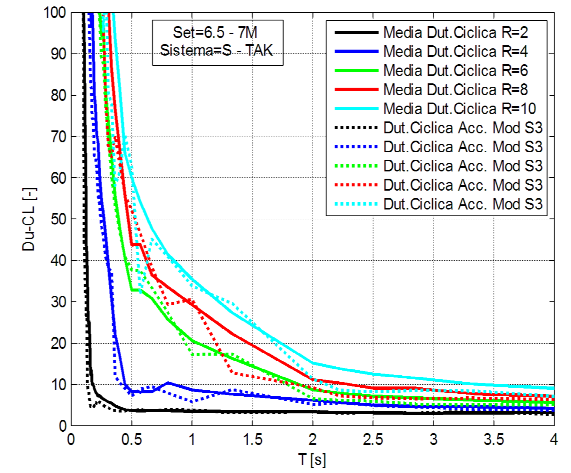
In Figura 5.29 si vede come, nel confronto tra il set di accelerogrammi naturali scalati e quelli modificati, non c'è troppa variazione dei risultati ottenuti con i due set così definiti. La differenza esiste quando si va a confrontare questi risultati con quelli in duttilità cinematica. Mentre per i secondi le modifiche comportavano una risposta in duttilità cinematica minore per il set di modificati rispetto agli scalati, nel caso della duttilità ciclica, sono gli accelerogrammi scalati quelli che comportano una risposta minore del sistema, indicando che le modifiche che vengono portate agli accelerogrammi fanno in modo tale che i sistemi presentino una risposta ciclica più importante rispetto a quella cinematica, e quindi la risposta della struttura è definita molto di più da un comportamento ciclico, rispetto al comportamento duttile.



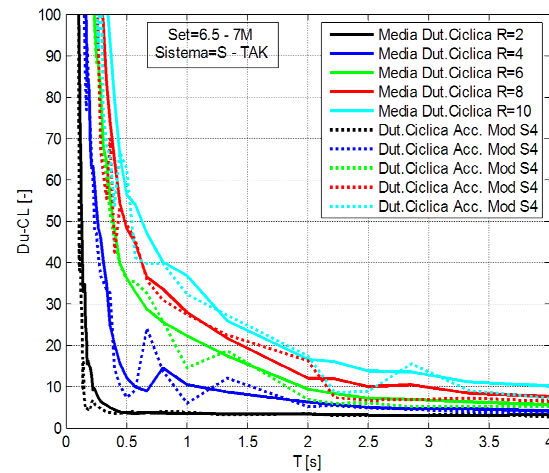
S 1



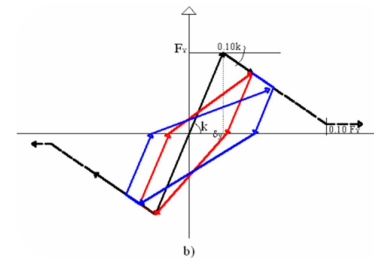
S 2



S 3

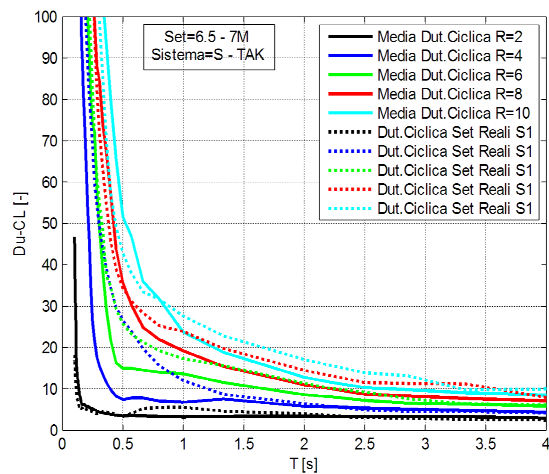


S 4

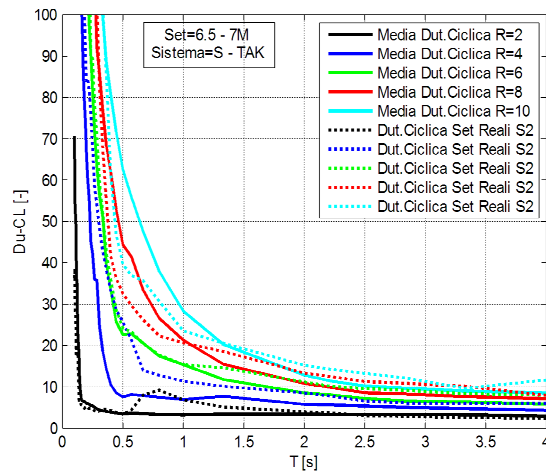


Legame costitutivo Takeda

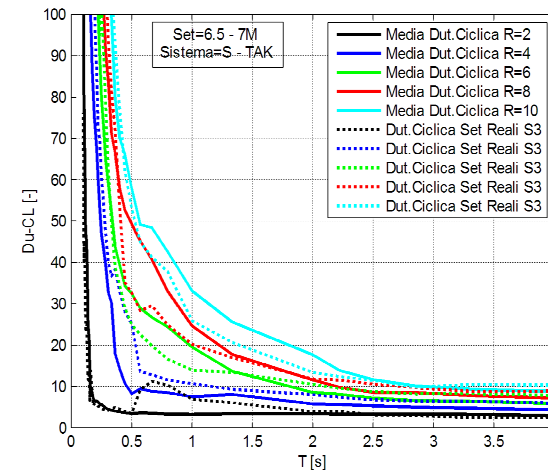
Figura 5.28 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificati e media dei generati)



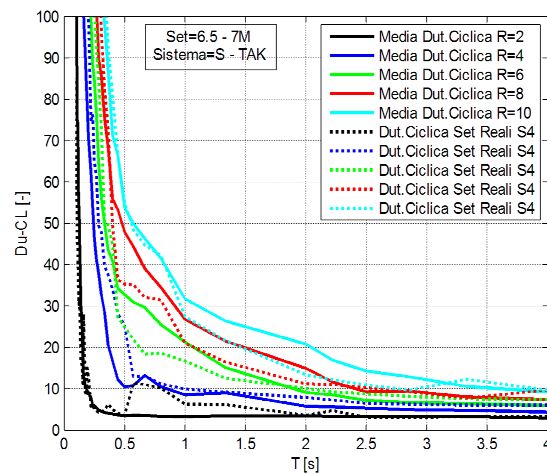
S 1



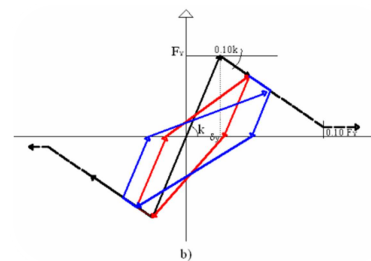
S 2



S 3



S 4



Legame costitutivo Takeda

Figura 5.29 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalato (medie modificati e naturali)

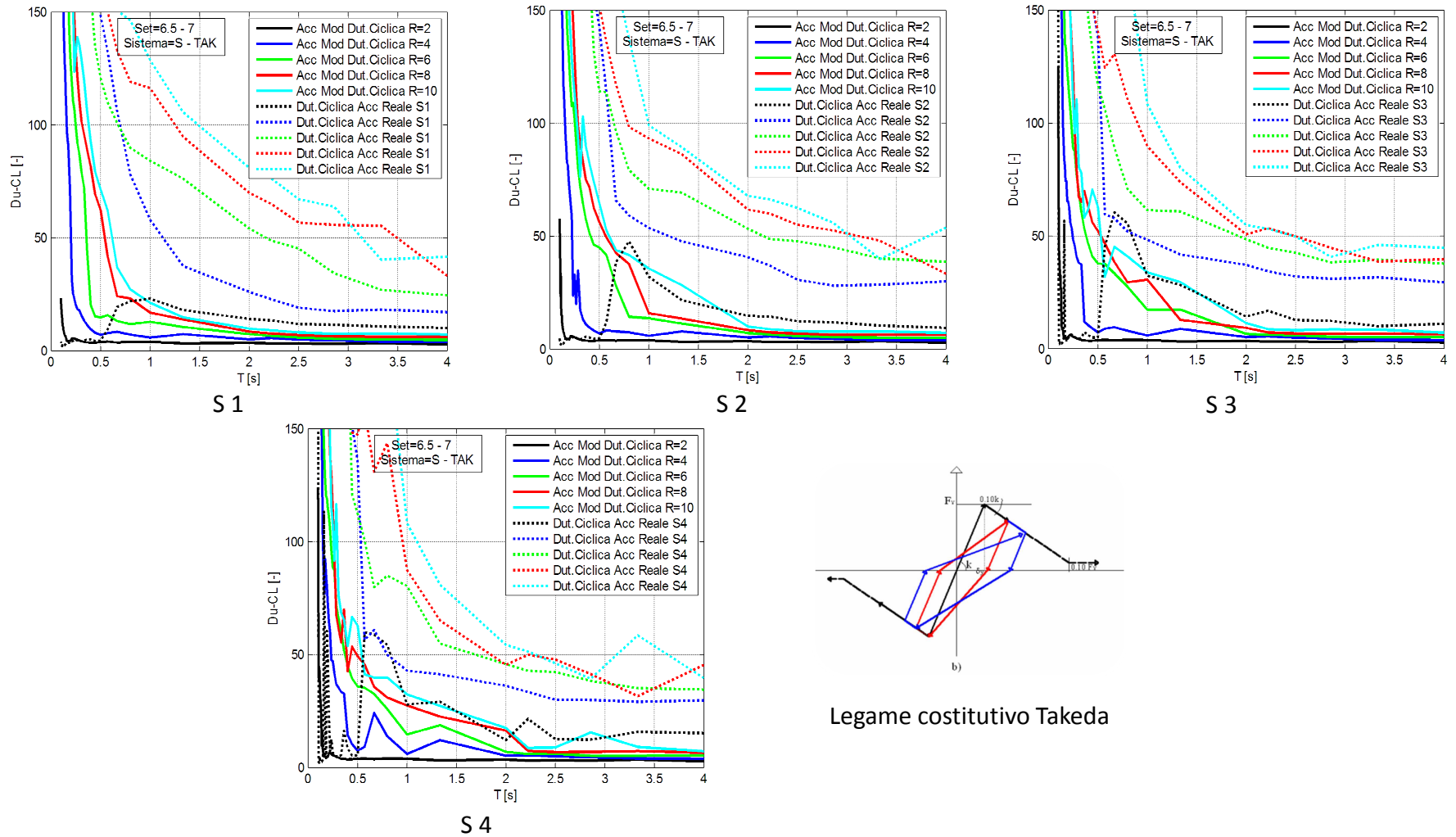
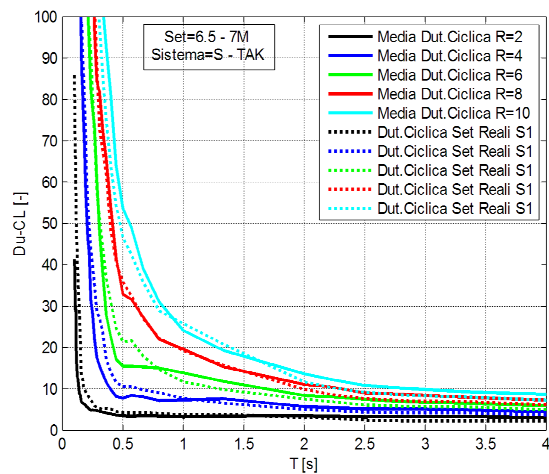


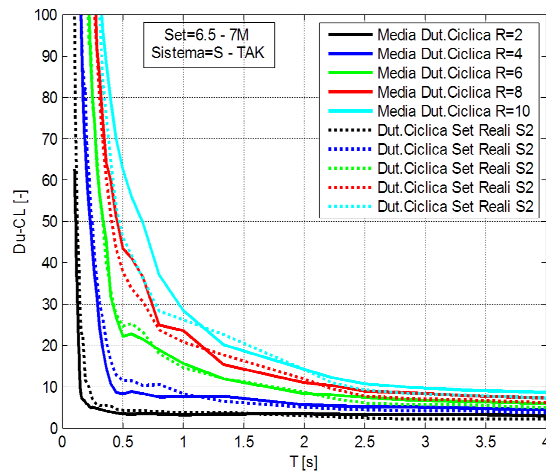
Figura 5.30 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalato (modificato e naturale)

Nella Figura 5.30 si vede l'andamento che si è ottenuto precedentemente per l'accelerogramma Campano Lucano del set di scalati, e che si è detto che rappresenta un risultato che dipende dal fattore di scalatura utilizzato dal programma rexel.

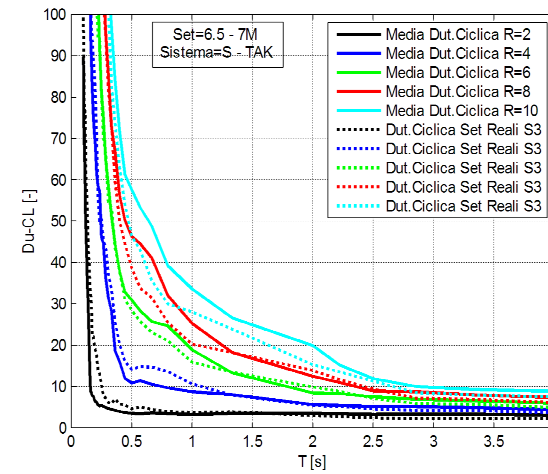
Nei risultati appartenenti al set di accelerogrammi naturali 6,5 – 7M, in confronto con il set di modificati, rappresentati in Figura 5.31, si può vedere un andamento molto simile per i due set, situazione che si riscontra anche nel caso degli spettri a duttilità cinematica, e quindi si può dire che il metodo di modifica degli accelerogrammi non comporta troppe variazioni per quanto riguarda la risposta in duttilità del sistema.



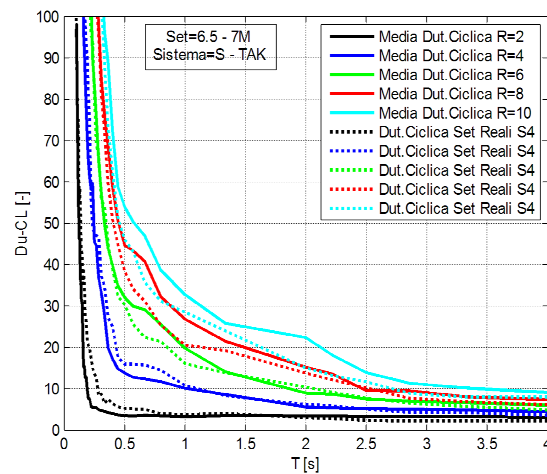
S 1



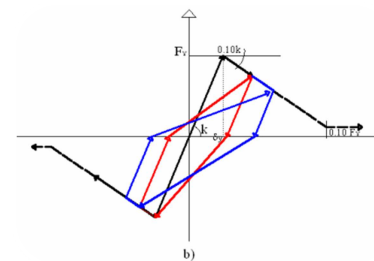
S 2



S 3



S 4



Legame costitutivo Takeda

Figura 5.31 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (medie modificati e naturali)

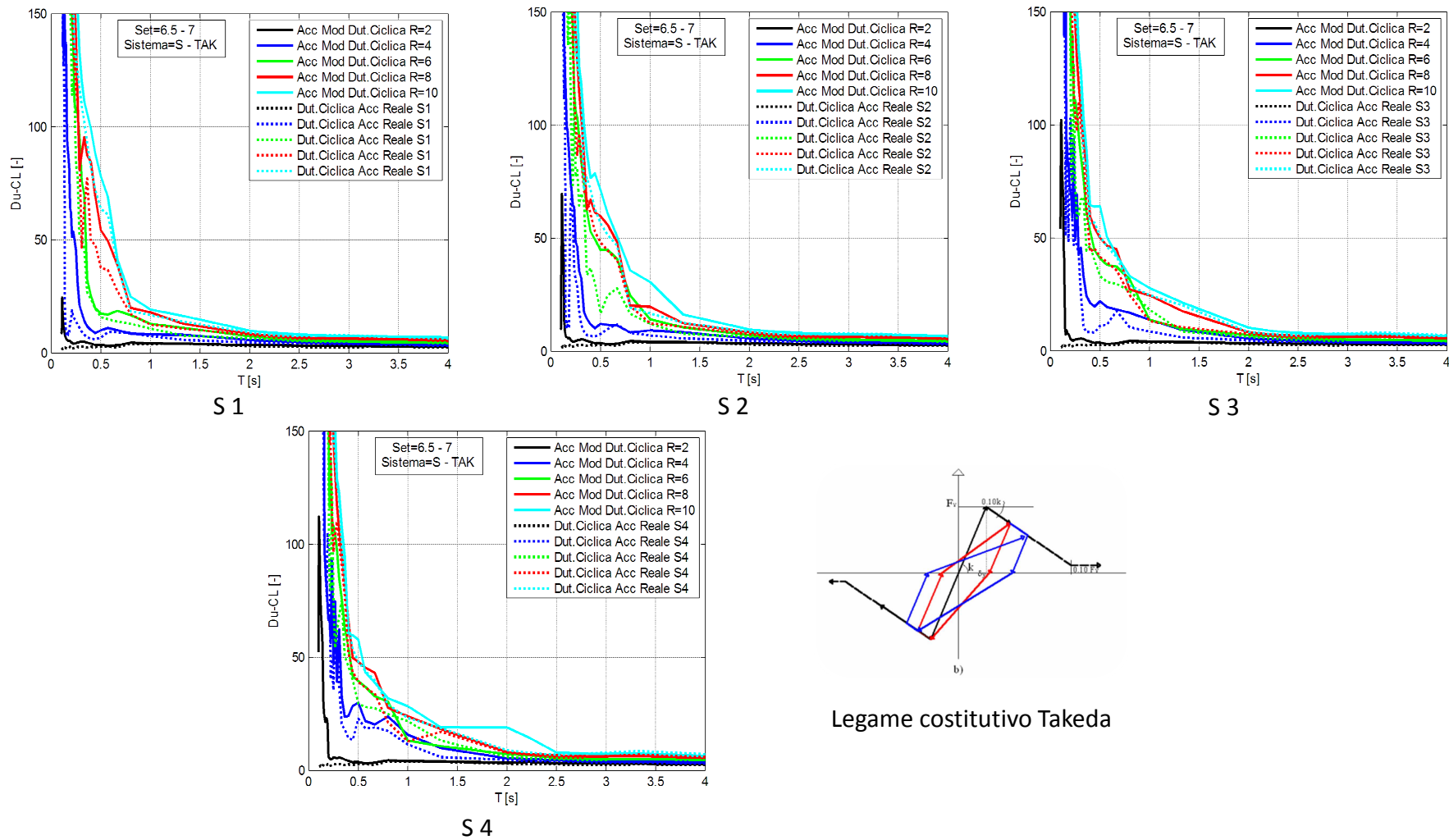


Figura 5.32 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)

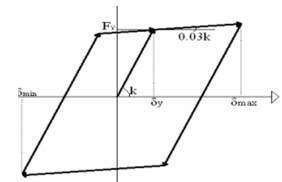
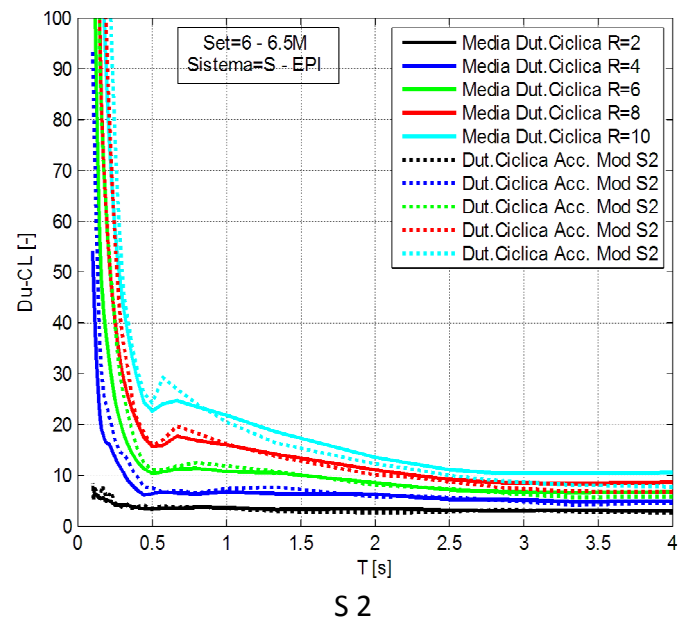
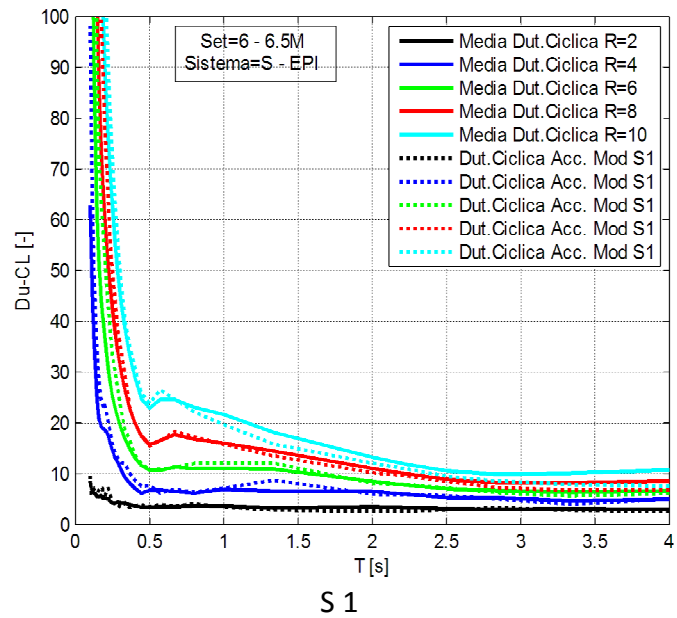
### 5.2.2 Legame costitutivo Elasto – plastico con incrudimento

Si presentano a continuazione gli spettri di risposta in duttilità ciclica per il legame costitutivo EP INC, per gli stessi accelerogrammi selezionati prima.

