



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio di metodologie innovative di prova e di integrazione tra
prove di tipo e metodo analitico per le qualifiche ambientali,
meccaniche, sismiche ed elettromagnetiche di componenti e sistemi
per le centrali nucleari

Parte I: qualifica sismica di SSC nucleari

R. Lo Frano, G. Forasassi



STUDIO DI METODOLOGIE INNOVATIVE DI PROVA E DI INTEGRAZIONE TRA PROVE DI TIPO E METODO ANALITICO PER LE QUALIFICHE AMBIENTALI, MECCANICHE, SISMICHE ED ELETTROMAGNETICHE DI COMPONENTI E SISTEMI PER LE CENTRALI NUCLEARI.
PARTE I: QUALIFICA SISMICA DI SSC NUCLEARI

R. Lo Frano, G. Forasassi – Università di Pisa

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare

UNIVERSITA' DI PISA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione

**Studio di metodologie innovative di prova e di integrazione tra
prove di tipo e metodo analitico per le qualifiche ambientali,
meccaniche, sismiche ed elettromagnetiche di componenti e
sistemi per le centrali nucleari**

Parte I : qualifica sismica di SSC nucleari

CERSE-UNIPI RL 1089/2011

Autori

R. Lo Frano, G. Forasassi

Pisa, Agosto 2011

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP5 punto D
AdP MSE - ENEA "Ricerca di Sistema Elettrico" - PAR2008-09
Progetto 1.3 – "Nuovo Nucleare da Fissione".

Contenuti

Lista delle Figure	2
Lista delle Tabelle	3
Nomenclatura	4
Parte I	5
1. Introduzione	6
2. Metodologia generale di qualifica sismica	9
2.1 Modello Numerico	10
2.1.2 Analisi di sensibilità del modello	13
2.2 Input Sismico	16
3. Analisi Dinamica	22
3.1 Comportamento Modale	22
3.2 Risposta della struttura a sisma: Analisi del transitorio dinamico	25
4. Risultati numerici	29
5. Confronto dei risultati Numerici vs. Sperimentali	38
5.1 Risultati numerici vs. dati accelerometrici	38
5.2 Risultati numerici vs. dati 3D-Vision	41
6. Conclusioni	45
7. Bibliografia	47

Lista delle Figure

Figura 1 – Schema del telaio in scala.....	11
Figura 2 – Modello 3D del telaio in scala	12
Figura 3 – Modello A semplificato del telaio in scala.....	13
Figura 4 – Modello B raffinato del telaio in scala	15
Figura 5 – Andamento delle accelerazioni al 100% registrati terremoto L’Aquila.....	17
Figura 6 – Andamento delle accelerazioni terremoto Nat 1.....	18
Figura 7 – Andamento delle accelerazioni terremoto Nat 2.....	19
Figura 8 – Andamento delle accelerazioni terremoto Aterno	20
Figura 9 – Andamento delle accelerazioni terremoto Pettino.....	21
Figura 10 – Frequenze e modi propri modello B.....	24
Figura 11 – Frequenze e modi propri modello A.....	25
Figura 12 – Indicazione schematica posizioni accelerometri	26
Figura 13 – Indicazione schematica posizioni marker	27
Figura 14 – Schema sistema 3D vision: posizione delle telecamere	28
Figura 15 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Aterno	31
Figura 16 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Nat1	33
Figura 17 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Nat2.....	35
Figura 18 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Pettino	37
Figura 19 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 3° livello del telaio indotte dal sisma Nat2	39
Figura 20 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 5° livello del telaio indotte dal sisma Nat2	40
Figura 21 – Distribuzione dell’errore relativo alle accelerazioni (3° livello del telaio).....	40
Figura 22 – Distribuzione dell’errore relativo alle accelerazioni (5° livello del telaio).....	41
Figura 23 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 3° livello del telaio indotte dal sisma Nat2	42
Figura 24 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 5° livello del telaio indotte dal sisma Nat2	43
Figura 25 – Confronto fra i valori di accelerazioni acquisiti da 3D-Vision nelle posizioni	43

Figure 26 – Distribuzione dell'errore relativo alle accelerazioni (3° livello del telaio).....44
Figure 27 – Distribuzione dell'errore relativo alle accelerazioni (5° livello del telaio).....44

Lista delle Tabelle

Tabella 1 – Frequenze proprie22

Nomenclatura

ASME	American Society of Mechanical Engineers
DOF	Degree of freedom
FEM	Finite Element Method
Apk	Acceleration peak

Parte I

1. Introduzione

Il nucleare rappresenta una delle risorse energetiche del futuro, pertanto, garantire l'affidabilità degli impianti nucleari attualmente in esercizio è essenziale per garantire un mix energetico europeo con garanzia di una fornitura di energia di base costante e continuativa ed al tempo la necessaria accettazione informata da parte della popolazione.

La produzione di energia da fonte elettro-nucleare è strettamente correlata e condizionata dall'uso di sistemi, componenti e strutture (SSCs) capaci di garantire adeguati livelli di sicurezza e qualità. Tali sistemi e strutture devono soddisfare dei requisiti per i quali si richiede una specifica fase di qualificazione completa e trasparente e, ove possibile, basata su un approccio sperimentale ed analitico integrato.

Il processo di qualificazione nucleare è, infatti, uno dei principi cardine della progettazione e realizzazione delle centrali nucleari, questo processo, generalmente si sviluppa sottoponendo i componenti e sistemi ad un complesso sistema di analisi teoriche e numeriche comprendenti prove sperimentali realizzate in laboratorio, su prototipi in piena scala o in scala ridotta. I risultati di questo approccio semplice sono successivamente utilizzati per definire le specifiche di progetto del componente stesso da utilizzare in una centrale nucleare.

Come accennato una fase importante di tale processo si articola in una serie programmatica di test sperimentali necessari per assicurare e dimostrare che le strutture, i sistemi ed i componenti, che verranno utilizzate nella costruzione di un impianto nucleare, si comporteranno in modo soddisfacente sia in caso di normale funzionamento che in caso di malfunzionamento operativo ovvero in caso di incidente.

Per quanto attiene quest'ultimo aspetto, è importante sottolineare che proprio in condizioni incidentali i SCCs rilevanti per la sicurezza devono garantire un elevato grado di affidabilità per permettere all'impianto di assolvere alle funzioni per cui è stato progettato ed evitare che l'evoluzione di tali scenari possa causare un danneggiamento dell'impianto ed in particolare a fusione del nocciolo ed una possibile fuoriuscita di materiale radioattivo nell'ambiente.

Per poter definire correttamente i requisiti di qualificazione per i SCCs, occorre identificare l'area dell'impianto nucleare all'interno della quale il componente è chiamato ad operare. In generale una centrale elettronucleare può essere suddivisa in quattro zone:

ZONA 1: la parte prettamente nucleare che include il nocciolo del reattore, i suoi sistemi di controllo e tutto ciò che viene a contatto con il core stesso compreso la struttura di supporto.

ZONA 2: comprende il sistema di raffreddamento o circuito primario, il sistema di contenimento e la maggior parte dei sistemi e componenti racchiusi all'interno del sistema di contenimento.

ZONA 3: include gli edifici turbina ed ausiliari ad eccezione dei sistemi di emergenze e di allagamento del nocciolo (ECCS).

ZONA 4: Comprende tutti gli altri sistemi non nucleari.