Dai risultati ottenuti per il set di accelerogrammi generati in base all'accelerogramma modificato Friuli (AS) si riscontrano i risultati ottenuti in Figura 5.33, e si può vedere che l'andamento di quest'ultimo è molto simile alla media dei primi, quindi la procedura di generazione non produce dei cambiamenti particolari negli accelerogrammi che sono stati generati. Si può osservare che, mettendo a confronto questi risultati con quelli per la risposta in duttilità cinematica, si ottengono degli andamenti più o meno simili ma con risultati leggermente maggiori dei primi rispetto ai secondi. Questo vuol dire la risposta del sistema definita da una risposta massima molto ben definita, ma non si può sapere con certezza se la risposta è nettamente duttile, oppure si generano dei cicli intorno ad uno stato di resistenza del sistema che non corrisponde con lo stato di resistenza iniziale.

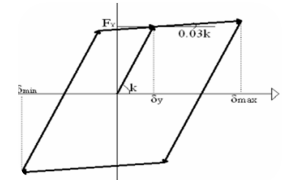
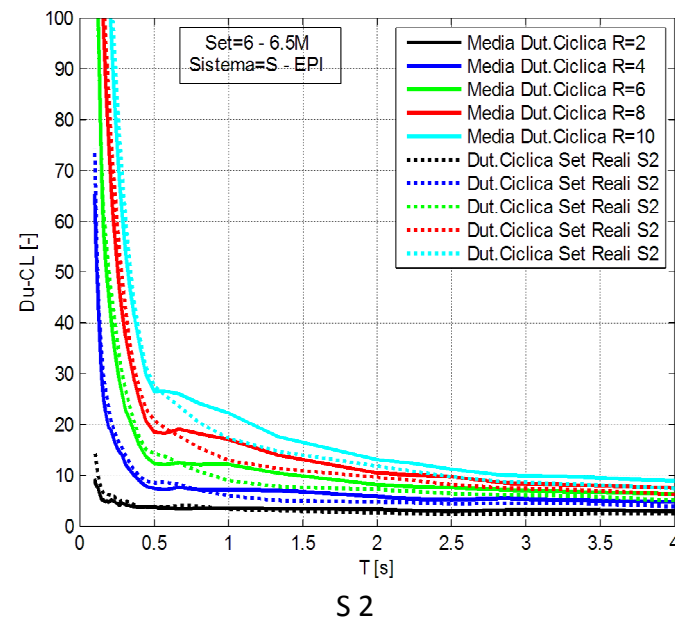
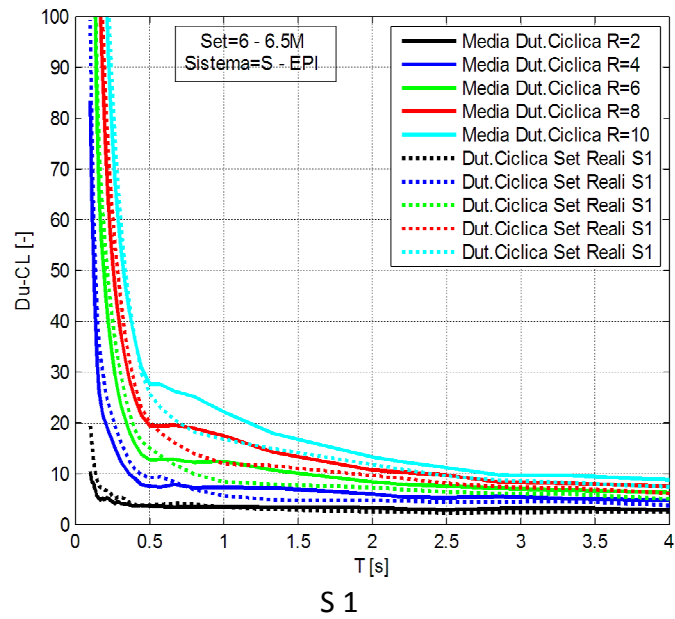
Dalle Figura 5.34 e 5.35 si ottengono dei risultati per i set di naturali e per quello degli accelerogrammi modificati molto simili in andamento a quelli ottenuti precedentemente negli spettri di duttilità cinematica. Questo porta alle stesse conclusioni sopra descritte. Si vede anche in questo caso come in media gli accelerogrammi modificati presentano degli stessi risultati in duttilità rispetto a quelli reali, con delle piccole variazioni, in genere attribuite allo scarto che si presenta tra la media degli spettri di risposta degli accelerogrammi e quello di progetto.





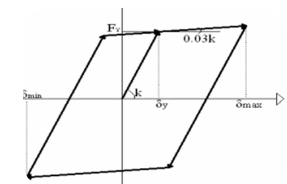
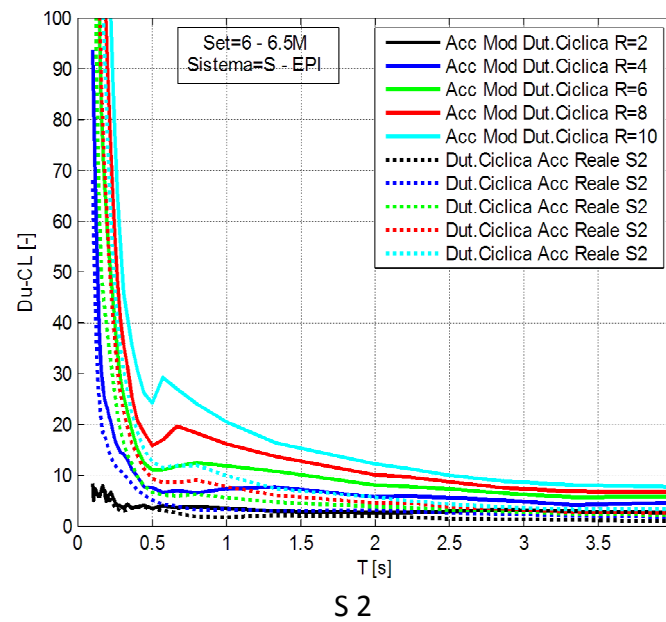
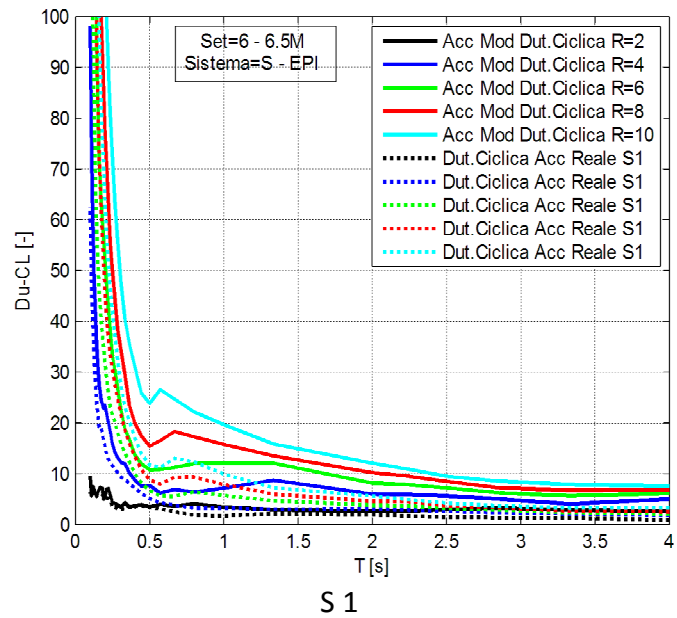
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.33 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)



Legame costitutivo EP INC

Figura 5.34 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)



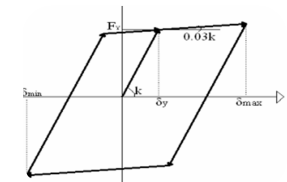
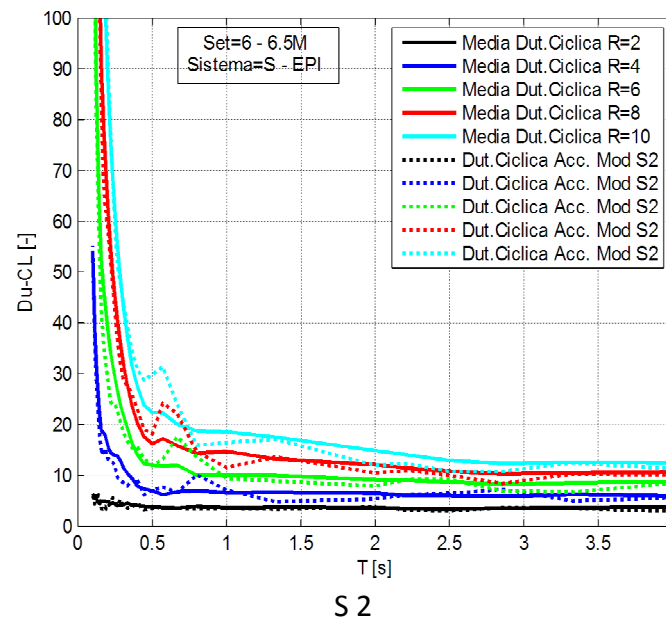
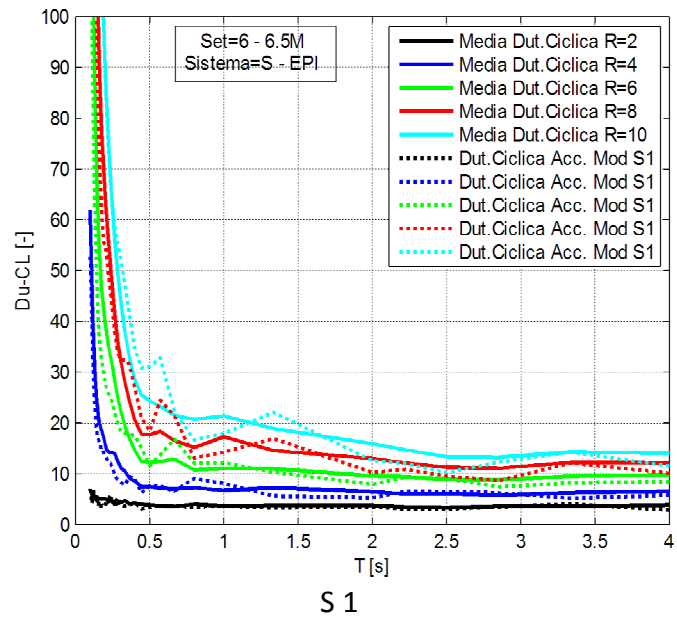
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.35 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)

Nel caso dell'accelerogramma Campano Lucano appartenente al set di accelerogrammi scalati, si presentano i risultati di duttilità ciclica nelle Figure 5.36 e 5.37. Nella prima si vede il confronto tra il set di 10 accelerogrammi e quello base modificato. Si può vedere che, per quanto riguarda l'andamento, è molto simile a quello ottenuto nei risultati della duttilità cinematica, ed in base all'intensità i valori sono sempre più alti, come si spera che siano. Nella seconda figura si vede che i risultati non sono confrontabili per quanto detto prima.

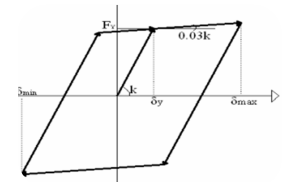
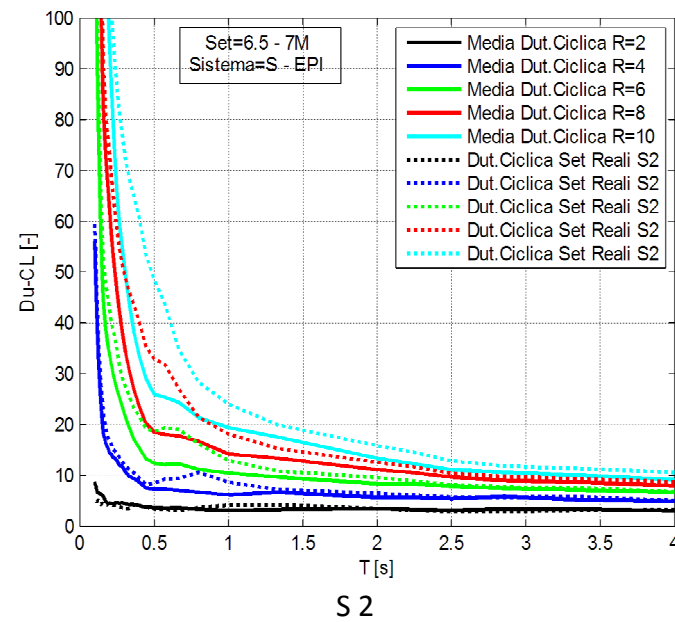
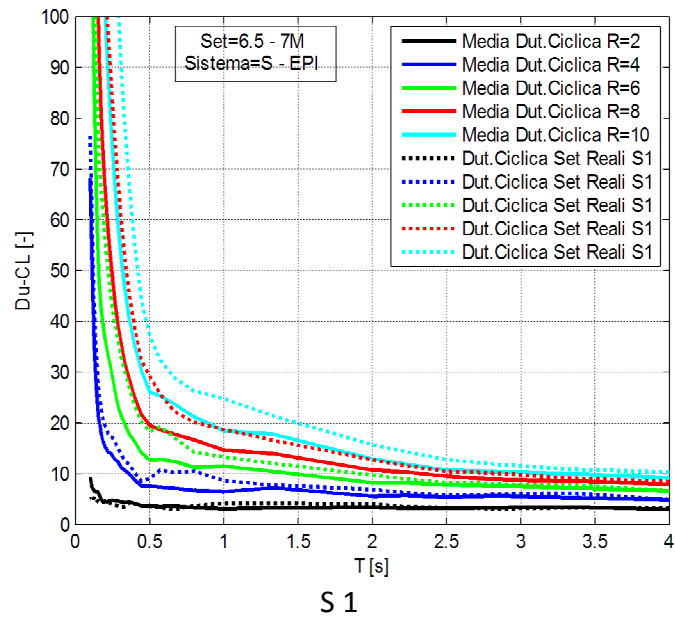
Nella Figura 5.38, non si riscontrano risultati molto diversi, sia tra i due set confrontati in figura, sia tra i risultati ottenuti precedentemente per la duttilità cinematica, questo ultimo sempre in base all'andamento degli spettri, visto che i valori della duttilità ciclica sono sempre maggiori rispetto a quelli di duttilità cinematica

Nelle Figure 5.39 4 5.40 si hanno dei risultati della stessa tipologia di quelli riscontrati prima e che portano alle stesse conclusioni accennate nei paragrafi precedente.



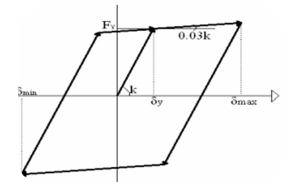
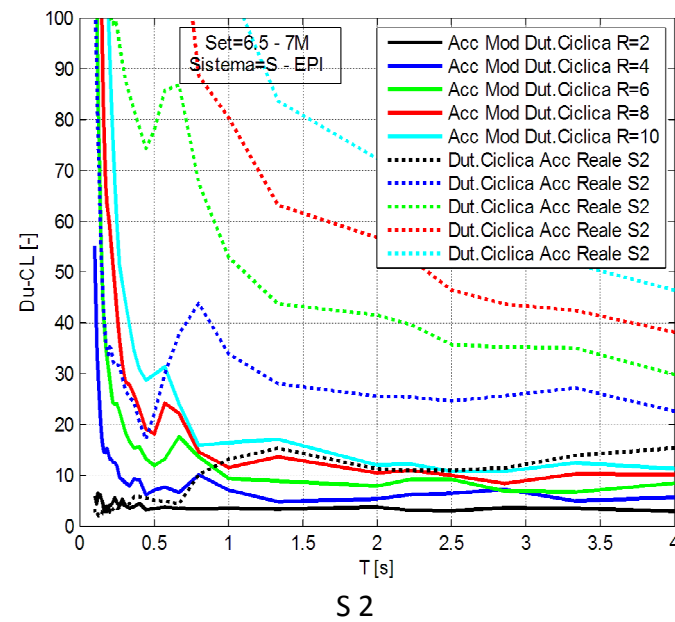
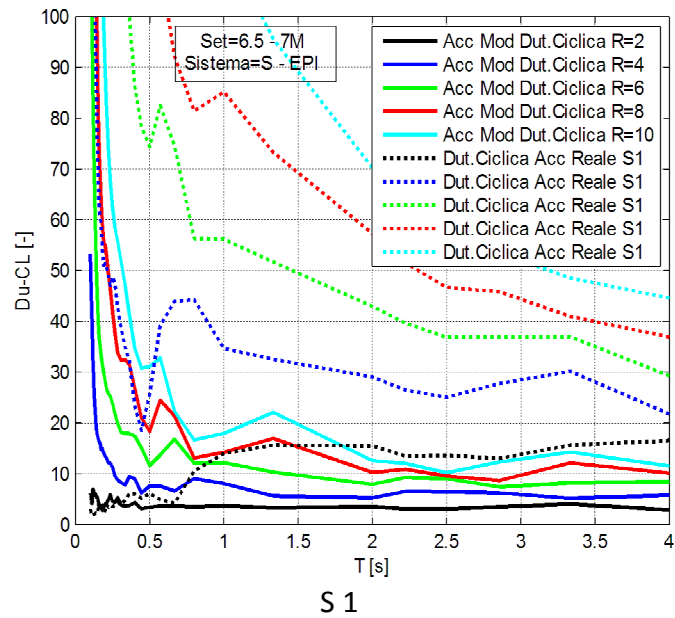
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.36 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificati e media dei generati)