Le norme vigenti per la qualificazione componenti e sistemi includono:

- ASME Section III Classes 1, 2 and 3 nuclear systems
- ASME Section II
- CSA N285 nuclear components
- CSA B51 pressure vessels and pressure piping
- ANSI B31 pressure piping
- CSA C22.1, 2 & 3 Electrical systems code
- IEEE Electrical systems code
- ASME Section IX Welding and Brazing qualifications
- ASME XI
- ISO Quality assurance 9000 or 10000 series
- CSA Z-299 Quality assurance

Tuttavia, sebbene i requisiti dei vari codici o normative nazionali o internazionali possano variare fra loro nel contenuto, essendo esse stesse dipendenti dal progetto dell'impianto in esame, le linee guida indicate dalle ASME sez. III si possono considerare una base comune per definire il livello generale di qualificazione per i SCCs, che sono:

- ASME sez. III Classe 1 - per sistemi, componenti e strutture in Zona 1. Comprende pompe, valvole, vessel, tubazioni ecc. destinati a funzionare entro i requisiti di sicurezza previsti per il sistema nucleare.

- ASME sez. III Classe 2 - per sistemi, componenti e strutture in Zona 2; un esempio tipico è rappresentato dalle tubazioni con valvole che attraversano il sistema di contenimento.
- ASME sez. III Classe 3 - per sistemi, componenti e strutture in Zona 3.
- ASME sez. III Classe 4 - per sistemi, componenti e strutture in Zona 4.

Infine è importante sottolineare che le prove di qualificazione, in ottemperanza alle norme suddette ed alle altre normative nazionali vigenti, comprendono prove di caratterizzazione meccanica, sismica, ambientale ed elettromagnetica da eseguirsi utilizzando le prove di tipo.

Tale metodo, che ha lo scopo precipuo di verificare la conformità di un dato tipo di SCC alle prescrizioni normative, è quello caratterizzato dal minor livello di incertezza. Esso si basa sul confronto fra i dati acquisiti attraverso un'adeguata strumentazione di misura (in generale tarata e qualificata), che ad esempio nel caso di qualificazione sismica potrebbe essere il sistema 3D Vision, o un sistema di misura di accelerazione e spostamento, prove sperimentali su uno o più esemplari in piena scala (prototipi) o eventualmente in scala ridotta, con le stesse caratteristiche del componente nucleare da qualificare.

Il presente documento si articola in due parti che si riferiscono principalmente alla qualifica sismica (Parte I) e elettromagnetica (Parte II).

La parte I si concentra sulla messa a punto e validazione di una metodologia numerico - sperimentale capace di simulare il comportamento dinamico (modale e di transitorio) delle strutture reali sotto l'azione dei carichi sismici, consentendo anche con la validazione dei modelli numerici di cui si prevede l'impiego per calcoli di pre e post test.

La parte II, invece, (riportata nel doc. CERSE POLITO RL 1300/2011) si focalizza sugli aspetti della qualifica e compatibilità elettromagnetica di strumentazione e sistemi destinati all'impiego in ambiente specifico nucleare.

2. Metodologia generale di qualifica sismica

In sintesi per quanto riguarda le prove dinamiche ed ambientali il processo di qualificazione prevede l'esecuzione di prove termiche, meccaniche di resistenza, sismiche, di vibrazione (per le strutture più complesse), di caduta e urti (per componenti e sistemi) secondo le menzionate normative nazionali ed internazionali vigenti.

In particolare la qualifica sismica è uno degli aspetti più importanti da considerare per la progettazione, realizzazione ed esercizio dei componenti e sistemi nucleari, in particolare in classe sismica secondo ASME, in relazione agli effetti strutturali, quali cedimenti, danneggiamenti ecc., che le sollecitazioni dinamiche indotte da un tipo di evento esterno naturale non predicibile come il terremoto, possono causare sulle SCCs considerate.

Il presente studio riguarda in particolare la caratterizzazione del comportamento dinamico di componenti, anche simili fra loro per geometria e tipologia nelle condizioni dinamiche prevedibili in relazione alla sismicità e caratteristiche del sito.

Allo scopo si propone (ed è stata messa a punto) una metodologia deterministica, basata su un'adeguata modellazione numerica agli elementi finiti di una struttura reale, soggetta all'azione dei carichi sismici, e sulla sua successiva convalida sperimentale realizzata mediante il confronto fra i dati numerici e quelli ottenuti da prove eseguite su tavola vibrante (queste ultime prove sono di fondamentale importanza per una corretta comprensione del reale comportamento dinamico delle strutture).

La metodologia di qualificazione/estensione dei risultati delle prove utilizzata può essere schematicamente suddivisa secondo le seguenti fasi:

- a. Modellazione di un sistema semplice, quale ad es. un telaio a sviluppo verticale¹;
- b. Implementazione di tale modello in un adeguato codice agli elementi finiti, quale MSC.MARC© a ANSYS© o altri adeguati codici strutturali qualificati;
- c. Determinazione delle caratteristiche dinamiche modali (frequenze, modi propri della struttura);

¹ Il telaio, preso in esame e descritto nel capitolo seguente, che è già stato sottoposto da ENEA ad una estesa campagna di prove su tavola vibrante ha avuto lo scopo di valutare sia l'utilità pratica che l'applicabilità della metodologia.

- d. Analisi della risposta dinamica della struttura assoggettata ad uno o più sismi di riferimento;
- e. Analisi di sensibilità dei modelli implementati al variare di alcuni dati geometrici / funzionali
- f. Analisi critica dei risultati numerici;
- g. Confronto dei risultati numerici con quelli sperimentali al fine di convalidare la metodologia di analisi utilizzata ed individuarne eventuali limiti di applicabilità.

In quanto segue verrà descritta l'applicazione della metodologia suddetta. Naturalmente la procedura più razionale avrebbe dovuto prevedere due tipi di analisi (casi):

- a) analisi di “pre-test” che avrebbe consentito in modo preliminare al progetto delle esperienze di effettuare la valutazione generale dei risultati.
- b) Analisi “post-test” che avrebbe consentito la messa a punto conclusiva della metodologia e di effettuare la valutazione finale dei risultati.

Essendo stata anticipata la fase sperimentale, in questo lavoro è stato possibile effettuare solo la seconda fase successiva con i risultati noti descritti nel seguito.

2.1 Modello Numerico

Ai fini del presente studio è stata eseguita un'analisi del comportamento dinamico di un telaio in acciaio a sviluppo verticale (avente altezza complessiva pari a 4.5 m), in scala ridotta, rappresentato in Fig. 1.

Tale telaio è caratterizzato da 5 livelli/solai di calcestruzzo gettato su un grigliato solidale agli elementi della struttura con le seguenti dimensioni geometriche²:

1. Dimensioni in pianta 0.6x0.6 m;
2. Interasse tra i livelli pari a 0.9 m;

² Le dimensioni geometriche del telaio a sviluppo verticale sono state fornite da ENEA per poter conseguire in particolare lo scopo della validazione e qualificazione del sistema 3D-Vision.

3. Spessore di ogni solaio pari a 0.1 m;
4. Strutture portanti (colonne) di acciaio di tipo tubolare di 0.4x0.4 m e spessore 0.004 m.
5. Massa aggiunta per piano pari a 360 Kg per i primi 4 piani e di 260 per l'ultimo.