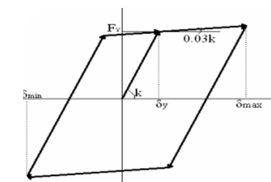
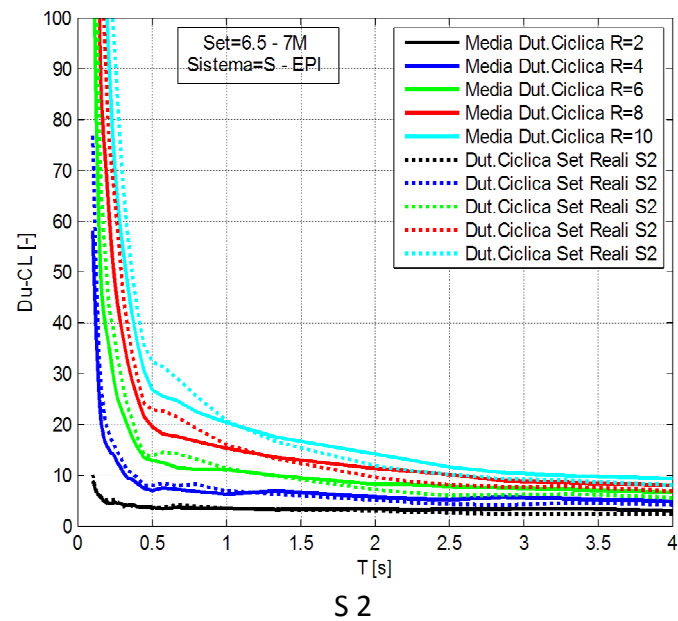
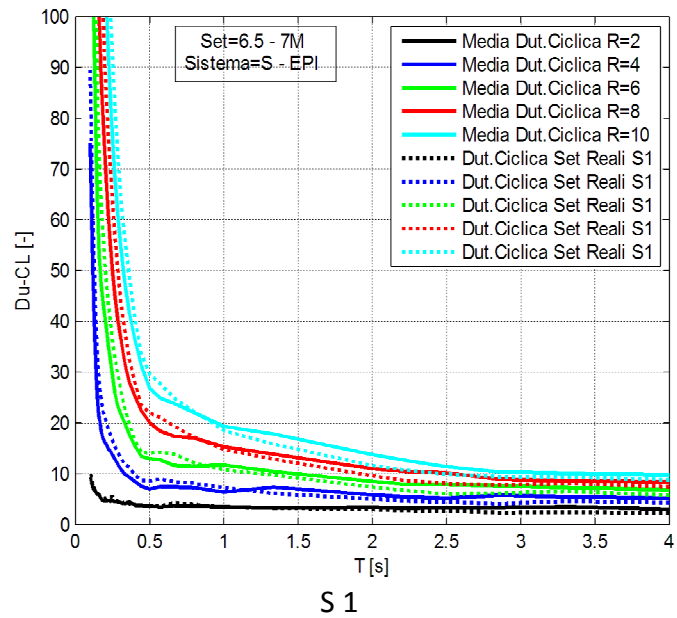
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.37 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalato (media modificati e naturali)



Legame costitutivo EP INC

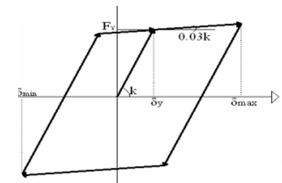
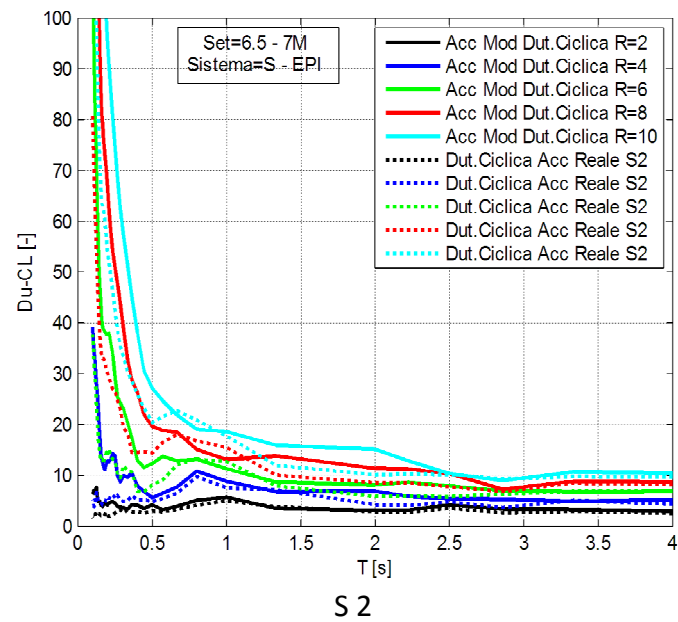
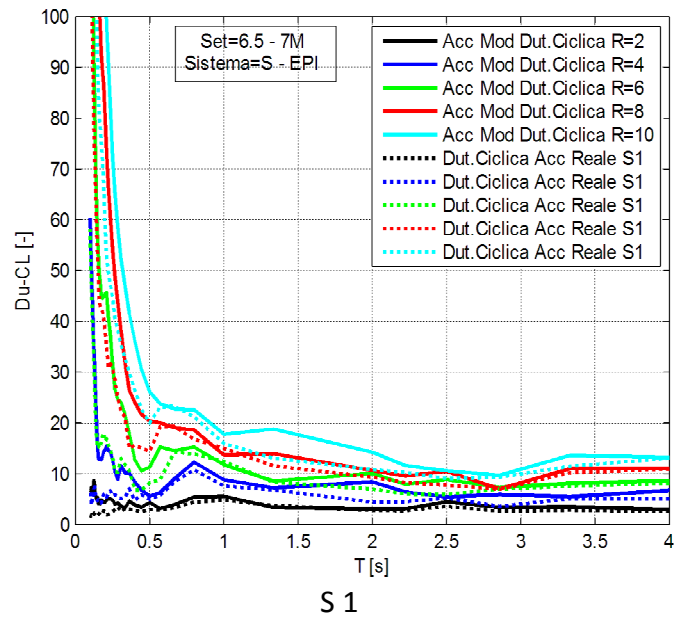
Figura 5.38 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalato (modificato e naturale)



Legame costitutivo EP INC

Figura 5.39 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano (modificati e media dei generati)





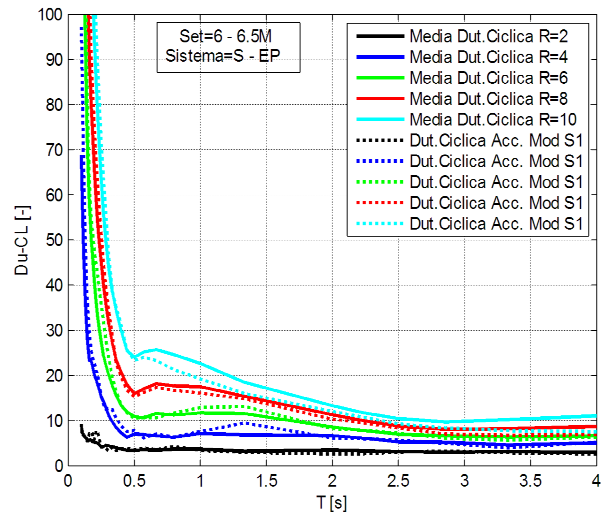
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.40 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)

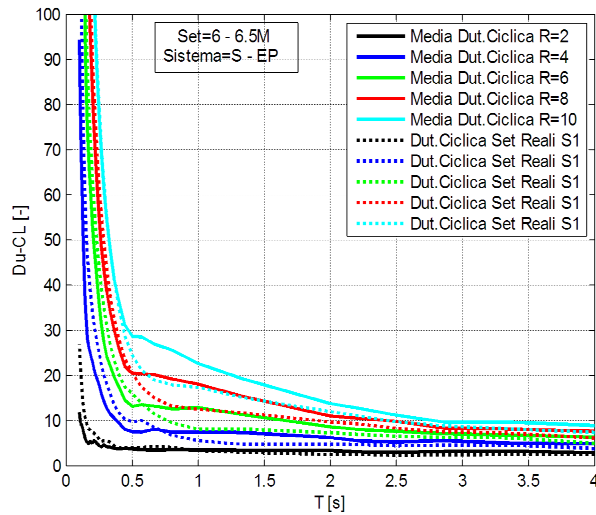
### **5.2.3 Legame costitutivo Elasto – perfettamente plastico**

Si presentano i risultati ottenuti per questo legame costitutivo in base ai tre soliti accelerogrammi in base ai set generati, il set di naturali e il set dei modificati nelle figure 5.41, 5.42 e 5.43

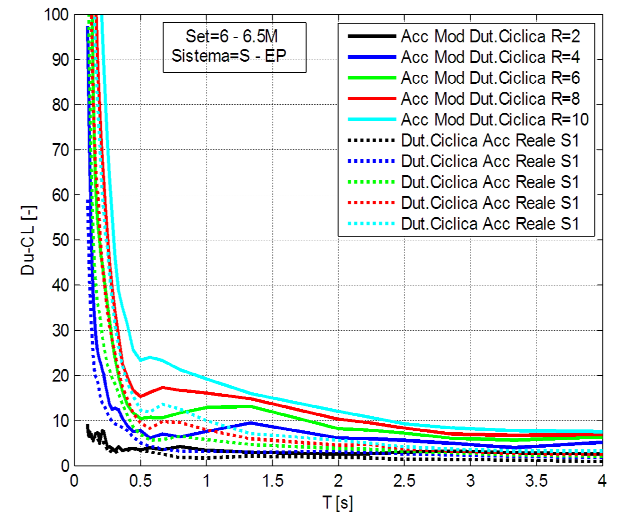
Anche per questo legame costitutivo si ottengono dei risultati, per tutti gli accelerogrammi, che si riscontrano nei risultati della risposta del sistema in duttilità cinematica, per quanto riguarda l'andamento. In questo caso si hanno anche dei valori che sono più elevati rispetto a quelli per duttilità cinematica e si arriva alle stesse conclusioni sopra descritte.



Acc Mod vs. Set acc. generati



Set modificati vs. Set reali

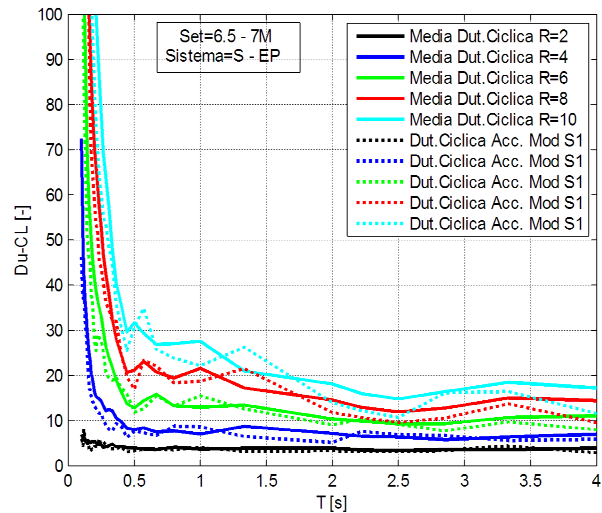


Acc mod vs. Acc reale

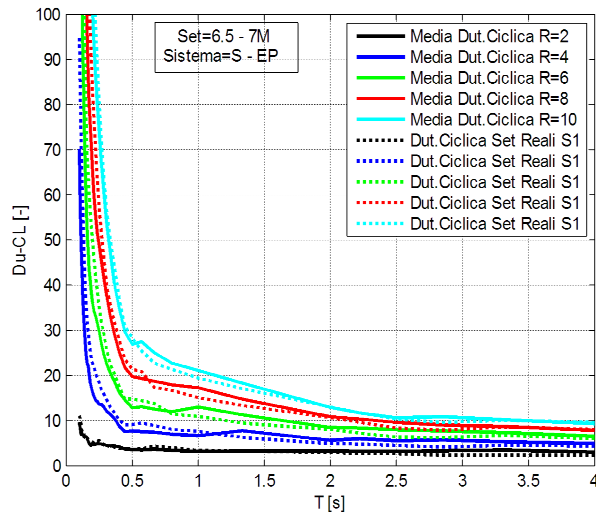


Legame costitutivo  
EP

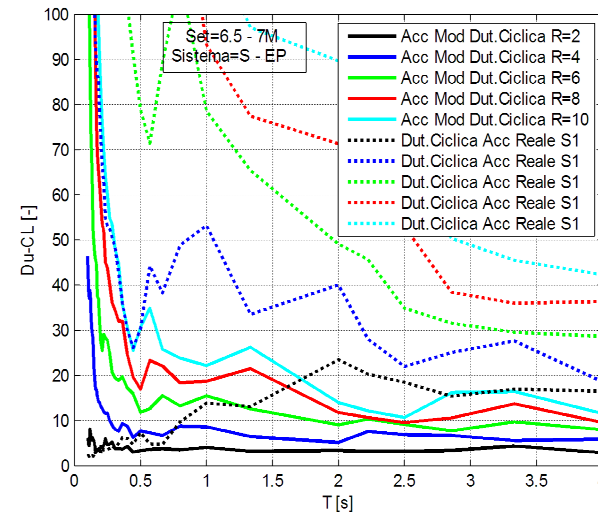
Figura 5.41 Spettri in duttilità ciclica per Acc. Friuli (AS)



Acc Mod vs. Set acc. generati



Set modificati vs. Set reali

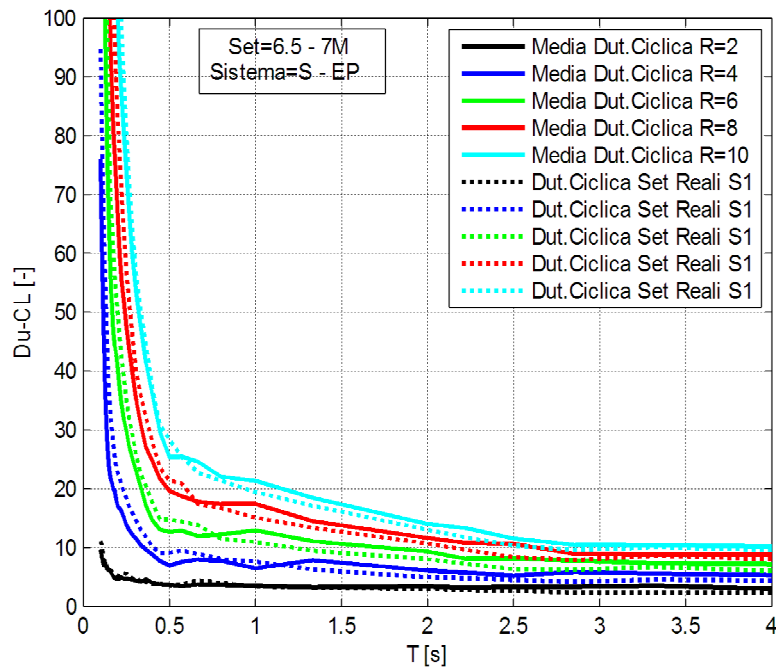


Acc mod vs. Acc reale

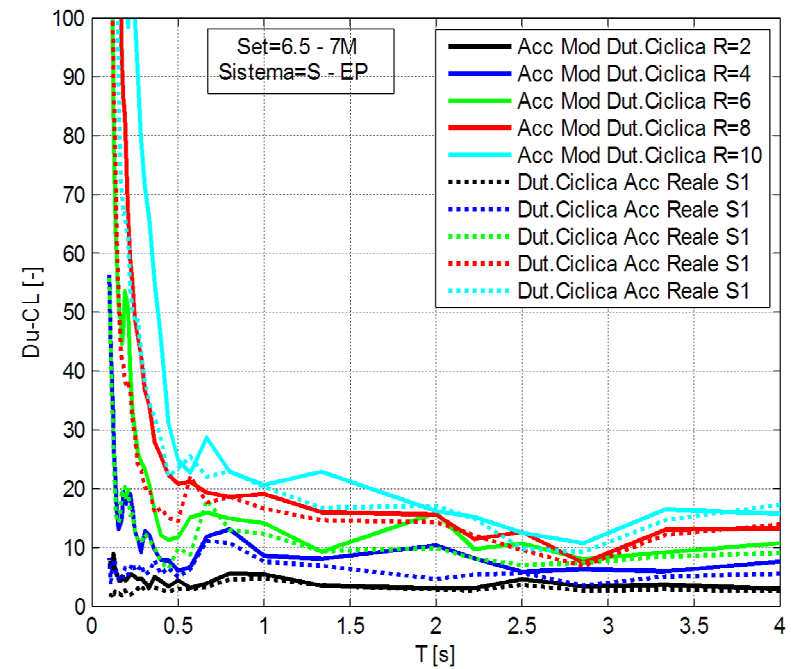


Legame costitutivo  
EP

Figura 5.42 Spettri in duttilità ciclica per Acc. Campano Lucano scalato



Set modificati vs. Set reali



Acc mod vs. Acc reale



Legame costitutivo EP

Figura 5.43 Spettri in duttilità ciclica per Acc. Campano Lucano Naturale

### 5.3 Spettri di energia isteretica

Prima si è parlato di due fattori di duttilità che hanno dei vantaggi per valutare il danneggiamento della struttura in certi casi particolari di risposta. Ora, per fare la valutazione di questo danneggiamento nei casi in cui il collasso non viene definito dalla escursione massima definita dalla struttura durante la risposta ciclica, ma dall'ammontare di energia dissipata da essa durante tutta la durata dell'accelerogramma, si introduce lo spettro di energia isteretica, nel quale si rappresenta la energia isteretica totale dissipata dalla struttura, valutando essa per tutti i sistemi definiti con le diverse frequenze fondamentali. Per calcolare l'energia isteretica dissipata si sa che, l'energia offerta dall'accelerogramma alla struttura sarebbe l'energia input  $E_I$  del sistema, che è uguale al lavoro compiuto dalle forze che, dall'esterno, agiscono sul sistema nell'intervallo di tempo considerato. Questa energia si trasforma in energia non recuperabile o dissipata, ed energia recuperabile.

La energia dissipata può essere suddivisa in energia dissipata per smorzamento viscoso  $E_\zeta$ , ed energia d'isteresi  $E_H$ . la prima rappresenta il lavoro compiuto dalle forze elastiche nelle velocità, mentre la seconda è determinata come il lavoro che tutte le forze, tranne quella viscosa, compiono negli spostamenti del sistema.

L'energia recuperabile può anch'essa essere suddivisa in due: la prima, detta energia elastica  $E_E$ , viene calcolata come il lavoro che le forze elastiche compiono negli spostamenti; la seconda invece, detta anche energia cinetica  $E_k$ , rappresenta il lavoro ..... nelle velocità del sistema.

Da quanto detto fin'ora , le espressioni che definiscono le suddette energie vengono riportate in seguito:

$$E_k(t) + E_\zeta(t) + E_E(t) + E_H(t) = E_I(t)$$

Dove:

$$E_I(t) = \int_0^t m \ddot{x}_t dx$$

$$E_k(t) = \frac{1}{2} m \dot{x}_t^2$$

$$E_I(t) = \int_0^t kx \dot{x} dt$$

$$E_E(t) = \frac{1}{2} kx^2$$

$$E_H(t) = \int_0^t (F_{tot} - bx) \dot{x} dt$$

Da queste equazioni si può dedurre che, se la struttura rimane in campo elastico, l'energia isteretica è pari a zero mentre quella dissipata è tutta del tipo viscosa, essendo  $E_z = E_I$ . Se però il coefficiente di smorzamento è molto basso (casi strutturali), e la risposta strutturale viene rappresentata da un numero elevato di cicli, si può fare la supposizione che  $E_H = E_I$ , il che ci porta alla condizione nella quale si compie l'ipotesi dell'approccio energetico, e quindi il caso in cui il collasso avviene per raggiungimento dell'ammontare di energia che la struttura riesce a dissipare.

### 5.3.1 Legame costitutivo Takeda

Nella Figura 5.44 si presenta l'andamento degli spettri in energia isteretica, calcolati come in precedenza, per l'accelerogramma Friuli (AS) modificato e per il set di 10 accelerogrammi generati in base a quello modificato. Si vede da questa figura che, andando a riguardare gli spettri in duttilità, sia cinematica o ciclica, nel momento in cui comincia il decadimento dei valori di essa, inizia anche un aumento dell'energia isteretica del sistema, il che significa che questo comincia ad avere una risposta determinata più da cicli isteretici che dissipano l'energia, e la sua risposta massima si presenta con valori ancora più piccoli, man mano che aumenta il periodo della struttura. Si vede dai grafici che questa energia isteretica presenta dei picchi di solito per valori del periodo all'incirca di 0,5s e poi diminuisce gradualmente, per valori di periodo più alti, cioè, per strutture più rigide. Mettendo a confronto questi grafici con quelli della risposta in duttilità della struttura, per valori del fattore di duttilità  $R$  via a via più alti, siccome la struttura diventa più labile, è logico che essa abbia risposte massime più alte con una quantità minore di cicli isteretici, cioè, energia isteretica più bassa, rispetto a strutture con fattore di duttilità più basso,

cioè più resistenti, dove la risposta è determinata da tanti cicli isteretici con una minore escursione nel dominio degli spostamenti.