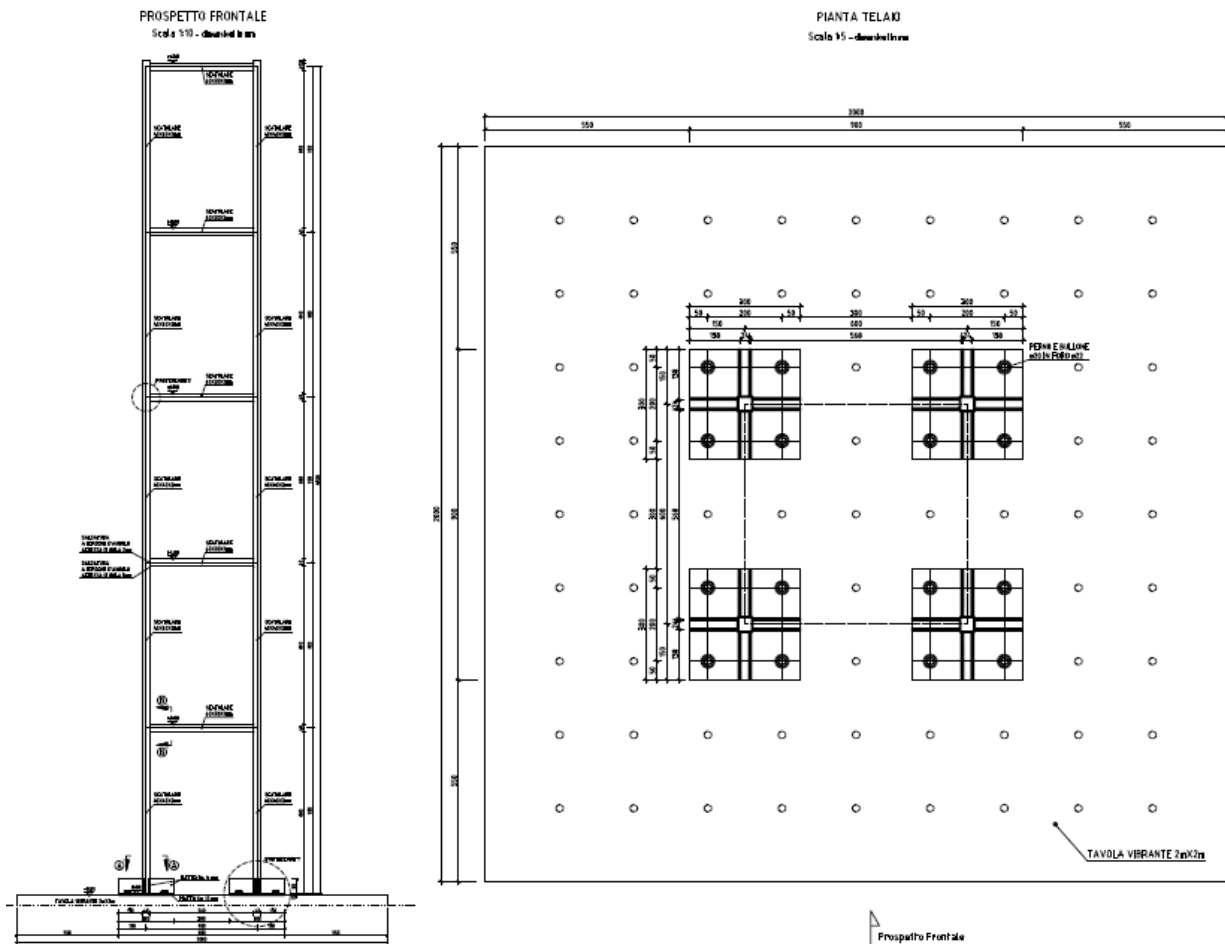


Figura 1 – Schema del telaio in scala

Sulla base della geometria suddetta e delle proprietà dei materiali strutturali (acciaio e calcestruzzo) che lo costituiscono, è stato realizzato un adeguato modello FEM (Fig. 2) che tiene conto anche delle masse aggiuntive, rappresentative dei sovraccarichi accidentali e della “massa artificiale” applicata (conservazione della massa).

Tali masse sono state opportunamente applicate in corrispondenza dei rispettivi solai sotto forma di “piastre/blocchi” di adeguato spessore.

La possibile distorsione dei risultati che potrebbe essere introdotta da tali masse aggiuntive è da considerarsi inessenziale data la simmetria della struttura ed il tipo di vincolo fra il telaio e le suddette masse (che possono essere considerate semplicemente appoggiate sui solai stessi).

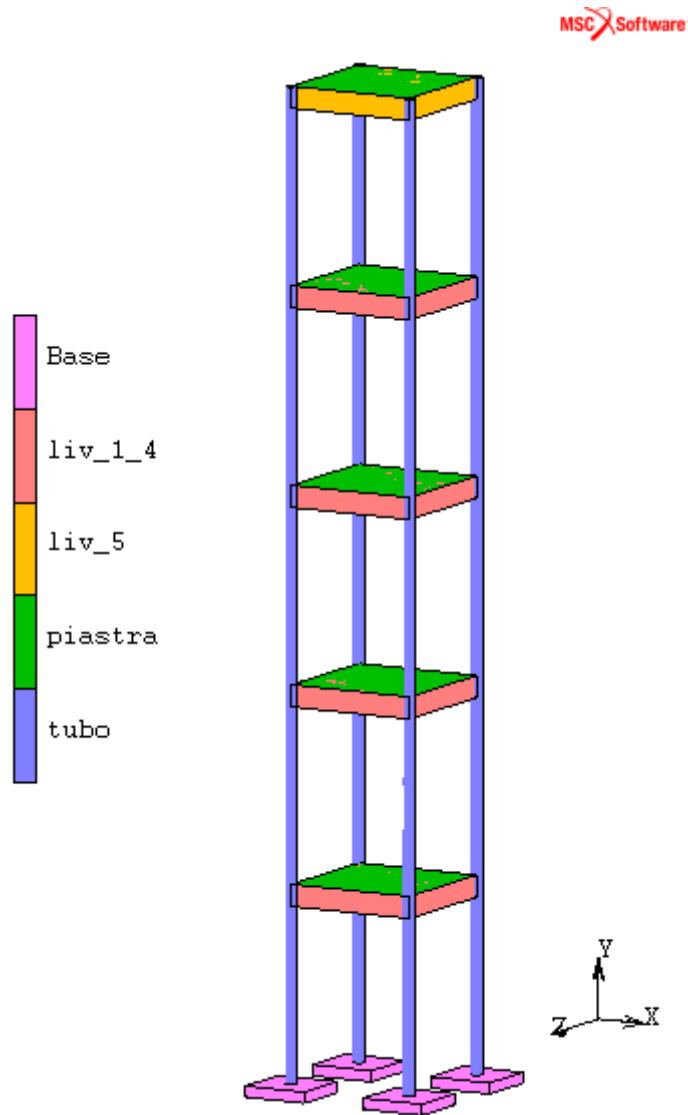


Figura 2 – Modello 3D del telaio in scala

Il primo passo per una corretta implementazione della metodologia proposta è stato la modellazione del telaio in esame con uno dei codici agli elementi finiti citati in precedenza (nel caso specifico l'MSC.MARC).

2.1.2 Analisi di sensibilità del modello

La correttezza e la sensibilità del modello e l'influenza delle tipologia e dimensioni degli elementi scelti per la modellazione è stata valutata attraverso il confronto del comportamento modale di un modello semplificato e di uno più raffinato (Figure 3 e 4) in termini di tipo, dimensione e numero di elementi.

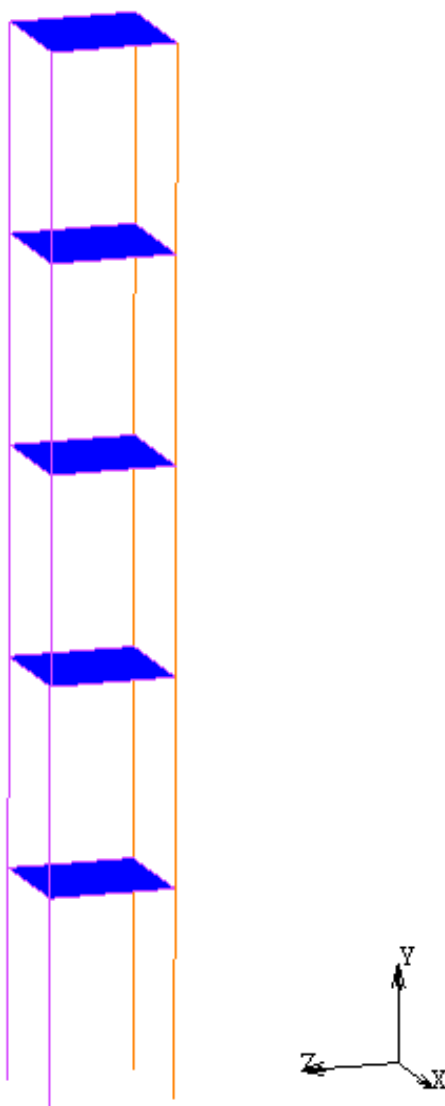


Figura 3 – Modello A semplificato del telaio in scala

Il modello A è stato realizzato rappresentando la struttura del telaio ridotta in scala con parametri geometrici (ad esempio la sezione degli elementi tubolari quadrati) e proprietà dei materiali (ad esempio la densità omogeneizzata) equivalenti a quelli effettivi.

Nel modello A “semplificato” (Fig. 3) sono state implementate le strutture tubolari in acciaio, a sezione quadrata, utilizzando elementi “Structural Solid 3D-section Beam” ed i solai mediante elementi bidimensionali di tipo “3D-Shell”.

L’elemento “Structural Solid 3D-section Beam” è stato scelto poiché permette di rappresentare pienamente gli effetti indotti dal taglio e di simulare il comportamento non lineare del profilato inserendo direttamente la sua sezione trasversale.

L’elemento 3D-Shell, scelto per rappresentare i solai, è un elemento tipo guscio spesso che attraverso l’interpolazione bilineare, permette di calcolare gli spostamenti e le rotazioni, nei vari punti di interesse.

Le tensioni indotte dal taglio possono essere calcolate al centro dell’elemento e in corrispondenza dei punti di integrazione intermedia (definiti attraverso il numero di piani intermedi in cui lo spessore dell’elemento è suddiviso).

L’elemento, inoltre, è relativamente insensibile alla distorsione, soprattutto se i nodi angolari giacciono sullo stesso piano.

Infine è importante sottolineare che le relazioni costitutive possono essere utilizzate per caratterizzare il comportamento dinamico della struttura implementata con questo elemento.

Il modello B (Fig. 4) rappresenta, invece, in modo molto più dettagliato la struttura di riferimento: tale modello è stato realizzato utilizzando circa 10000 elementi e 940000 nodi.

Le travi tubolari a sez. quadrata sono state implementate utilizzando elementi 3D-Shell, mentre i solai sono stati modellati utilizzando elementi di tipo solido isoparametrico e esaedrico, quale l’elemento Hex 8, avente otto punti di integrazione, oltre ai caratteristici otto nodi, e tre gradi di libertà per nodo. Inoltre tale elemento permette di controllare automaticamente la variazione dello spessore in corrispondenza di punti di transizione quali quelli che si hanno fra elementi guscio e solidi.

Le masse aggiuntive applicate a ciascun solaio sono state rappresentate con elementi bidimensionali aventi spessore e densità equivalenti tali da approssimarle nel modo migliore.

Per quanto concerne l’elemento di tipo 3D-Shell, valgono le stesse considerazioni fatte in precedenza; mentre l’elemento isoparametrico esaedrico 3D-Solid è caratterizzato da otto nodi

esterni oltre quelli di integrazione intermedia che permettono di rappresentare meglio il comportamento a taglio.