Da un'ulteriore analisi si può osservare come la media del set di 10 accelerogrammi tende ad avere, nel range di periodi tra 1 e 2,5, dei valori più alti di energia isteretica rispetto a quelli che si hanno per il singolo accelerogramma modificato. Questo comportamento si vede molto accentuato per i sistemi a fattore di duttilità  $R = 2$ , dove si hanno degli scarti maggiori tra i due spettri. Per valori più alti dei fattori di duttilità si vede come gli andamenti di energia isteretica sono praticamente uguali. Questo perché, come abbiamo visto precedentemente, la risposta di questi sistemi è determinata basicamente dalla sua risposta massima in spostamento, o meglio in duttilità (facendo riferimento agli spettri presentati dei paragrafi precedenti)

Dalla Figura 5.45 si può osservare come, in media, il set di accelerogrammi modificati, rispetto a quelli naturali definiti nel set non scalato di 6 – 6,5M, ha dei valori decisamente più alti di energia isteretica il che fa pensare che le modifiche portate dal metodo di Cecini [] comportino un aumento del contenuto in frequenza che porti alla struttura a rispondere a carichi ciclici più accentuati rispetto ai suoi omologhi naturali.

Nei grafici di Figura 5.46 si osserva un comportamento di molto interesse. Come si può vedere, la risposta del sistema con fattore di duttilità  $R = 2$  tra i valori di 0.8 e 1s. soggetto all'azione dell'accelerogramma Friuli (AS) naturale, produce valori nulli dell'energia isteretica, il che significa che il sistema, non snervando, rimane sempre in campo elastico e quindi l'energia dissipata dal sistema è nettamente elastica. Nella risposta del sistema sotto l'accelerogramma modificato, invece, non si verifica questo comportamento mettendo in evidenza che, durante l'applicazione della modifica dell'accelerogramma, sono stati aggiunti dei contributi in frequenza che fanno in modo tale che la struttura snervi per quei periodi, anche se l'accelerogramma naturale non lo avrebbe fatto. Questo comportamento non è stato così evidente nei grafici di duttilità sopra illustrati.



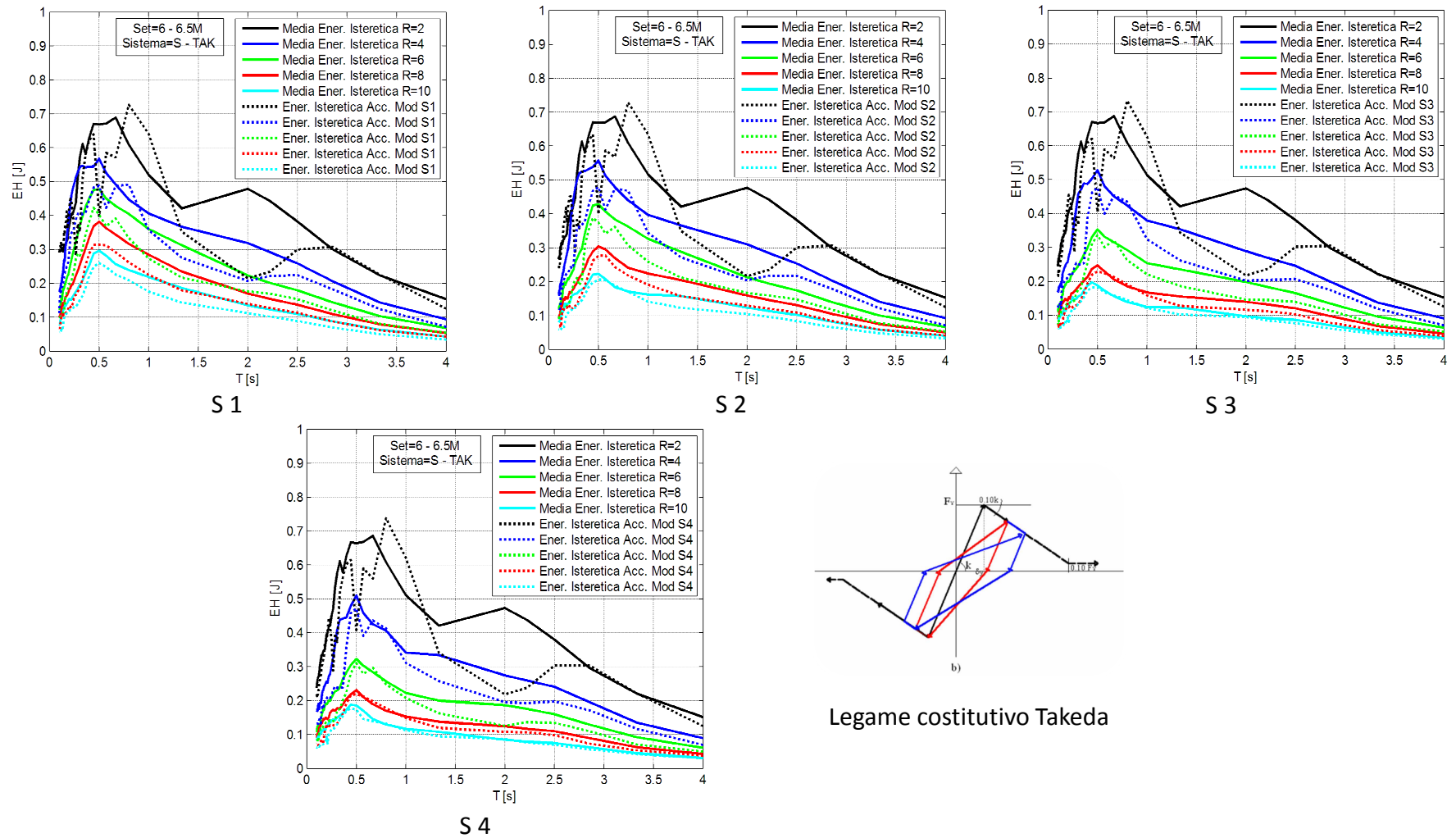


Figura 5.44 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)

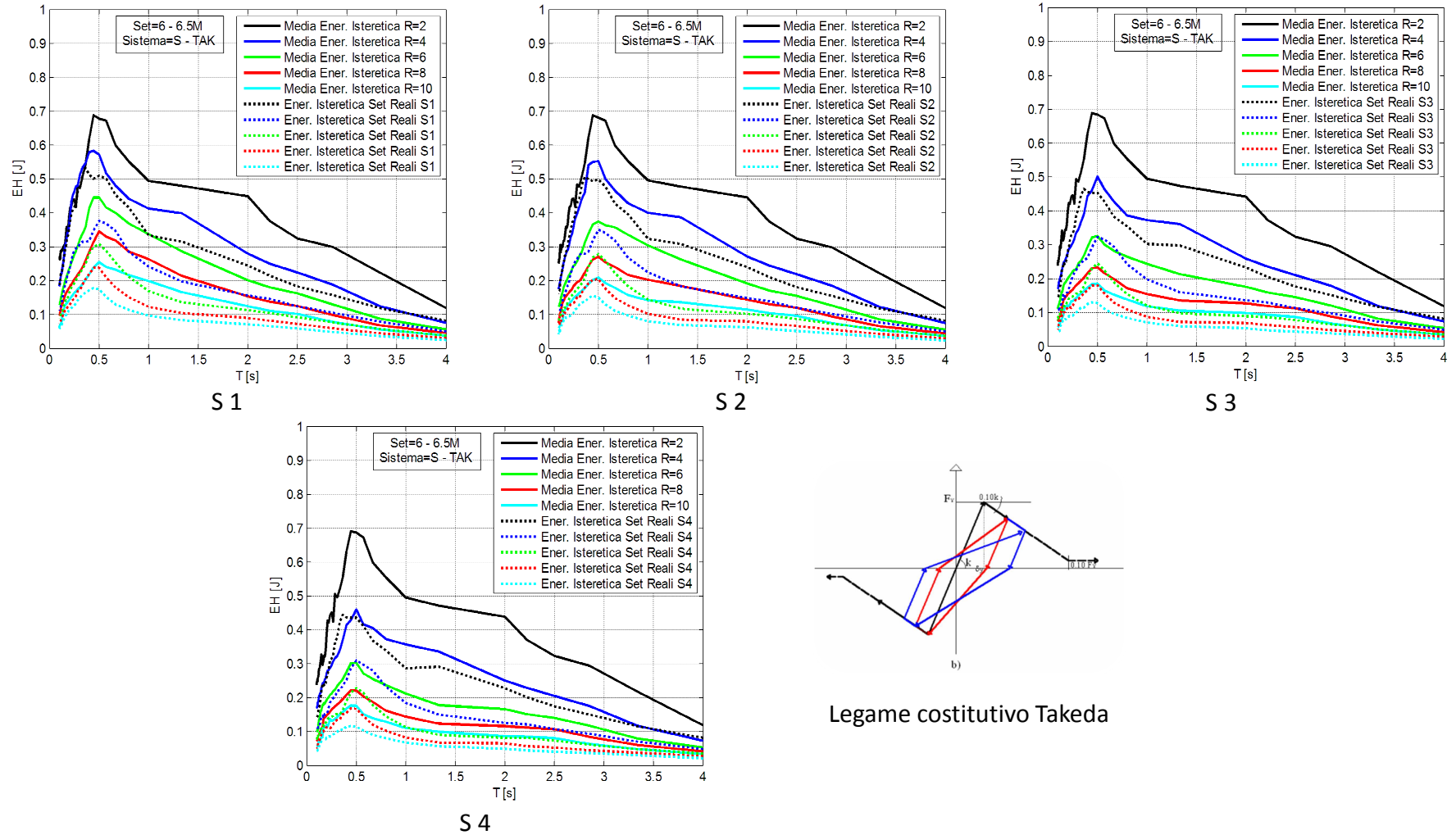


Figura 5.45 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (medie modificati e naturali)

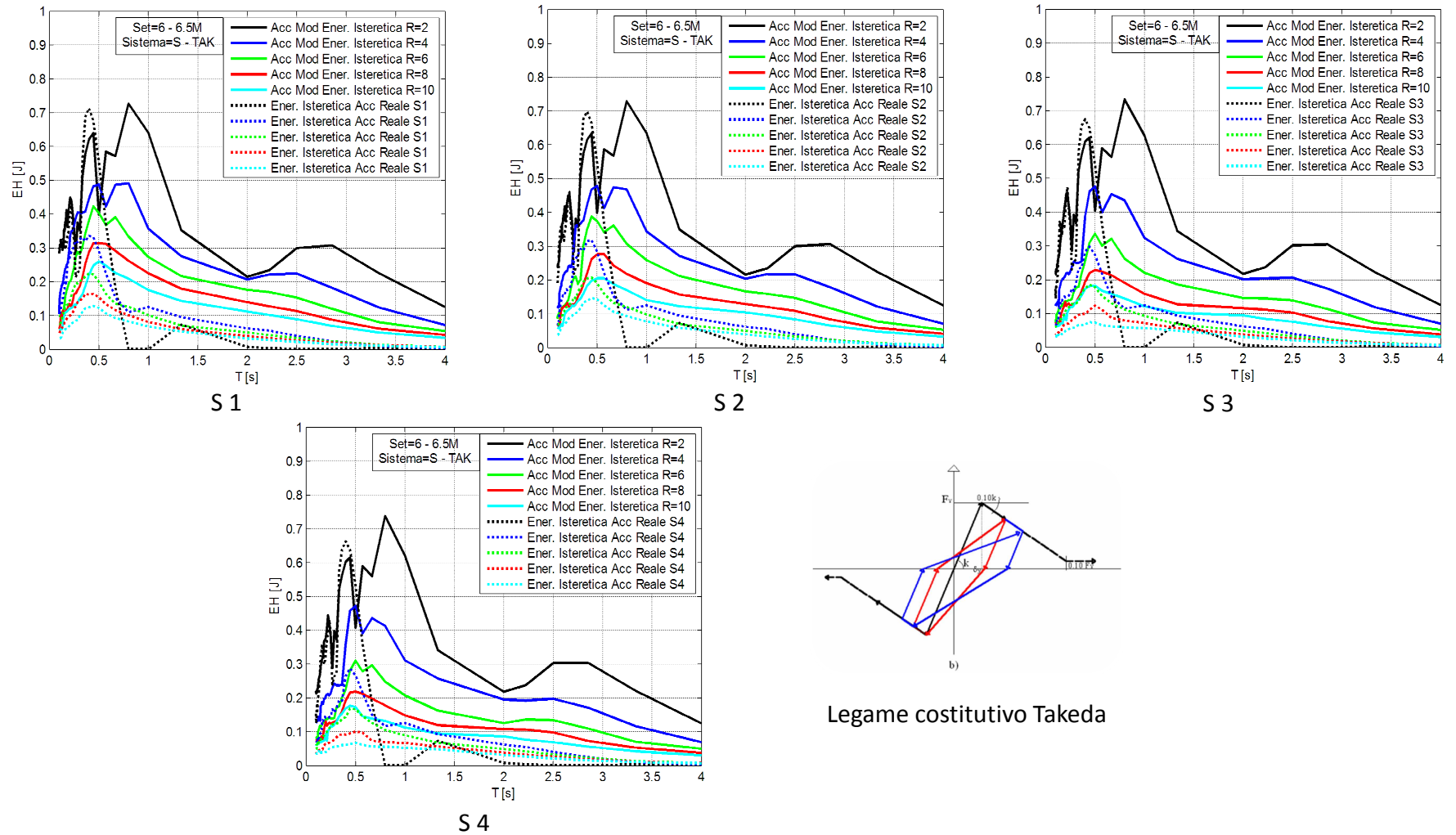


Figura 5 46 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)

In Figura 5.47 sono stati rappresentati gli spettri in energia isteretica, questa volta per l'accelerogramma Campano Lucano modificato e il set di 10 accelerogrammi che non sono stati generati. Si può osservare che, anche se gli spettri definiti per il singolo accelerogramma hanno degli andamenti un po' irregolari, si vede come la media del set di 10 si adatta molto bene all'andamento di prima, con valori che sono all'incirca uguali o in certi casi più alti rispetto all'accelerogramma modificato.

La Figura 5.48 mostra come la media degli spettri in energia isteretica per il set di scalati 6,5 – 7M, a confronto con il set di modificati, mostra dei valori decisamente più elevati di isteresi nel range di valori tra 0.3 e 1s.

Nella Figura 5.49 si mostrano i risultati ottenuti per gli spettri in energia isteretica dell'accelerogramma Campano Lucano scalato e modificato, e ancora una volta si ottengono dei valori molto alti, in questo caso di energia isteretica, condizionati dal fattore di scala che è stato applicato all'accelerogramma.

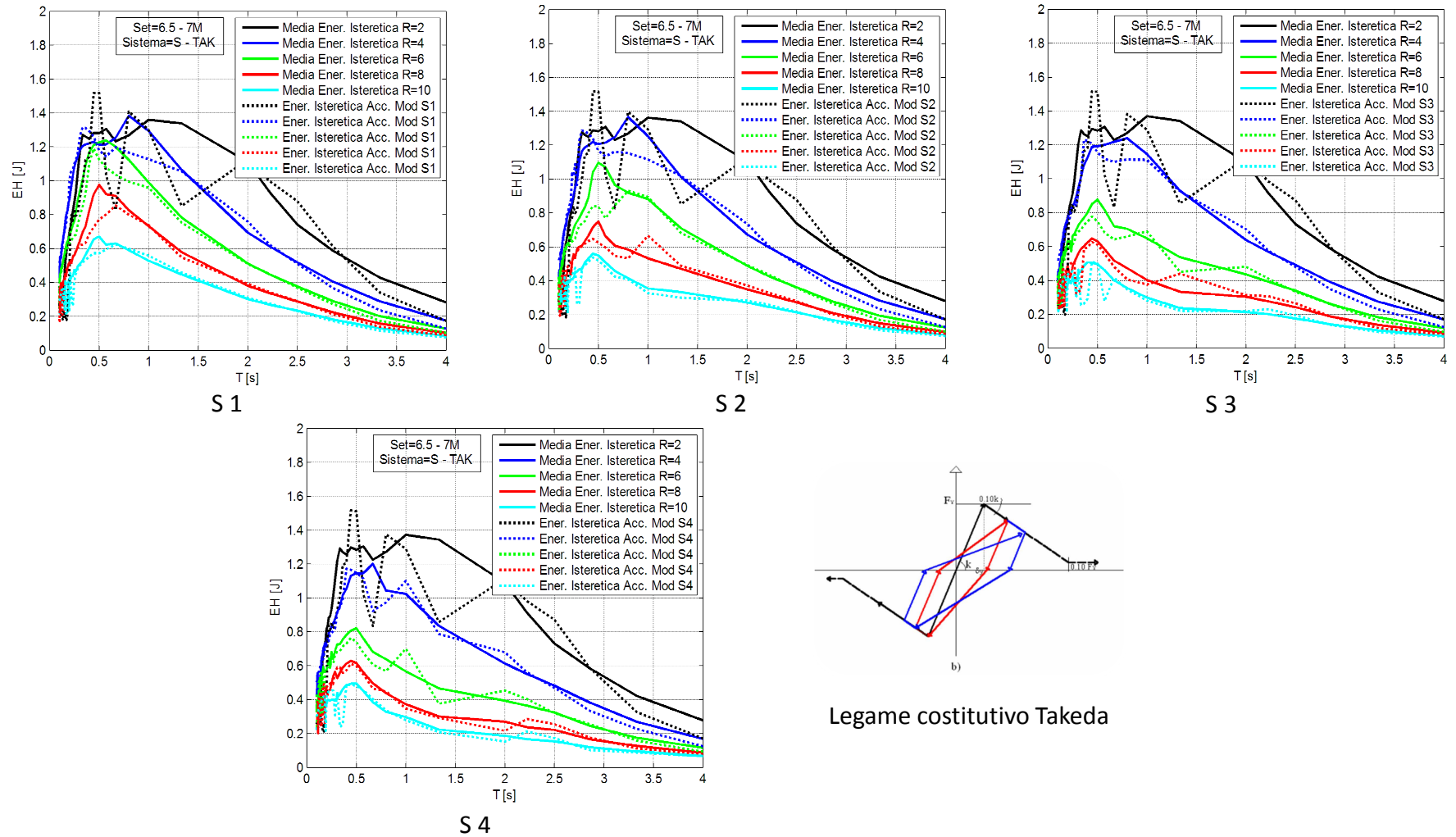


Figura 5.47 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificati e media dei generati)