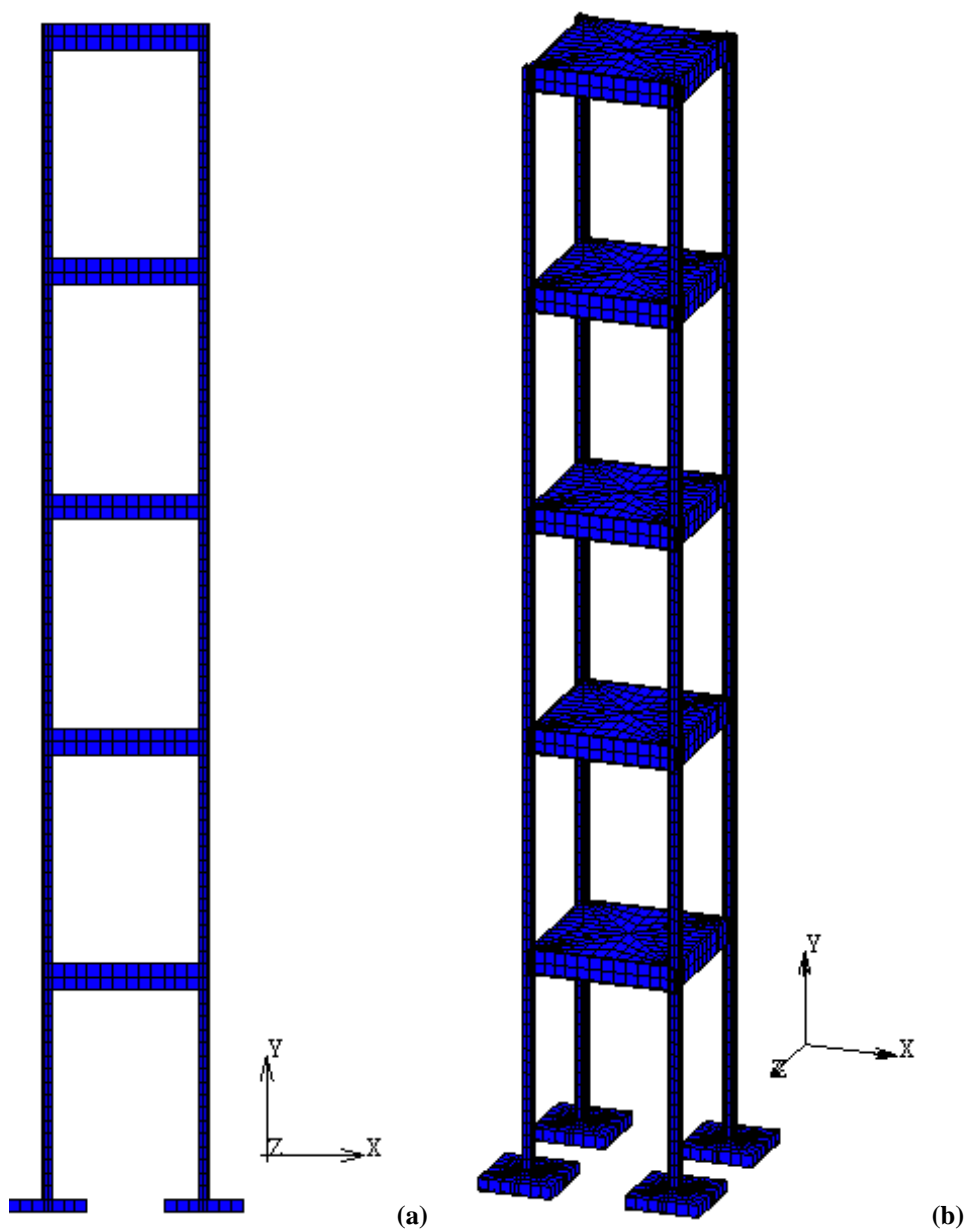


Figura 4 – Modello B raffinato del telaio in scala

I risultati ottenuti dalle analisi modali (frequenze proprie) hanno evidenziato una buona correlazione fra i risultati ottenuti con i due tipi di modelli, sebbene in corrispondenza di alcuni modi flessionali l'errore percentuale del modello A, valutato in base alla discrepanza fra le frequenze proprie (indicati in tabella 1, cfr. par.3.1) dei due modelli, raggiunga circa il 18%: si

può dedurre, quindi, che il modello B riuscendo a simulare anche il comportamento flessionale del “sistema telaio” permette di rappresentare in modo più realistico la risposta dinamica a sisma la struttura di riferimento.

2.2 Input Sismico

La risposta dinamica-strutturale di una struttura soggetta all’azione di un terremoto dipende, come noto, dalle caratteristiche dell’azione sismica stessa definita dai suoi parametri principali (frequenze, spettro di risposta, accelerazioni). Pertanto per rappresentare in modo realistico gli effetti di un terremoto è necessario disporre di modelli e di idonei codici di calcolo nonché degli andamenti al suolo dei suddetti parametri principali ed in particolare delle accelerazioni indotte dal sisma.

Per conseguire gli obiettivi della qualifica del sistema 3D Vision, è stato studiato il comportamento dinamico del telaio proposto per le esperienze eseguite nel laboratorio dell’ENEA c/o Casaccia, utilizzando il metodo della “Time History”.

Tale metodo consiste nell’applicare al modello, simultaneamente oppure separatamente, le tre componenti (tra loro perpendicolari e statisticamente indipendenti) delle accelerazioni del sisma al suolo in funzione del tempo, in un dato sito secondo quanto definito dalla normativa internazionale di riferimento.

I diagrammi o Time History delle accelerazioni utilizzate nel presente studio, sia per le simulazioni numeriche che per le prove sperimentali condotte sulla tavola vibrante del laboratorio ENEA, si riferiscono a sismi naturali. Effettivamente gli accelerogrammi naturali impiegati rappresentano, infatti, il modo più immediato di caratterizzare l’azione sismica al suolo in quanto derivanti dall’elaborazione di dati registrati; tali accelerazioni contengono, quindi, di per sé le caratteristiche tipiche del terremoto, quali l’ampiezza, il contenuto di frequenze e energia, la durata ecc..

Inoltre, gli accelerogrammi utilizzati suddetti fanno riferimento sia a dati registrati (quelli di Pettino e Valle Aterno) che spettro-compatibili" tratti dal data base “strong motion” (Nat 1 e 2) opportunamente scalati da ENEA al 30 %.

A tal proposito, in Fig. 5, sono riportati gli andamenti delle accelerazioni al 100% del terremoto dell’Aquila 2009 registrati dalla stazione V. Aterno-Centro valle³: tali valori adeguatamente

³ Andamenti delle accelerazioni messi a disposizione dal “Center for Engineering Strong-Motion Data”.

riparametrati al 30%, come precedentemente detto, rappresentano due degli input utilizzati per studiare il comportamento dinamico del telaio rappresentato nella precedente figura 4.

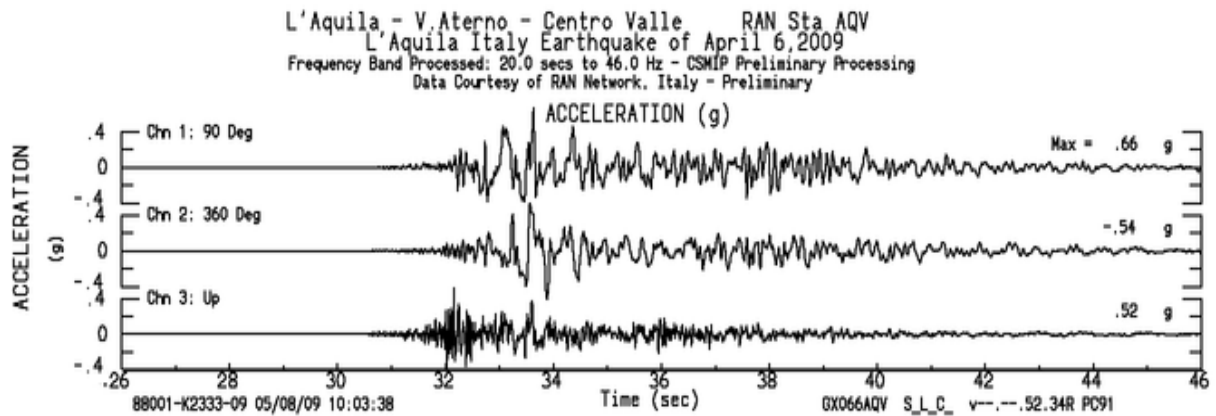
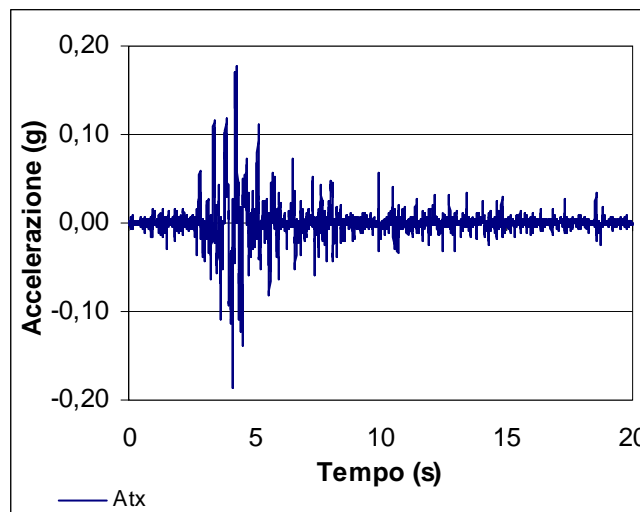


Figura 5 – Andamento delle accelerazioni al 100% registrati terremoto L'Aquila

Nelle seguenti figure 6, 7, 8 e 9 sono riportati gli andamenti temporali delle accelerazioni, rappresentative dei sismi Nat 1, Nat 2, Aterno e Pettino, nelle tre componenti x, y, z (trasversale e longitudinale, verticale z) ed aventi durata pari a 20 s.



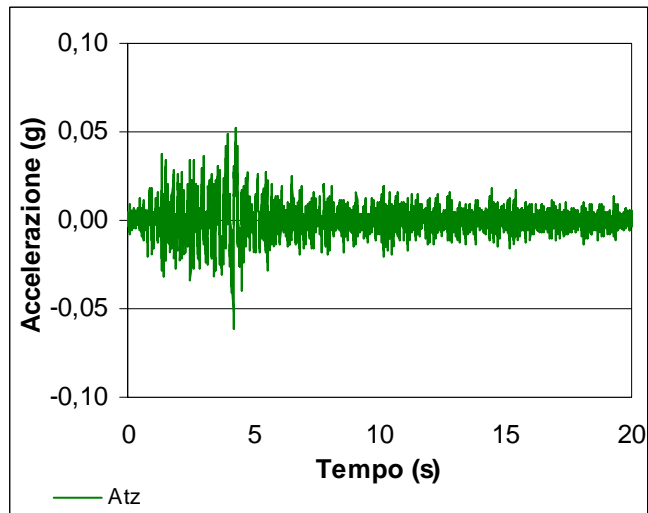
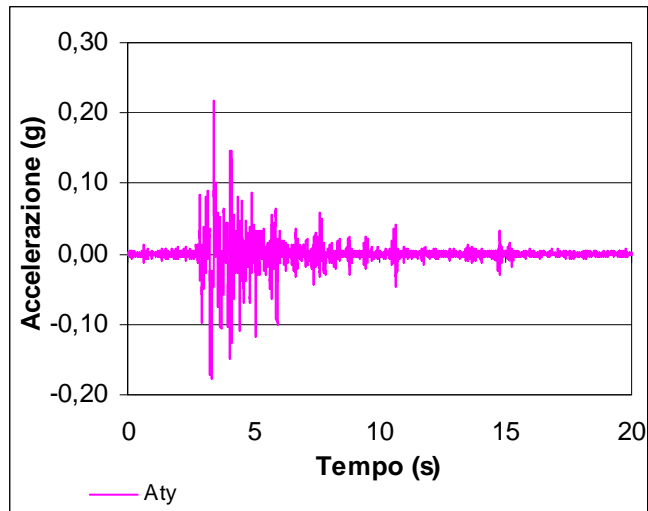
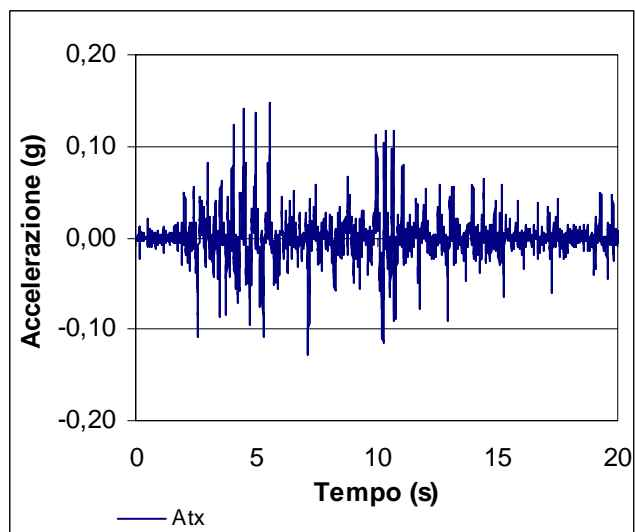


Figura 6 – Andamento delle accelerazioni terremoto Nat 1



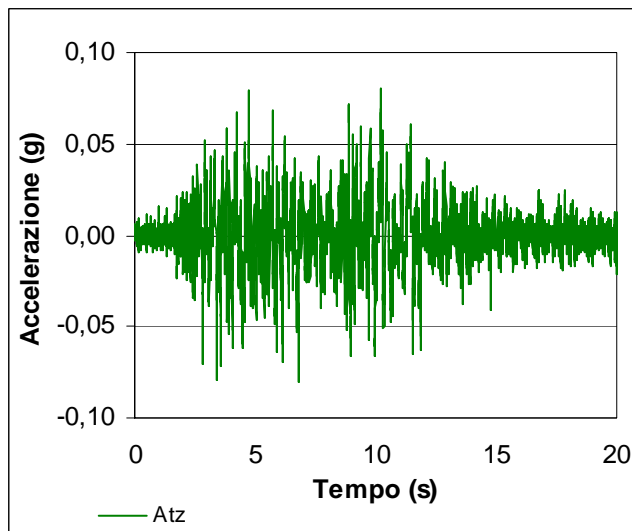
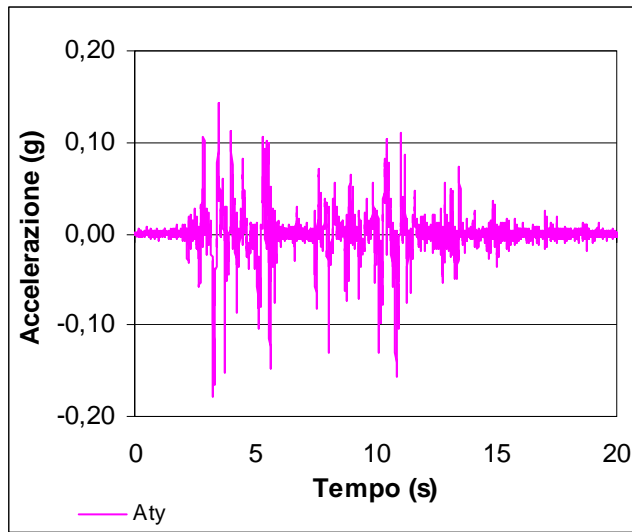
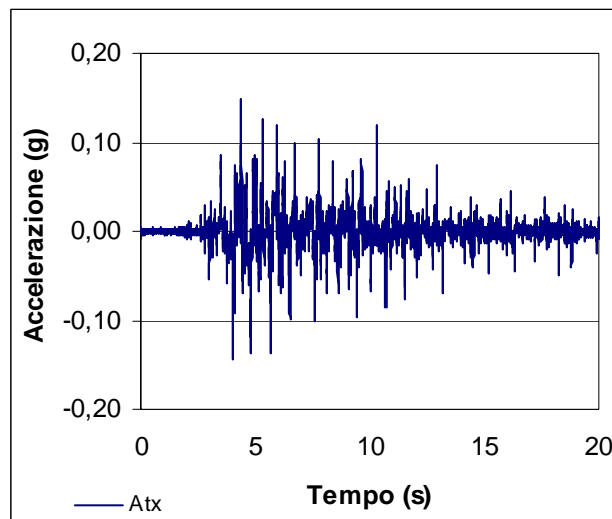