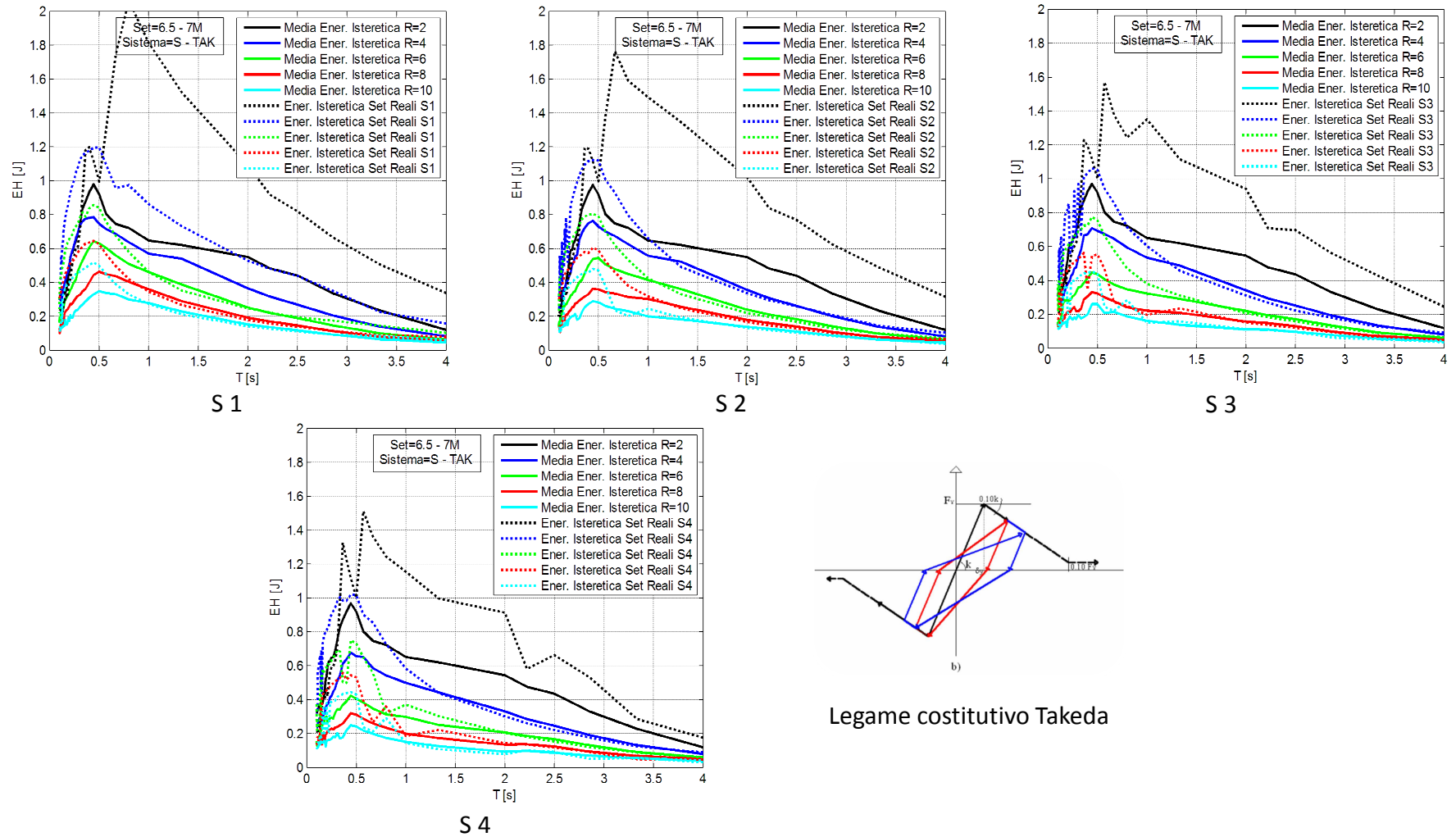


Figura 5.48 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalato (medie modificati e naturali)

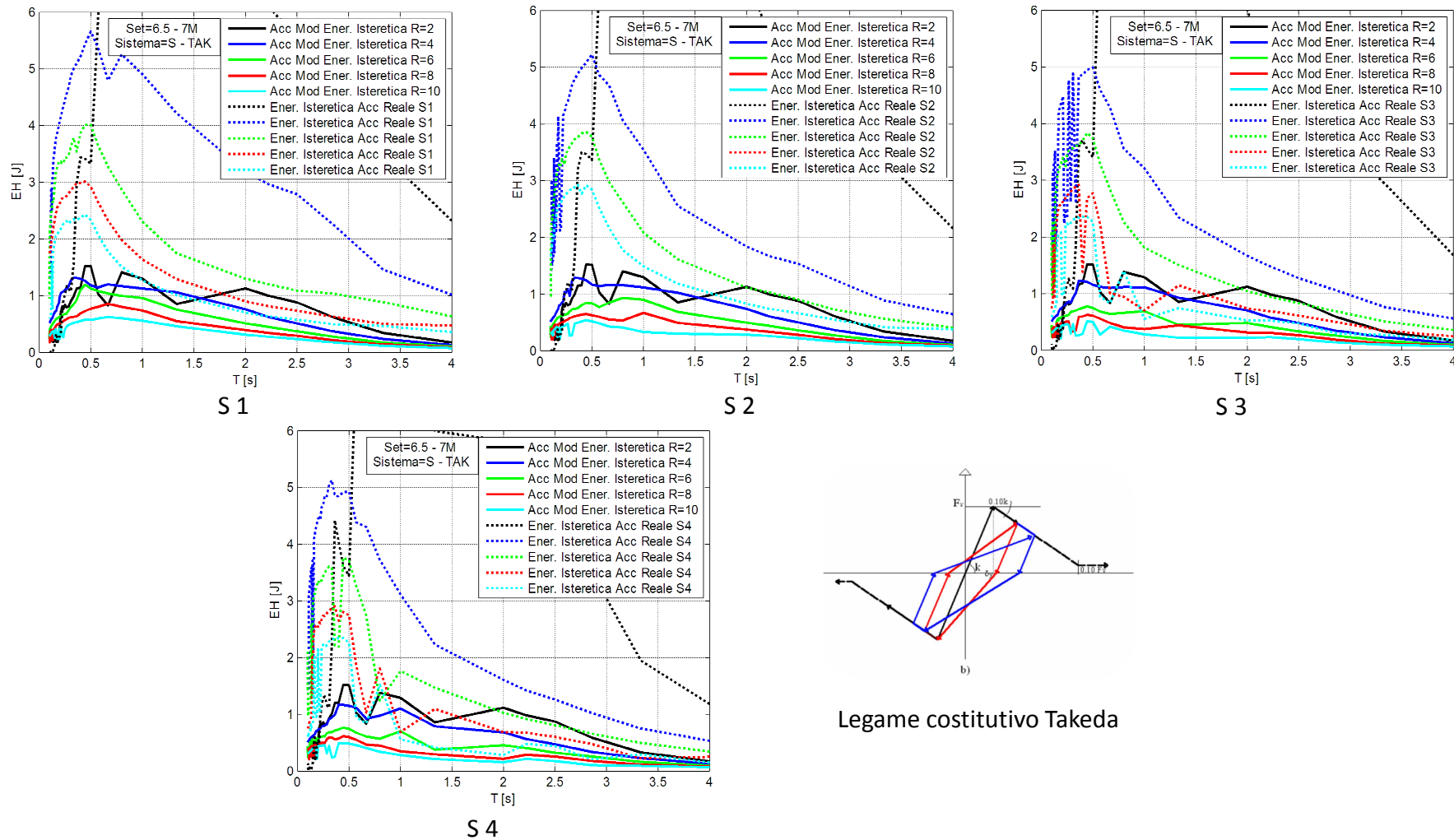


Figura 5.49 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalato (modificato e naturale)

Nella Figura 5.50 si mostra come il set de accelerogrammi modificati presenta un andamento molto simile a quello rappresentato dalla media degli spettri del set di naturali, con valori all'incirca uguali per entrambi gli spettri.

Dalla Figura 5.51 si può osservare come l'andamento dello spettro in energia isteretica per l'accelerogramma Campano Lucano modificato somiglia molto a quello per l'accelerogramma naturale, con degli scarti più elevati per i sistemi con fattore di duttilità  $R = 2$ . Si vede anche in questo caso come lo spettro si annulla, però questa volta nei range di valori all'incirca pari a 0.2s.

Facendo un confronto tra i valori ottenuti per lo spettro di energia isteretica, sia per l'accelerogramma Friuli (AS), sia per quello Campano Lucano, indipendentemente che siano stati scalati, modificati o rimangano quelli reali, si vede che, come si aspettava, il contributo energetico dell'ultimo è molto maggiore rispetto al primo, essendo quasi il doppio in certi punti del dominio dei periodi. Si però che la risposta media sia del set 6 – 6,6 e quello 6,5 -7, in termini di duttilità sono all'incirca uguale, variando ovviamente perché comunque i set sono stati definiti per intensità diverse, in linea di massima hanno praticamente lo stesso andamento.



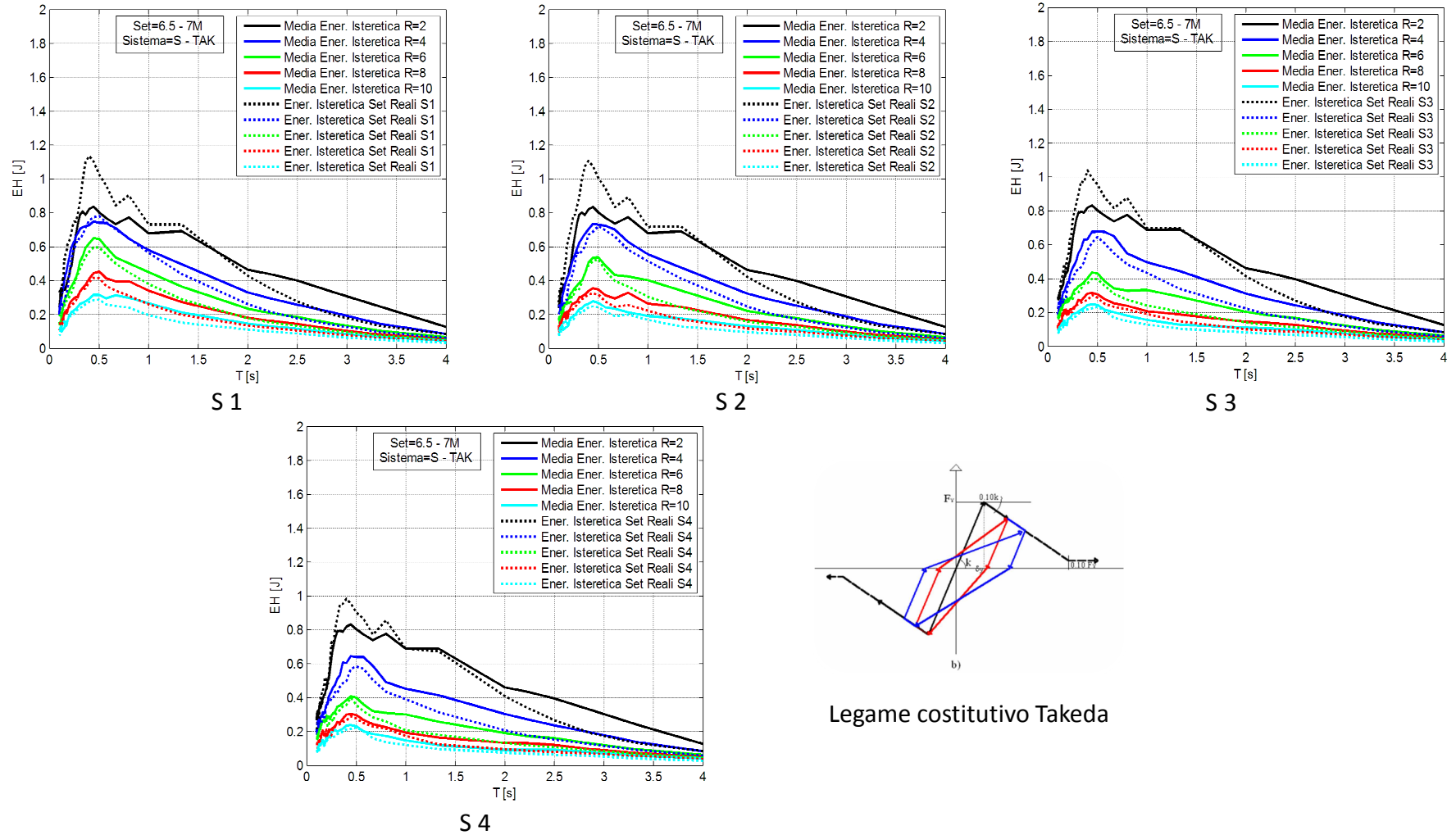


Figure 5.50 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (medie modificati e naturali)

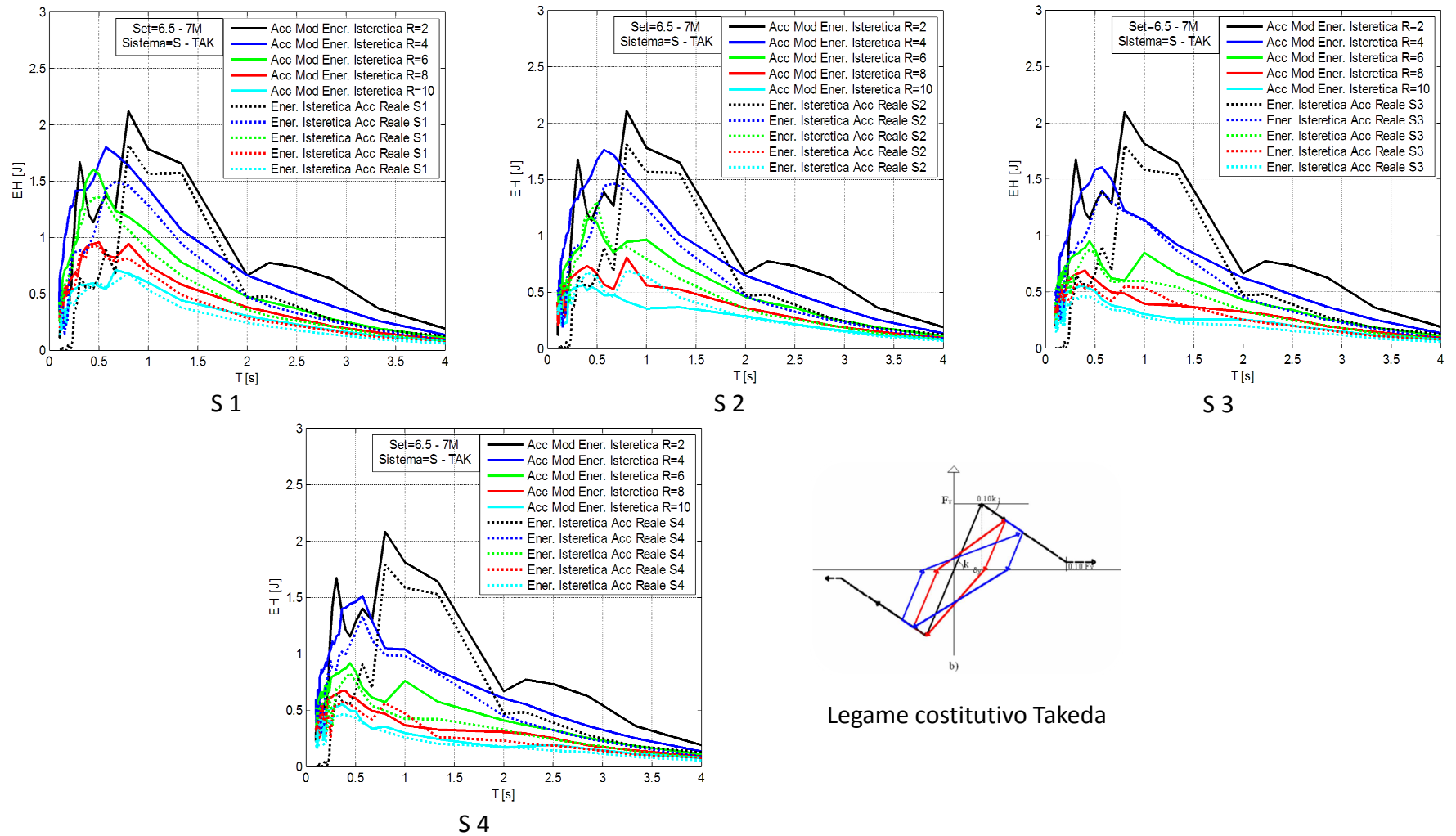


Figura 5.51 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)

### 5.3.2 Legame costitutivo Elasto – plastico con incrudimento

Nella Figura 5.52 si presentano gli spettri in energia isteretica per l'accelerogramma Friuli (AS) modificato e il set de 10 generati. Si vede anche in questo caso come la media degli spettri tende ad un andamento più regolare, a differenza di quello modificato che presenta in corrispondenza dei sistemi con fattore di duttilità  $R = 2$  e  $4$  dei picchi per i valori di periodo all'incirca  $0.5$  e  $1s$ . Si vede come, in linea di massima, gli spettri generati presentano dei valori più alti rispetto a quello modificato. Questo può darsi per il fatto che questi accelerogrammi sono stati anch'essi modificati con il metodo di correzione per renderli spettro – compatibili.

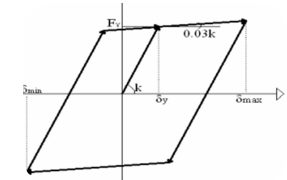
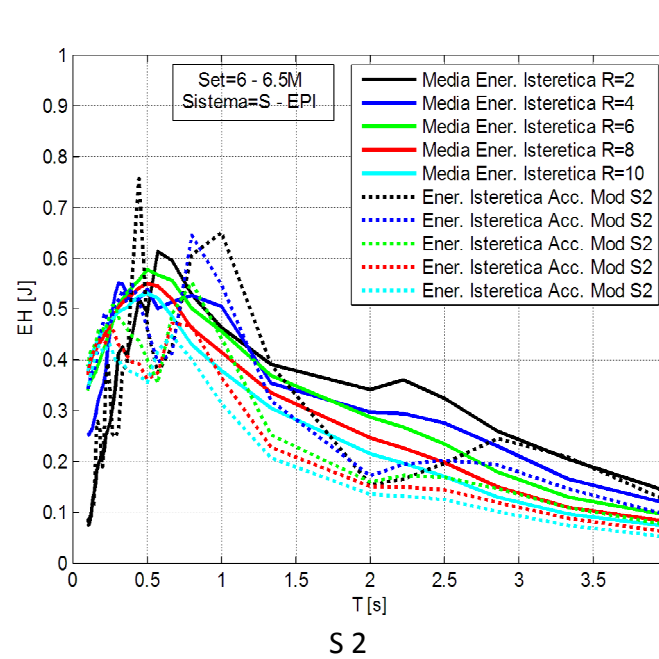
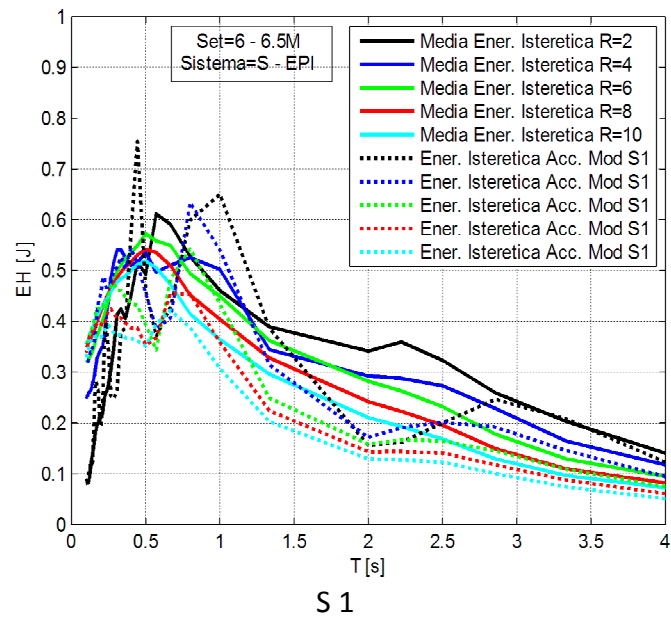
Nella Figura 5.53 si vede come sia il set di accelerogrammi modificati e il set di naturali seguono praticamente lo stesso andamento, anche se quelli modificati presentano dei valori decisamente più alti per quasi tutti i valori di periodo.

Nella Figura 5.54 si fa notare come, anche per questo legame costitutivo, l'accelerogramma Friuli (AS) naturale, presenta dei valori di energia isteretica molto più bassi di quanto si riscontra per l'accelerogramma modificato, evidenziandosi anche in questo caso il fatto del non snervamento del sistema per i valori di periodo tra  $0.8$  e  $1s$ .

Nella Figura 5.55 si presentano gli spettri in energia isteretica per l'accelerogramma Campano Lucano modificato e il set di 10. Si può vedere dalla figura che gli spettri per i sistemi che hanno un fattore di duttilità alto si hanno dei valori di energia isteretica più alti rispetto a quelli che si sono stati presentati per il legame costitutivo tipo Takeda. questo si può dover al fatto che la struttura degradandosi più lentamente con questo tipo di legame, ha una risposta che permette lo sviluppo di più cicli isteretici prima di perdere buona parte della sua resistenza.