Figura 7 – Andamento delle accelerazioni terremoto Nat 2



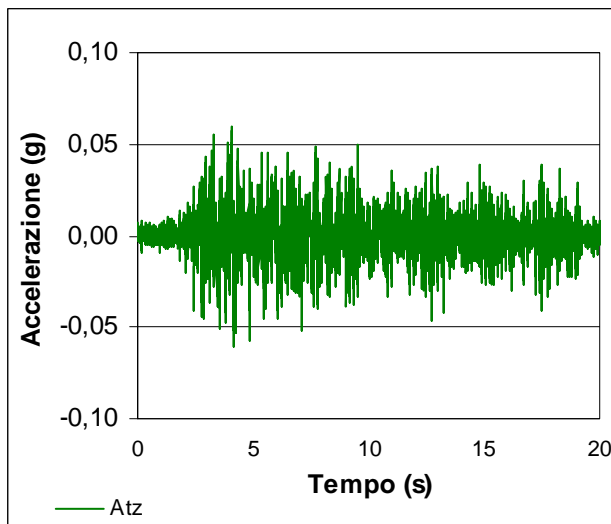
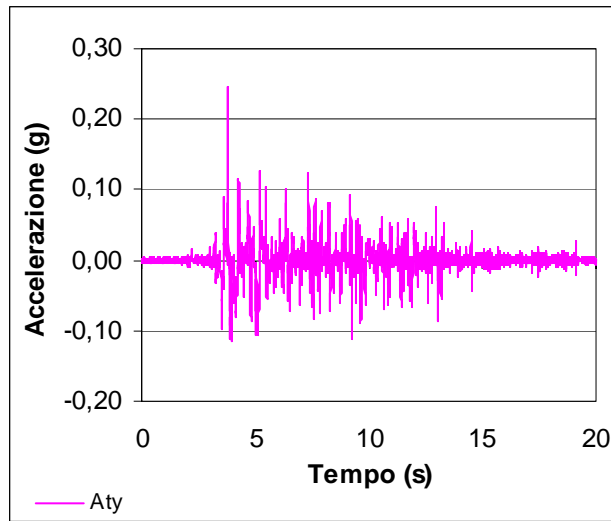
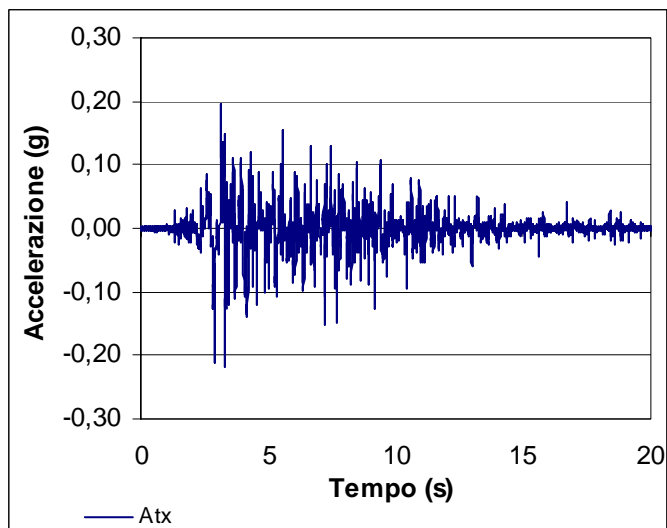


Figura 8 – Andamento delle accelerazioni terremoto Aterno



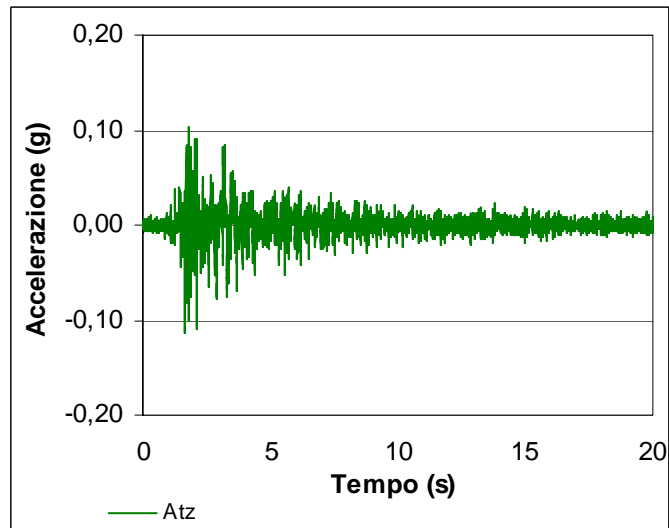
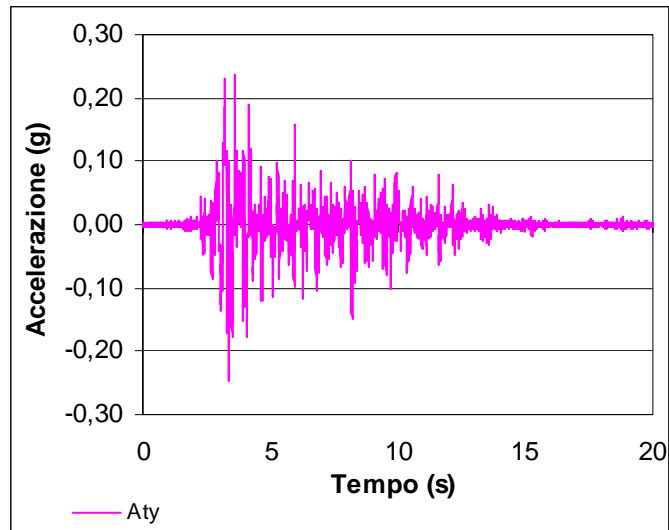


Figura 9 – Andamento delle accelerazioni terremoto Pettino

3. Analisi Dinamica

Come già accennato, per analizzare il comportamento dinamico-strutturale di strutture e/o sistemi complessi o non lineari sottoposti a carichi sismici attualmente si fa uso del metodo agli elementi finiti.

L'attendibilità dei risultati che si possono ottenere con questo tipo di modellazione dipende dalle ipotesi che sono state fatte in termini di condizioni di vincolo, di proprietà dei materiali, proprietà geometriche e meccaniche, ecc. delle strutture di interesse.

In quest'ambito, assume una notevole importanza il confronto fra le risposte dinamiche ottenute numericamente (simulazione del comportamento dinamico) e di dati sperimentali (acquisiti nell'esecuzione di prove di tipo), ad esempio in particolare in termini di andamenti temporali delle accelerazioni. L'analisi critica di queste caratteristiche nel dominio delle frequenze o del tempo può permettere di convalidare la metodologia proposta (se i dati numerici e sperimentali sono in buon accordo) e, di conseguenza, è di fondamentale importanza avere a disposizione uno strumento affidabile per lo studio del comportamento dinamico della tipologia, più ampia possibile, delle strutture che si prevede di dover analizzare.

3.1 Comportamento Modale

Nel presente studio le caratteristiche modali o “modi propri di vibrare” della struttura analizzata, in termini di frequenze proprie, e deformate modali associate, sono state calcolate utilizzando il metodo di Lanczos, che si basa sull'estrazione di tali modi e delle relative configurazioni modali a partire da matrici complete - coordinate di Lanczos o “derived Ritz vectors” [1].

Sono stati calcolati i modi propri dei modelli A e B (di cui al precedente cap. 2.2); le relative frequenze proprie sono riportate in Tabella 1, mentre le deformate modali corrispondenti a ciascuna frequenza sono rappresentate nelle seguenti figure 10 e 11.