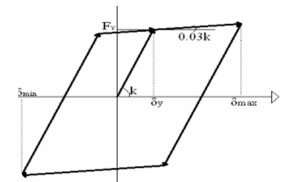
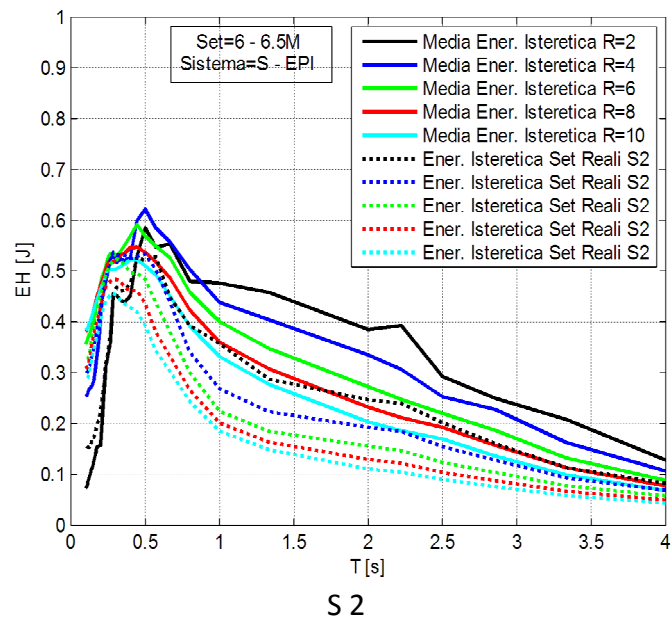
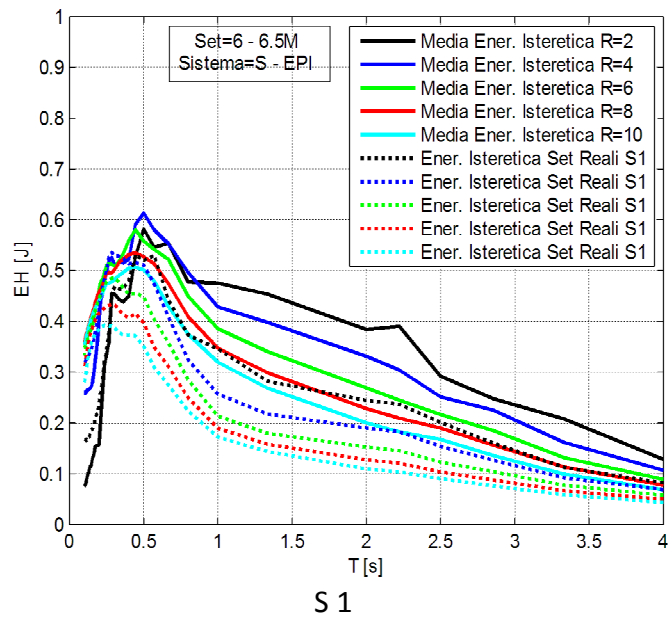
Dalla Figura 5.56 si può notare, che per questo legame costitutivo si generano degli scarti ancor più grandi tra la media del set di scalati e quello modificato, per quanto riguarda il contenuto di energia isteretica che si riesce a dissipare.

Questi risultati, e quelli ottenuto anche in Figura 5.57 vengono condizionati, come si è detto in precedenza dal fattore di scala che è stato applicato all'accelerogramma per approssimarlo di più all'intensità definita dallo spettro di progetto.



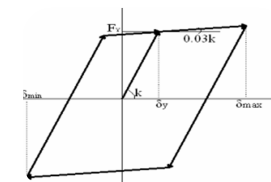
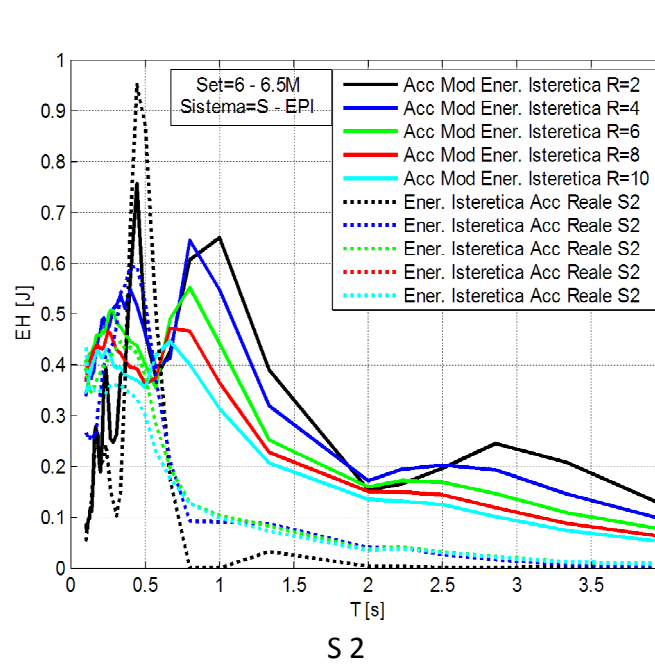
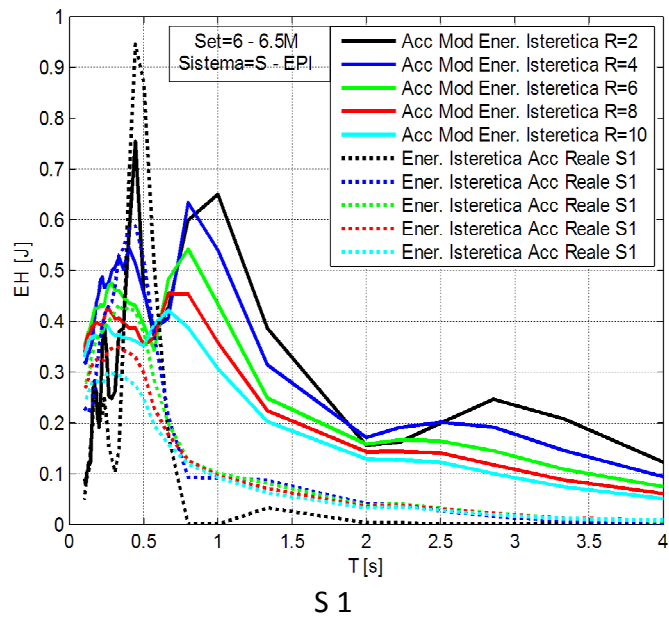
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.52 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificati e media dei generati)



Legame costitutivo EP INC

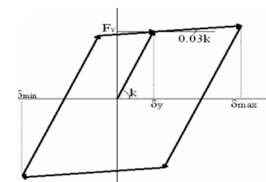
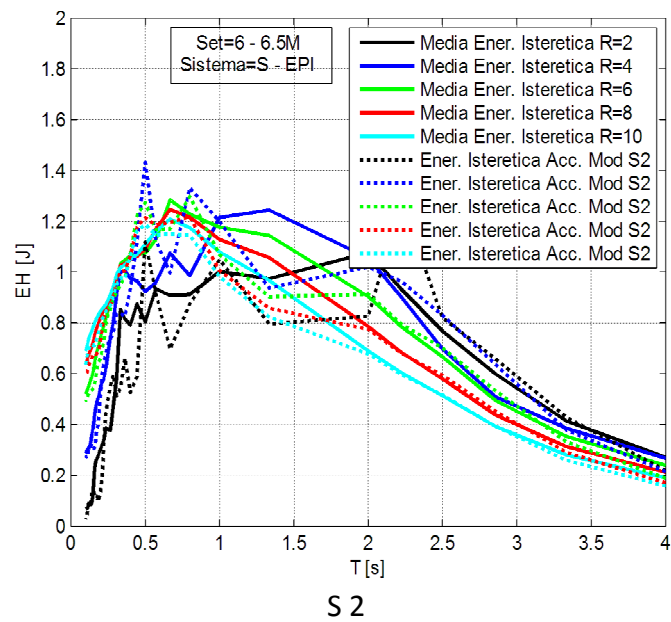
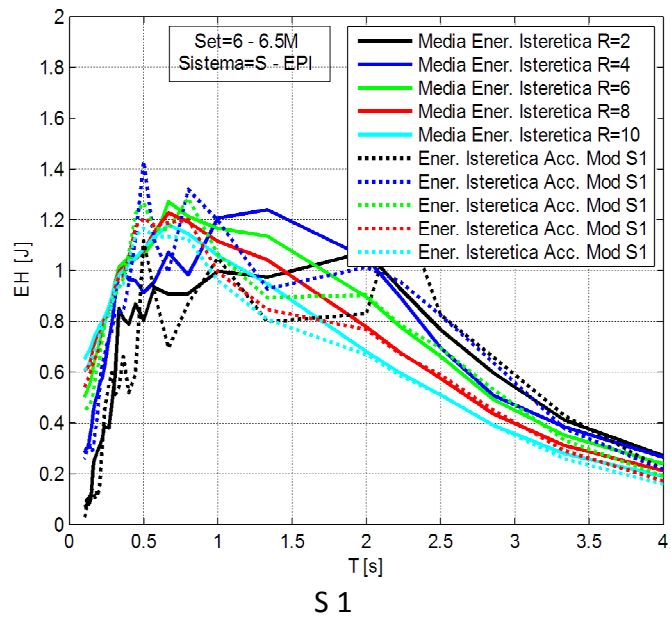
Figura 5.53 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (media modificati e naturali)



Legame costitutivo EP INC

Figura 5.54 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)

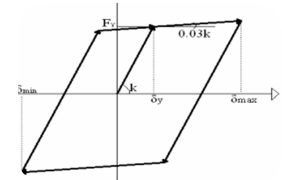
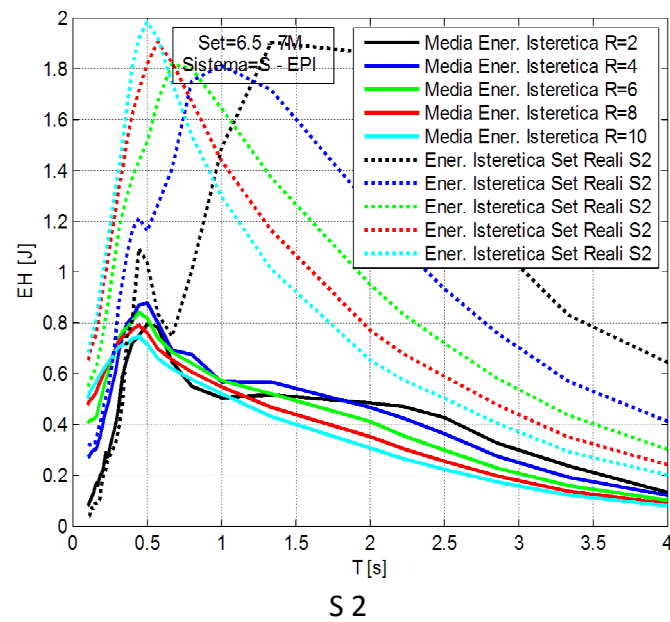
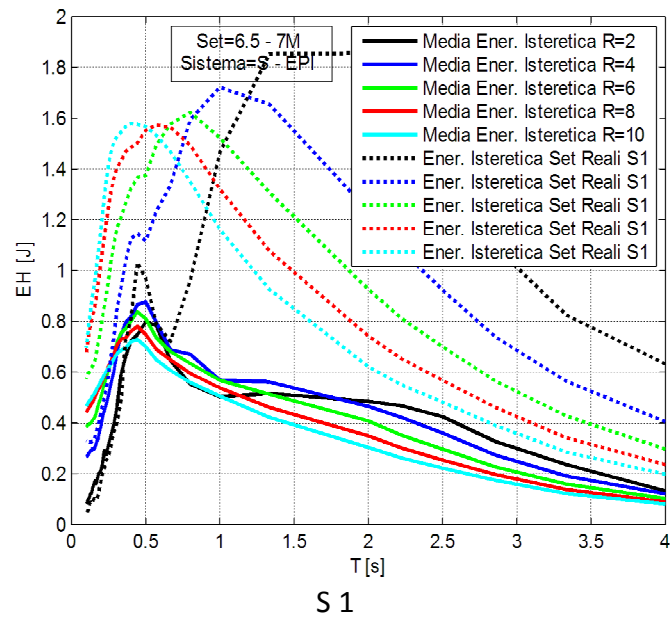
Nella Figura 5.58 si può osservare, come accadeva anche per il legame costitutivo Takeda, ma questa volta più accentuata, una sottostima dell'energia isteretiche che dissipa il sistema sotto l'azione del set di accelerogrammi modificati 6,5 – 7M, rispetto alla media degli spettri in energia per il set di naturali. Questa sottostima è più evidente per i valori all'incirca pari a  $T = 0.5s$ . Si può vedere però, nella Figura 5.59 che per il singolo accelerogramma Campano Lucano del set dei reali, la quantità di energia dissipata dal sistema con questo accelerogramma è leggermente più bassa rispetto all'accelerogramma modificato.



Legame costitutivo EP INC

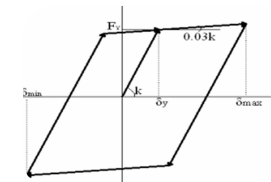
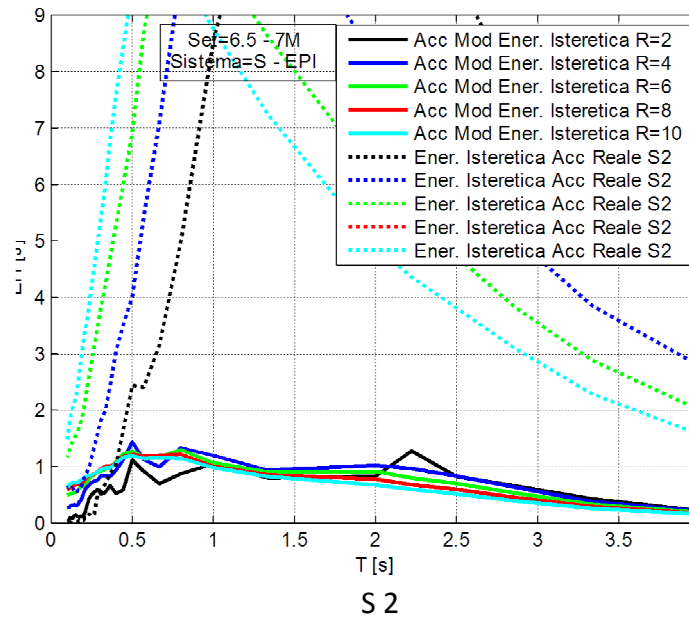
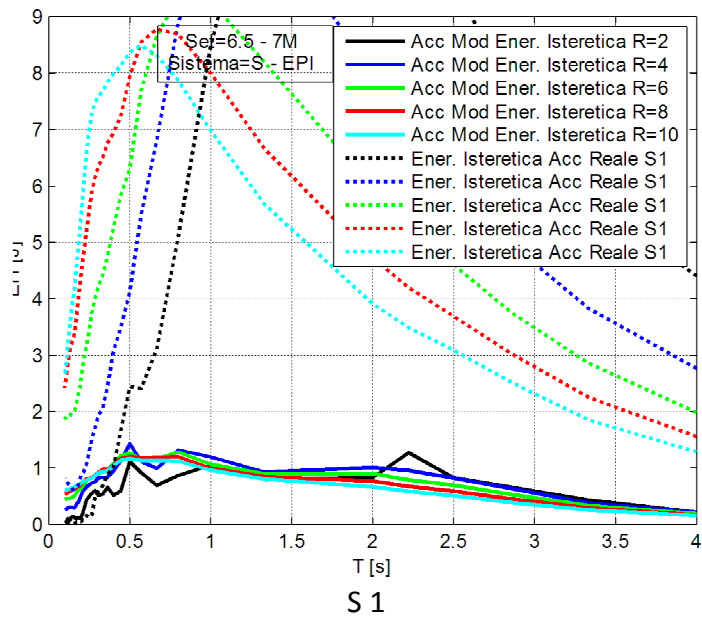
Figura 5.55 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificati e media dei generati)





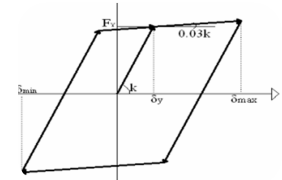
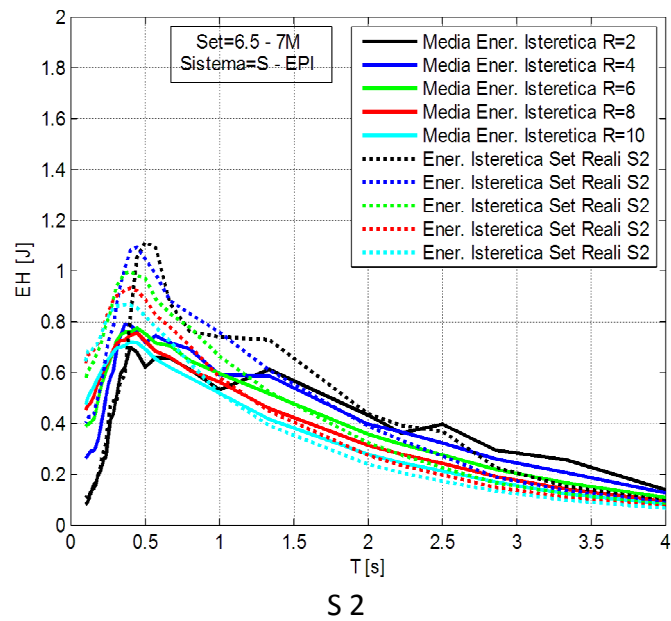
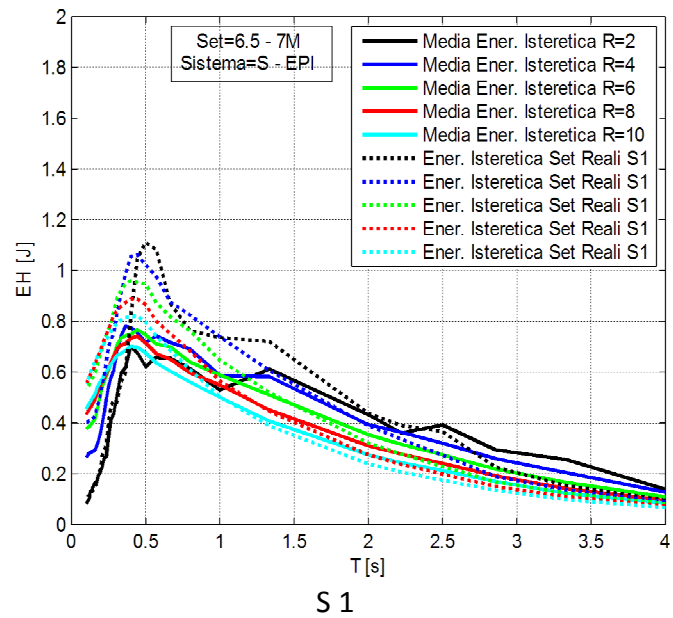
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.56 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano S (modificati e media dei generati)



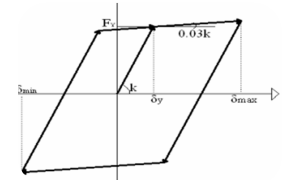
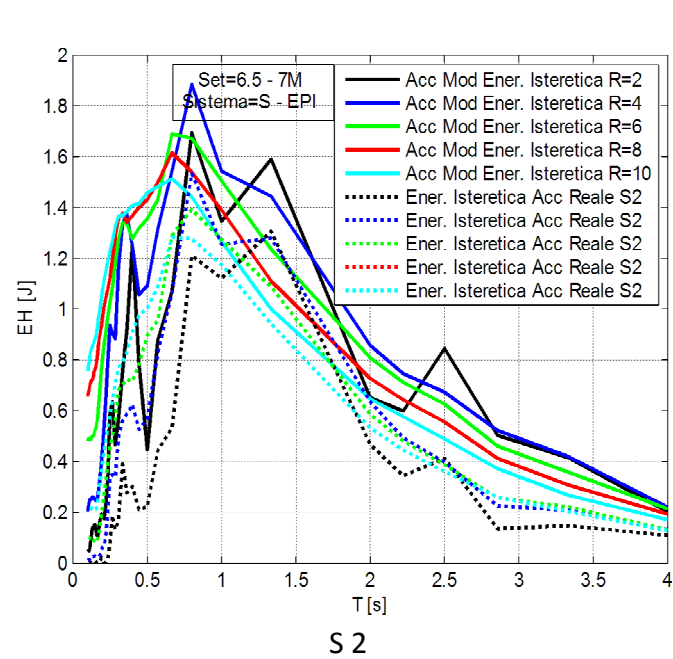
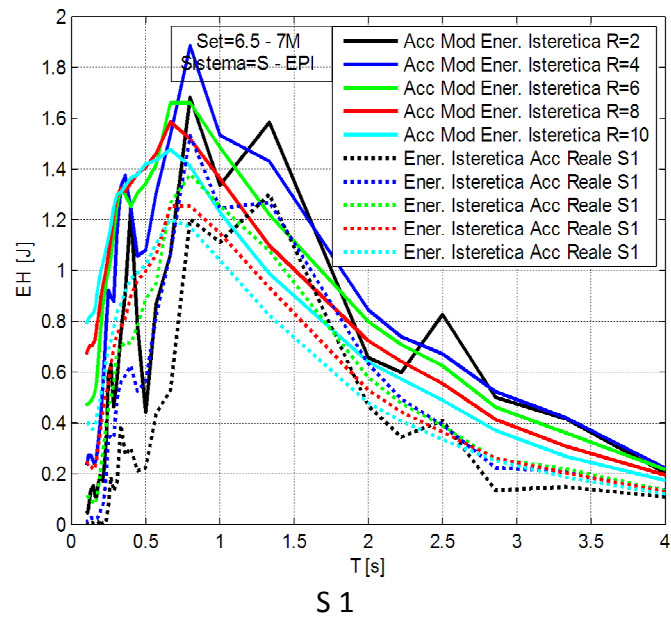
Legame costitutivo EP INC

Figura 5.57 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Scalato (modificato e naturale)



Legame costitutivo EP INC

Figura 5.58 Spettri in energia isteretica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano N (media modificati e generati)



Legame costitutivo EP INC

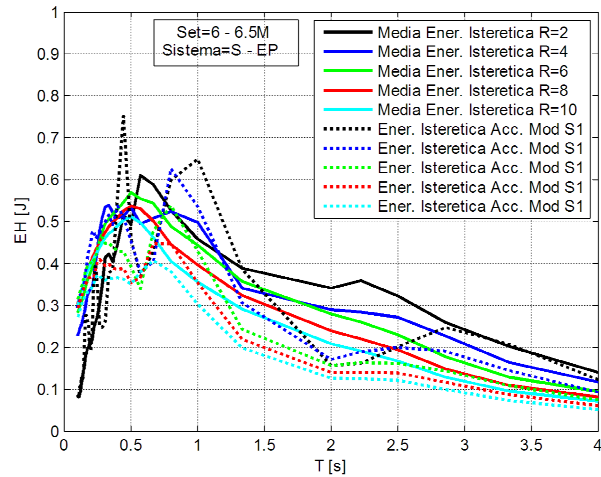
Figura 5.59 Spettri in duttilità ciclica, percentuale di incrudimento costante per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)

### 5.3.3 Legame costitutivo Elasto – Plastico Perfetto

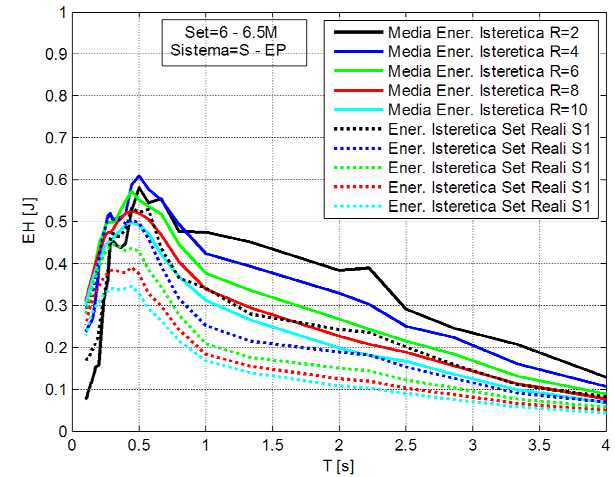
Nella Figura 5.60 vengono rappresentati gli spettri in energia isteretica per l'accelerogramma Friuli (AS), e per il set di accelerogrammi naturali 6 – 6,5M. Si può vedere come i risultati ottenuti hanno andamenti e valori molto simili a quelli ottenuti per il legame precedente, visto che nel confronto tra l'accelerogramma modificato e il set di 10 generati si presenta un scarto molto forte per il range di periodi  $T = 0,5 - 3s$ . soprattutto per i sistemi con duttilità molto bassa. Per quanto riguarda il set di modificati, messi a confronto con quelli naturali, si vede come i primi generano una sovrastima dell'energia dissipata dalla struttura per il set di accelerogrammi scelto. Questo accade praticamente per tutti i periodi del sistema. Si presenta anche il fatto che l'accelerogramma Friuli naturale non genera lo snervamento del sistema per il periodo tra 0.8 - 1s mentre per il set di modificati, nello stesso range di periodi si genera un picco dell'energia massima dissipata, casi che sono molto contrastanti per le condizioni del sistema.

Nella Figura 5.61 si presentano gli spettri in energia isteretica per l'accelerogramma Campano Lucano appartenente al set di Scalati 6,5 – 7M. Si osserva anche in questi grafici gli andamenti simili a quelli ottenuti per il legame costitutivo EP INC con le stesse variazioni molto alte per quanto riguarda al set di scalati e l'accelerogramma naturale scalato, rispetto a quelli modificati.

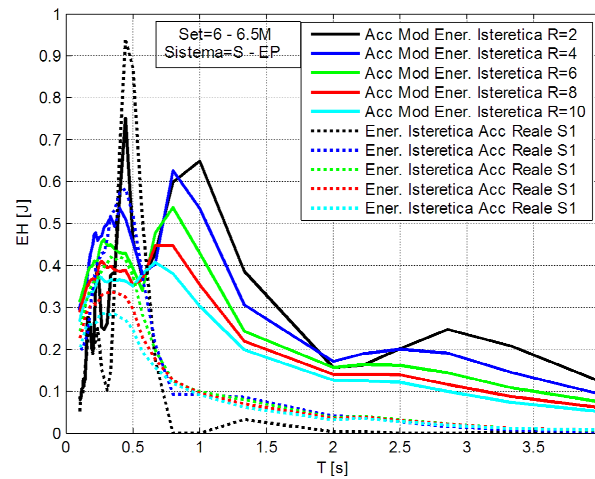
In Figura 5.62 invece, si mostrano i risultati per lo stesso accelerogramma di prima, ma appartenente al set di accelerogrammi naturali 6,5 – 7M. La differenza più grande rispetto ai risultati per il legame costitutivo EP INC, è che nel confronto tra l'accelerogramma modificato e quello naturali, per i fattori di duttilità  $R = 2, 4$ , si presenta un piccolo picco alla fine dello spettro per i range di periodi tra  $T = 2 - 3s$ . per l'accelerogramma naturale, e quindi si presenta una sottostima di questi valori da parte dei risultati ottenuto per l'accelerogramma modificato.



Acc Mod vs. Set acc. generati



Set modificati vs. Set reali

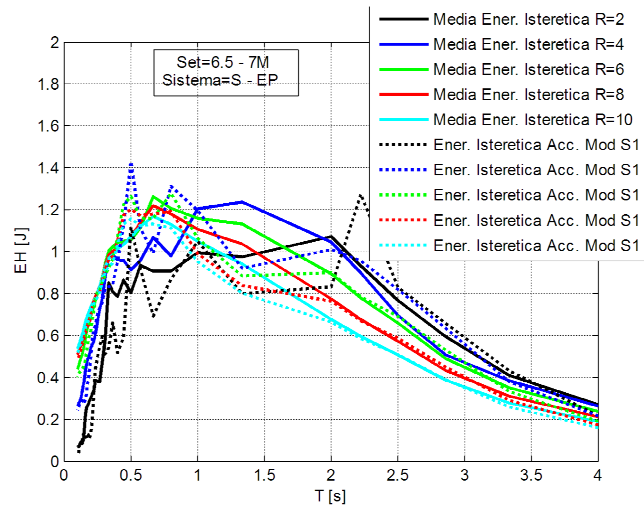


Acc mod vs. Acc reale

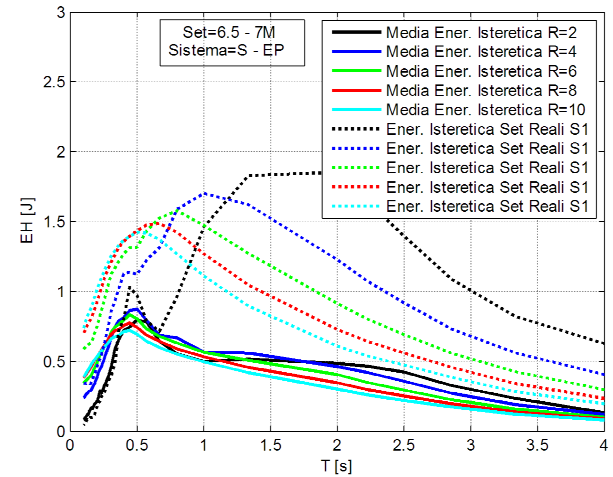


Legame costitutivo  
EP

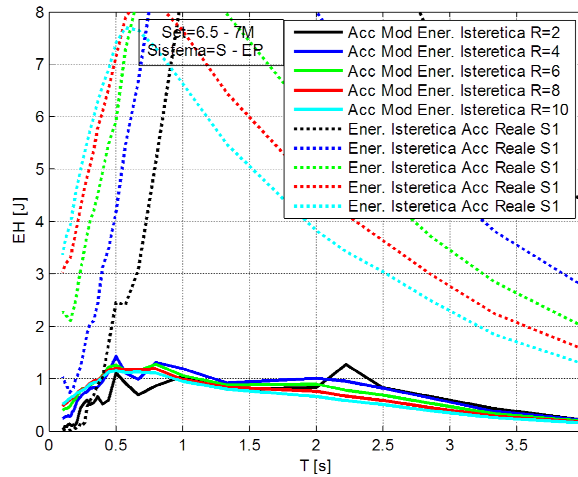
Figura 5.60 Spettri in energia isteretica per Acc. Friuli (AS)



Acc Mod vs. Set acc. generati



Set modificati vs. Set reali

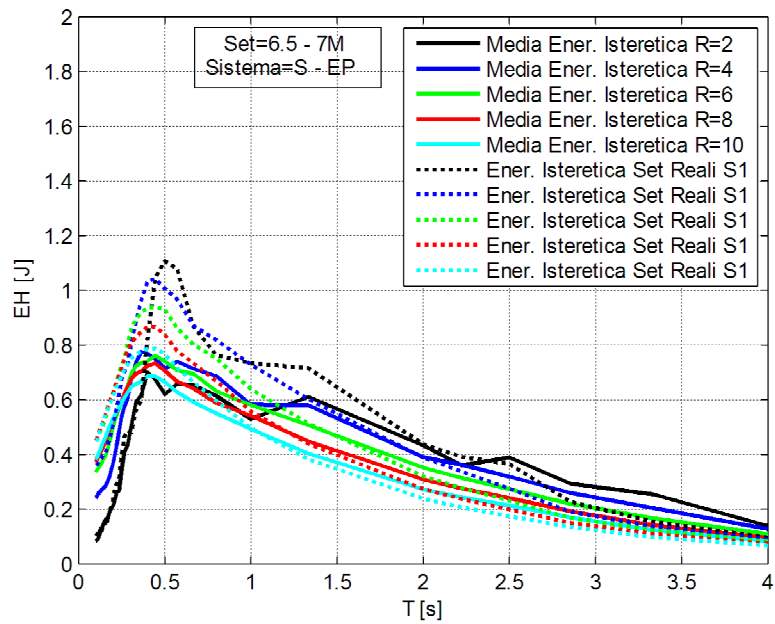


Acc mod vs. Acc reale

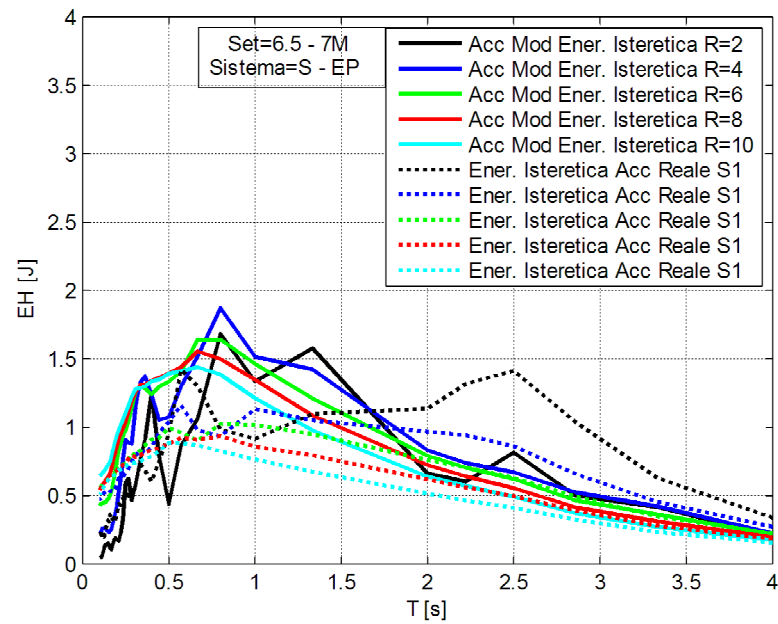


Legame costitutivo EP

Figura 5.61 Spettri in energia isteretica per Acc. Campano Lucano Scalato



Set modificati vs. Set reali



Acc mod vs. Acc reale



Legame costitutivo EP

Figura 5.62 Spettri in energia isteretica per Acc. Campano Lucano Naturale



## 5.4 Indice di Park - Ang

Si è visto che i parametri di misura del degrado della struttura sotto azione sismica definiti precedentemente, sono basati sia nel raggiungimento dello spostamento massimo raggiungibile dalla struttura in un'unica escursione nel campo elastico, oppure nel superamento di una soglia di energia dissipata dalla struttura.

Adesso però, si definisce l'indice di degrado di Park – Ang che mette insieme i due criteri per avere un parametro che serve, sia per i sistemi che collassano per un fatto di duttilità, sia per un fatto energetico. Questo indice viene definito come una combinazione lineare dello spostamento massimo e dell'energia dissipata (supposta che questa energia sia definita fondamentalmente dalla energia isteretica), secondo l'espressione seguente:

$$D_{PA} = \frac{\delta_{dem} - \delta_y}{\delta_{sup} - \delta_y} + \beta \frac{E_H}{F_y(\delta_{sup} - \delta_y)}$$

Dove:

$\delta_{dem}$  : spostamento massimo raggiunto dalla struttura in valore assoluto

$\delta_{sup}$  : spostamento massimo raggiungibile dalla struttura prima del collasso

$\delta_y$  : spostamento di snervamento

$F_y$  : forza di snervamento

$E_H$  : energia isteretica

$\beta$  : parametro di combinazione

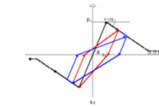
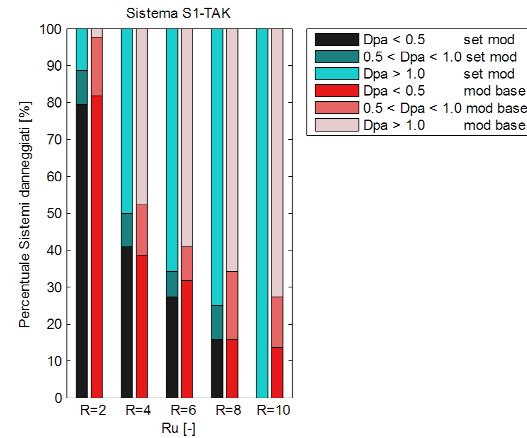
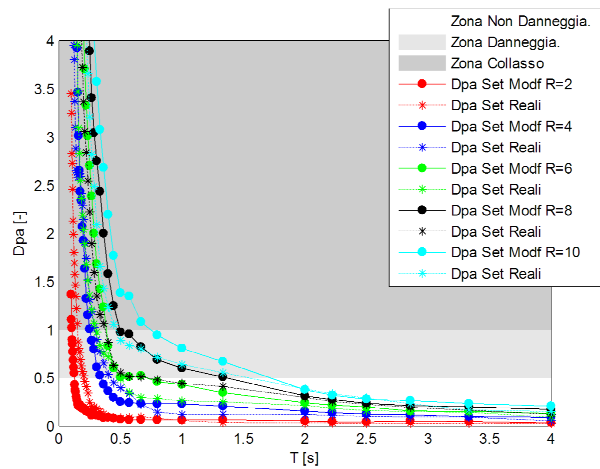
Il parametro  $\beta$  dipende dai valori di taglio e forze assiali di sezione e nell'ammontare totale di acciaio longitudinale e di confinamento su prove fatte da Park e Ang []. Questo parametro può prendere diversi valori in funzione dei parametri suddetti, e per lo scopo di questo lavoro di tesi si è scelto di fissarlo a 0.14. Questo indice però non tiene in considerazione la distribuzione vera dei cicli plastici, ma considera soltanto l'ammontare globale della energia dissipata.

Dalla relazione precedente si vede quindi, un primo termine che rappresenta la relazione tra la massima duttilità richiesta dalla struttura per resistere all'azione sismica, e la massima duttilità disponibile nella struttura in base allo spostamento di collasso della stessa. Il secondo termine tiene conto della energia dissipata dai cicli isteretici descritti dalla struttura, adimensionalizzata in funzione della forza di snervamento moltiplicata per la duttilità disponibile. Questi due termini vengono messi in combinazione lineare tramite il coefficiente  $\beta$ .

Nella Figura 5.63 si fa il confronto tra i valori degli indici di danneggiamento ottenuti per i set di accelerogrammi naturali e modificati 6,5 – 7M per i due sistemi più estremi per quanto riguarda le condizioni di resistenza della struttura. Quindi si prende in considerazione il sistema che ha un degrado delle sue condizioni di resistenze molto più attenuato, cioè, quello S1, e si prende dall'altra parte il sistema S4 che ha la percentuali di incrudimento più alta (-10%), quindi questo si danneggia più rapidamente. Come si è detto prima questo indice cerca di mettere insieme il fatto che la struttura può presentare due sistemi di collassi diversi, quello in duttilità e quello in energia. Quindi vedendo il grafico in alto più a sinistra, si evidenzia come l'andamento dei valori dell'indice di danneggiamento sia per il set di naturali, sia per il set di modificati, ha un andamento molto simili per entrambi i set.

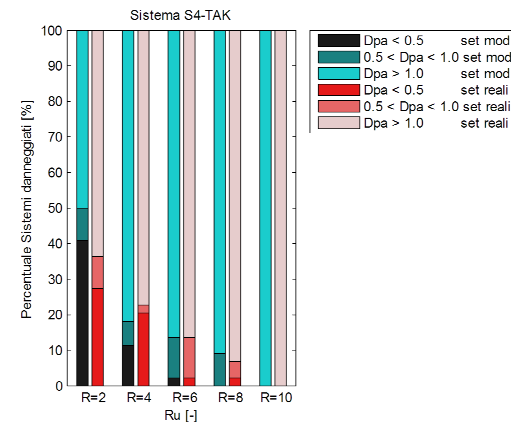
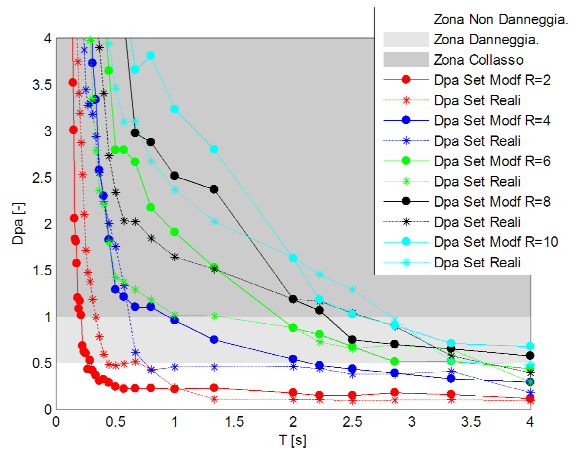
Dagli studi fatti da Park e Ang [ ] si sa che per un valore dell'indice di danneggiamento pari a 0,5 o comunque minore di questo, la struttura viene considerata come non danneggiata; per valori tra 0,5 e 1 si considera che la struttura è danneggiata ma non raggiunge il collasso, è finalmente per i valori pari o maggiori dell'unità la struttura si considera collassata. Con questo in mente si vede. Nel grafico superiore più a destra, che rappresenta la percentuale di strutture che sono collassate per quel set di accelerogrammi, si vede come per il set di modificati, che sarebbe quello identificato con verde, le strutture che presentano un fattore di duttilità pari a  $R = 2$  e che non sono state danneggiate raggiungono all'incirca il 10% di esse, e l'80% di esse sono rimaste danneggiate ma non al punto di essere irreparabili. Invece dall'altro lato si vede come le strutture con duttilità pari a 10, sempre sottoposte al set di modificati, tutte hanno subito il collasso. Dai valori ottenuti si vede anche che, confrontando questi risultati con quelli per il set di naturali si vede che, tranne per i sistemi a duttilità  $R = 10$ , le percentuali di sistemi che non sono collassate, in





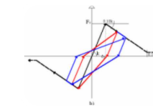
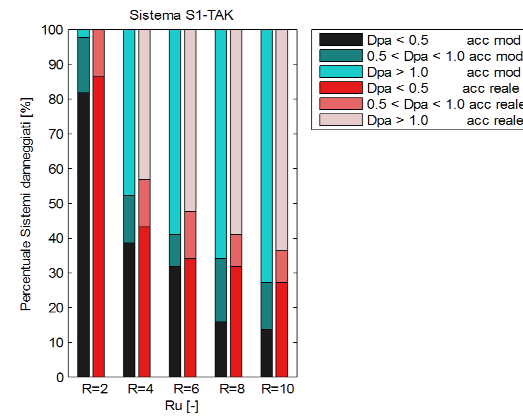
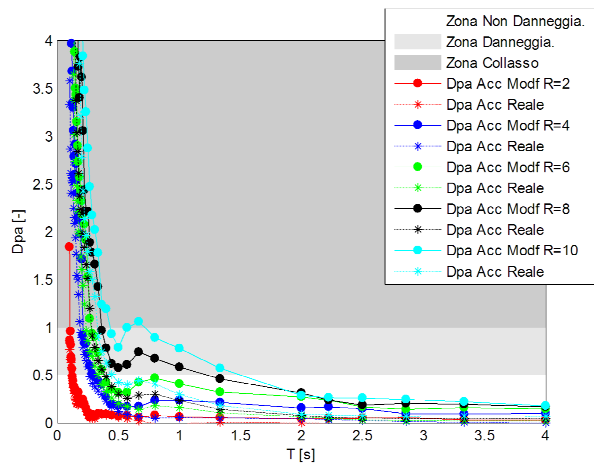
Legame  
costitutivo  
Takeda

Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S1 (%incrudimento = 2%) per Set 6 – 6,5M (media modificati e naturali)



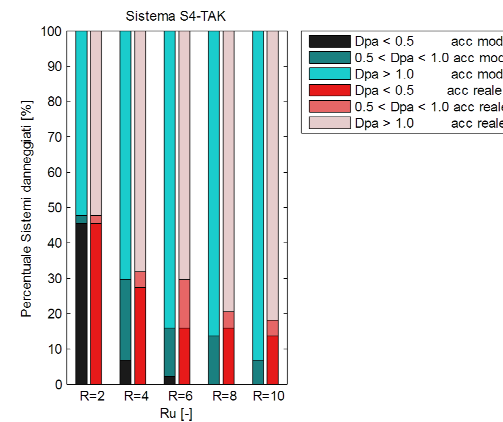
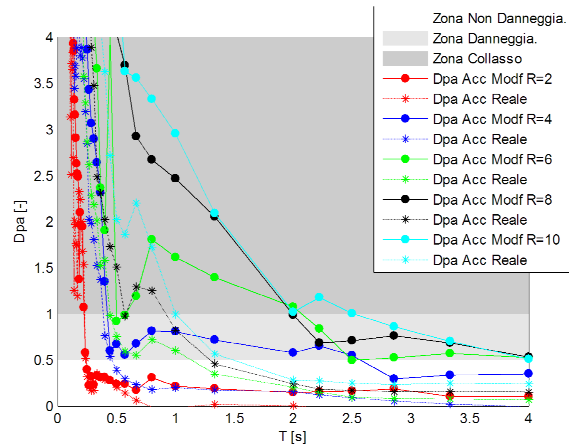
Legame  
costitutivo  
Takeda

Figura 5.63 Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S4 (%incrudimento = 10%) per Set 6 – 6,5M (media modificati e naturali)



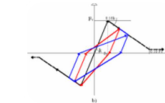
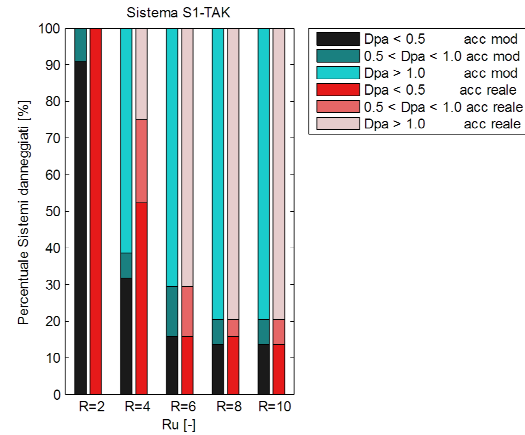
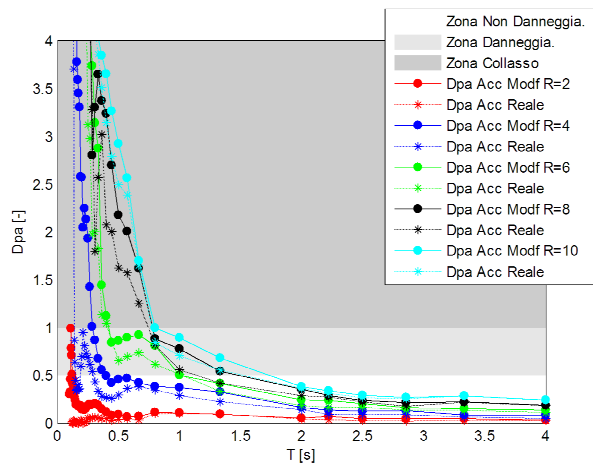
Legame  
costitutivo  
Takeda

Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S1 (%incrudimento = 2%) per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)



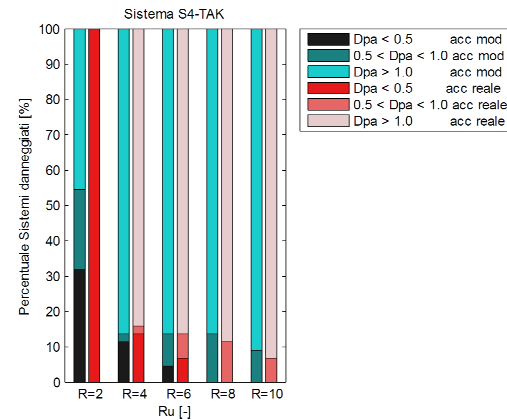
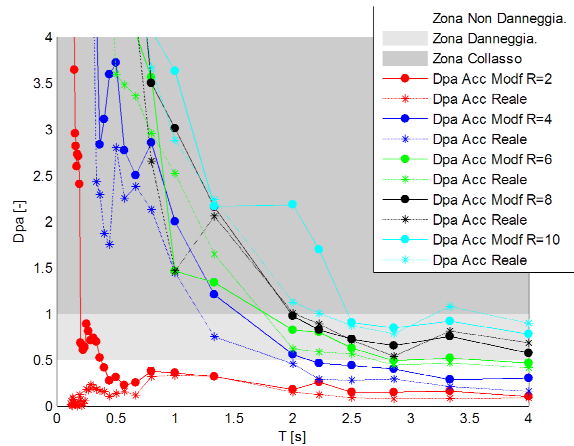
Legame  
costitutivo  
Takeda

Figura 5.64 Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S4 (%incrudimento = 10%) per Acc. Friuli (AS) (modificato e naturale)



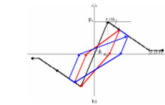
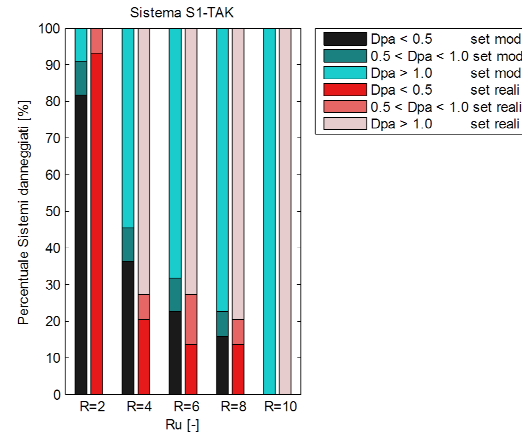
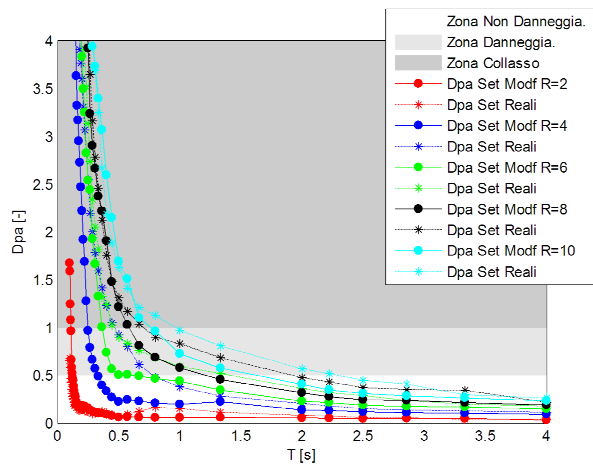
Legame  
costitutivo  
Takeda

Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S1 (%incrudimento = 2%) per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)



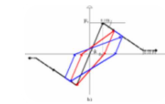
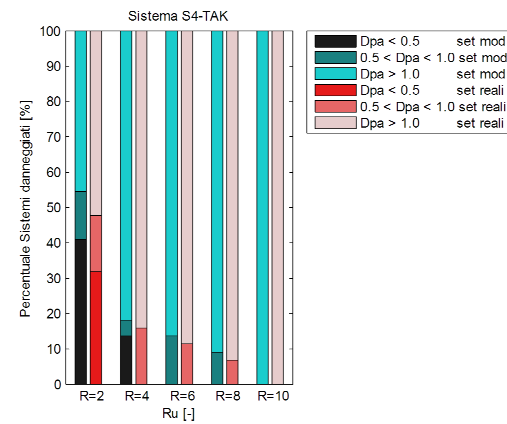
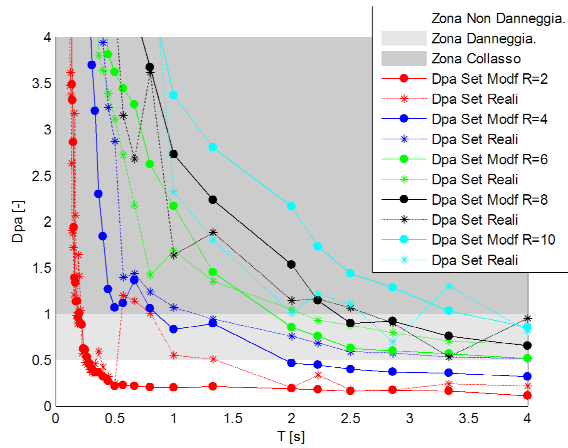
Legame  
costitutivo  
Takeda

Figura 5.65 Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S4 (%incrudimento = 10%) per Acc. Campano Lucano Naturale (modificato e naturale)



Legame  
costitutivo  
Takeda

Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S1 (%incrudimento = 2%) per Set 6,5 – 7M scalati (media modificati e naturali)



Legame  
costitutivo  
Takeda

Figura 5.66 Coefficienti di Danneggiamento. Sistema S4 (%incrudimento = 10%) per Set 6,5 – 7M scalati (media modificati e naturali)

linea di massima, sono praticamente le stesse, e quindi i modificati riproducono abbastanza bene l'intensità del set di naturali.

Nei grafici più in basso si vede però, che i sistemi che hanno raggiunto il collasso aumentano per tutte le duttilità di un valore all'incirca del 20%, ma questi risultati rispetto a quelli ottenuti per il set di modificati sono molto vicini. Andando a vedere però i due grafici più a sinistra si può evidenziare come, anche se la percentuale di sistemi danneggiati e sistemi collassati per tutti e due i set di accelerogrammi è molto simile, si osserva come il grado di danneggiamento delle strutture per il set di modificati è leggermente più alto rispetto agli accelerogrammi naturali in quasi tutti i sistemi considerati.

Andando a vedere i risultati per il singolo accelerogramma di Friuli (AS), rappresentati in Figura 5.64, si vede come nel grafico in alto a destra si mostra che la percentuale di sistemi danneggiati per il fattore di duttilità  $R = 2$  è nulla per l'accelerogramma naturale e quasi nulla per quello modificato. Per le altre duttilità la percentuale è via a via più bassa ma la differenza tra di loro è molto bassa (all'incirca 5 %). Poi però si vede nel grafico subito sotto che nel sistema S4, per l'accelerogramma naturale, la percentuale di sistemi danneggiati è arrivata al 50% variando rispetto al sistema S1 della stessa percentuale, mentre per gli altri sistemi varia solo di una percentuale all'incirca dell'10%. Questo mostra come questo accelerogramma si presenta più gravoso al momento di valutare la risposta in sistemi che hanno frequenze più alte. Le percentuali di sistemi danneggiati ma non collassati trova alcune differenze, soprattutto per i sistemi S4 dove si evidenzia, dal grafico in basso a sinistra, che quasi tutti i sistemi soggetti all'accelerogramma modificato presentano un grado di danneggiamento più alto rispetto a quelli soggetti a quello naturale.

Nella Figura 5.65 si presentano i risultati per l'accelerogramma Campano Lucano del set di naturali. Nei due grafici più a destra si può vedere che sia per il sistema S1, che quello S4, l'accelerogramma reale non riesce a danneggiare la struttura per un fattore di duttilità  $R = 2$ . Poi si vede che per i sistemi con duttilità  $R = 6, 8$  e  $10$  si presenta un danneggiamento molto pronunciato rispetto agli altri sistemi con duttilità minori. Il danneggiamento però, per quanto riguarda l'accelerogramma modificato, si presenta una grande differenza tra quello che sarebbe il danneggiamento con l'accelerogramma reale e il primo, vedendosi come si danneggiano molto di più i sistemi con duttilità pari a  $R = 4$ . Quindi



la modifica comporta quindi una sopravvalutazione dell'effetto dell'accelerogramma sui sistemi a duttilità intermedia. Passando al grafico di sotto a sinistra si vede che le strutture con duttilità  $R = 2$  vengono danneggiate di tanto con l'accelerogramma modificato, rispetto a quelle soggette all'accelerogramma naturale che rimangono non danneggiate in tutti i casi. Si vede quindi che queste modifiche portano delle variazioni relativamente forti per i sistemi più rigidi, ma per quelli più flessibili il danneggiamento sembra essere molto ben approssimato. Comunque dal grafico sotto a sinistra si vede che lo scarto tra gli indici di danneggiamento per entrambi gli accelerogrammi è relativamente grande con una sovrastima per il caso dell'accelerogramma modificato.

Per ultimo, nel grafico di Figura 5.66 si presenta il confronto degli indici di Park e Ang per il set di scalati e quello dei modificati. Dai due grafici più a destra si può osservare come il danneggiamento per tutti i casi di duttilità sia praticamente uguale, e si vede dalla percentuale di sistemi collassati. I risultati per i set di scalati sono un po' più alti rispetto a quelli per il set di modificati, e si vede anche dall'andamento che presentano gli indici di danneggiamento nei due grafici più a sinistra, dove i valori di danneggiamento per il set di scalati sono quasi sempre più alti rispetto a quelli per il set modificati.

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è visto come la scelta del modo in cui viene rappresentata l'azione sismica per la valutazione delle risposte di una qualsiasi struttura non sia un problema molto semplice. Anzi, si riscontrano delle difficoltà vista l'aleatorietà del processo che definisce la suddetta azione.

Nella normativa italiana, e in quella europea, vengono prestabiliti dei parametri che permettono di identificare meglio l'intensità e la forma dell'azione che suppone un movimento sismica. Questi parametri però, possono essere determinati con delle metodologie che possono differire di molto, sia nel modo in cui questi parametri vengono ottenuti, sia anche nei risultati che si riscontrano nella risposta della struttura sottoposta ad una azione definita in modo o nell'altro. È per questo che si è fatto un confronto delle diverse metodologie che permettono di definire l'accelerazione del terreno in esame, in modo tale da valutare quali siano i pregi e gli svantaggi di esse.

Tra le metodologie di generazione di accelerogrammi per definire l'azione sismica sono state scelte, quella definita dal programma REXEL che genera set di accelerogrammi, sia reali, che scalati, in media spettro – compatibili, e quella definita dal metodo Proposto da Cecini, che apporta delle modifiche ai singoli accelerogrammi perché essi rispettino la spettro – compatibilità nei range di valori definiti dalla normativa italiana NTC 2008.

È stato fatto quindi il confronto delle risposte strutturali ottenute da un'analisi non linear di una struttura, al variare delle sue proprietà di rigidità e di resistenza, e si sono presentati i risultati illustrati nella sezione precedente.

Da questi risultati possiamo concludere quindi che:

- In linea di massima, per quanto riguarda il confronto della risposta strutturale che si ottiene quando la struttura viene sottoposta all'azione di accelerogrammi definiti con le modifiche apportate dal metodo di Cecini, e quella

ottenuta da accelerogrammi naturali, si vede come la prima tende ad essere di solito più alta, il che rappresenta un sopravvalutazione della risposta. Si vede come, sia per accelerogrammi di tipo impulsivi (il caso di Friuli (AS)), sia quelli a lunga durata (Campano Lucano), gli accelerogrammi modificati sollecitano la struttura in modo tale che i suoi valori di risposta in duttilità ed energia isteretica dissipata siano leggermente più alti rispetto a quelli che si ottengono con gli accelerogrammi naturali.

- Si vede però che, dall'altra parte la risposta media della struttura, al set di accelerogrammi modificati, sia in tutti i casi praticamente uguale a quella che si ottiene con il set di accelerogrammi naturali, soprattutto per quanto riguarda la duttilità richiesta, mentre che nei valori di energia isteretica si riscontrino dei risultati leggermente più alti, il che significa che questi accelerogrammi modificati tendono ad aumentare non solo l'intensità delle registrazioni reali, ma anche il suo contributo energetico.
- I risultati più interessanti sono quelli dell'indice di Park e Ang che permettono di concludere che, nel caso del confronto accelerogramma reale vs. accelerogramma modificato, il fatto di raggiungere la spettro compatibilità per una singola realizzazione, fa in modo tale che l'accelerogramma abbia dei contributi in frequenza che gli permettano di danneggiare delle strutture che, sottoposte all'accelerogramma naturale, non risulterebbero danneggiate dopo il sisma. Questo permette quindi vedere come l'azione sismica deva essere definita da un gruppo di realizzazioni che rispettino la spettro - compatibilità, piuttosto che la risposta di una singola realizzazione.
- Per ultimo, dalle tre metodologie analizzate, e in base a i risultati riscontrati in questo lavoro, si può concludere che, la metodologia che sopravvaluta di più la risposta strutturale è quella dei set scalati linearmente, questo perché, le forme spettrali ottenute in questo modo non tengono conto della variazione dell'intensità dell'azione sismica al variare del contributo in frequenze. Comunque, anche se le variazioni per le singole realizzazioni hanno degli scarti molto grandi, per quanto riguarda il set di accelerogrammi, la risposta ottenuta, in media, è molto simile rispetto a quella generata con le due metodologie previamente discusse.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Cecini D. A proposal method for generation of spectrum - compatible accelerogram. Msc Tesis. Università degli studi di Roma la Sapienza. Roma. 2011

[2] Esposito M. Accelerogrammi Spettrocompatibili per la Progettazione delle Strutture: Valutazione Comparativa della Risposta Sismica. Università degli studi di Napoli Federico II. Napoli 2009

[3] Bommer, J. J., and Acevedo, A. B., 2004. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, (special issue No. 1), 43-91.

[4] Cosenza E. and Manfredi G. [2000]. "Damage Indices and Damage Measures". *Prog. Struct. Engng. Mater*, 2, pp. 50–59.

[5] EUROCODE 8 [2003], Design for structures for earthquakes resistance – Part 1 – General rules, seismic actions and rules for buildings, Final Draft – prEN 1998-1, December.

[6] Iervolino I., e Cornell C.A., 2005. Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, Vol.21,No.3, pp 685-713.

[7] Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC), D.M. del 14/01/2008, pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 con Supplemento Ordinario n. 30;