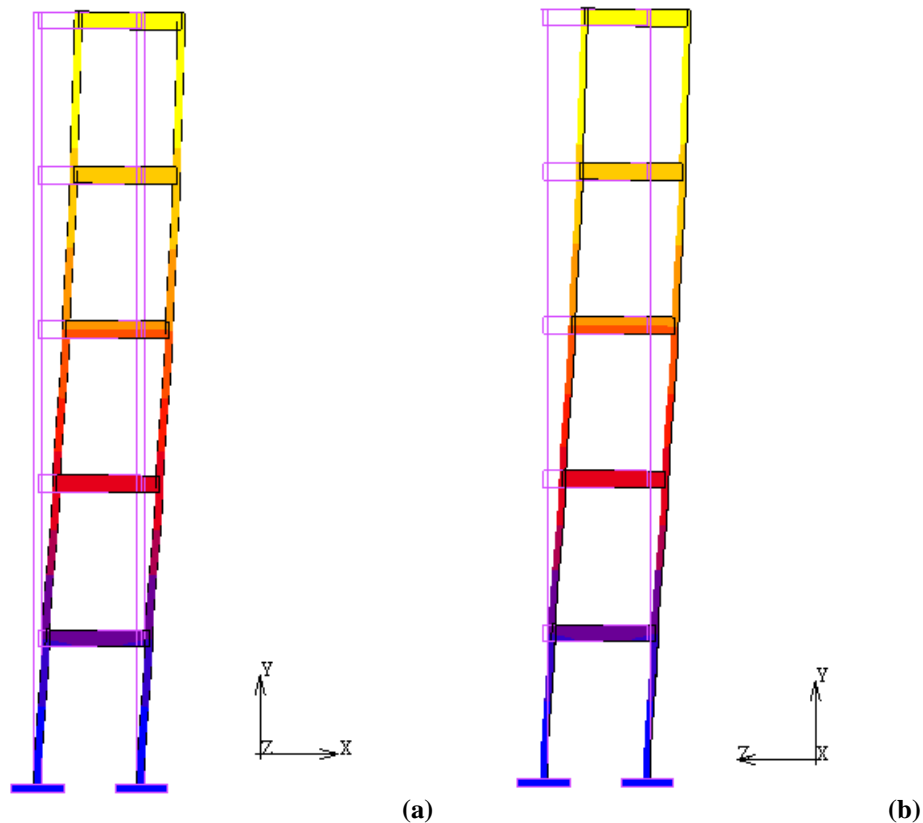
Tabella 1 – Frequenze proprie

n° Freq.	Mod. A (Hz)	Mod. B (Hz)	Modo	Errore %
1	2.72	2.84	Traslazione orizzontale x	4

2	2.76	2.84	Traslazione orizzontale z	3
3	4.5	5.5	Torsione	18
4	8.9	8.6	Flessionale (n =1) nel piano x	15
5	9.06	8.6	Flessionale (n =1) nel piano z	8
6	14.2	14.5	Flessionale (n=2) nel piano z	2

Il primo modo, associato ad una frequenza di circa 2.8 Hz per il modello B (Figura 10 a) e 2.72 per il modello A (Figura 11 a), è caratterizzato da uno spostamento di tutta la struttura in direzione orizzontale così come nel caso della deformata del secondo modo (Figura 10 e 11 b), mentre la terza frequenza è associata ad un modo prevalentemente torsionale attorno all'asse verticale (Figura 10 e 11 c).

Il quarto modo (Figura 10 e 11 d) corrisponde ad una inflessione dell'intera struttura nel piano orizzontale x come il quinto ed il sesto modo che però corrispondono ad una inflessione nel piano orizzontale z, quindi prevalentemente con spostamenti trasversali e, in misura minore, spostamenti verticali.



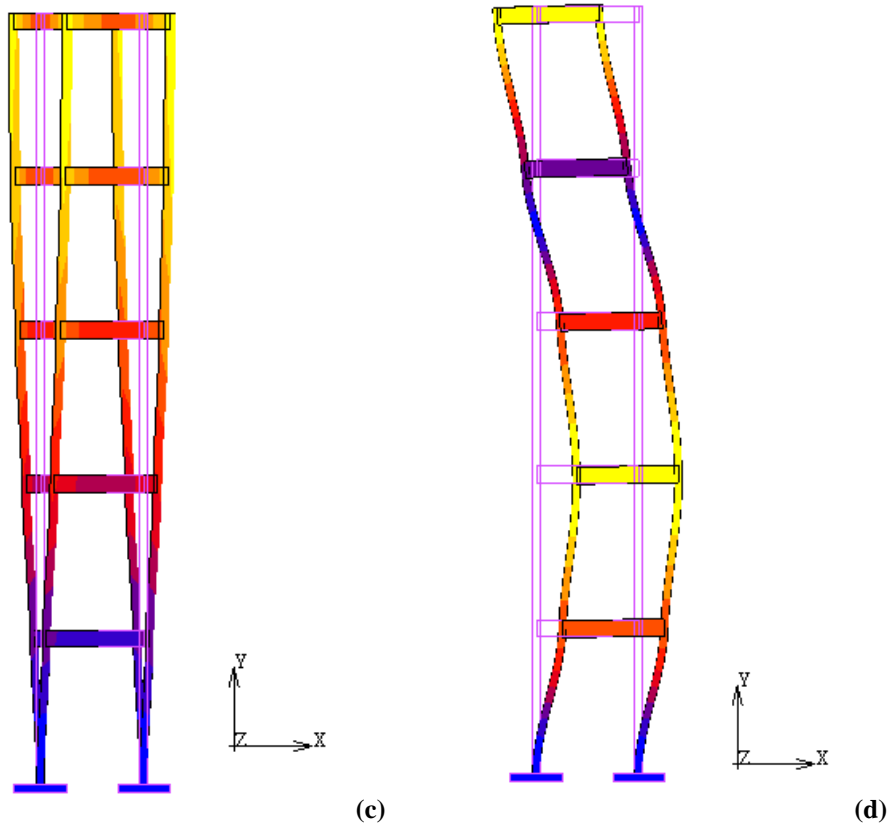
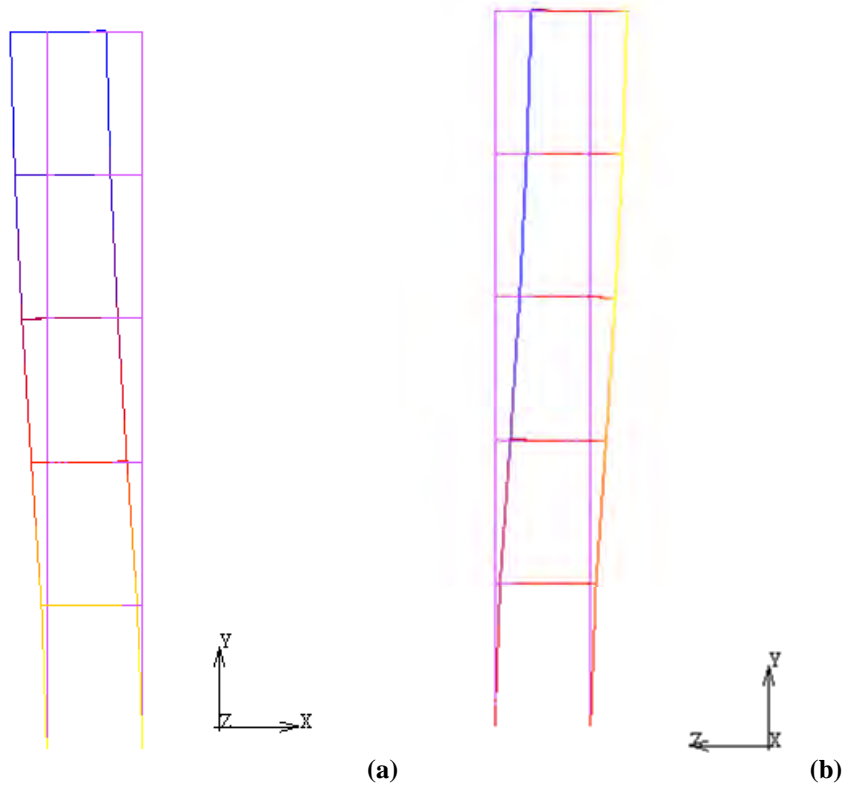


Figure 10 – Frequenze e modi propri modello B



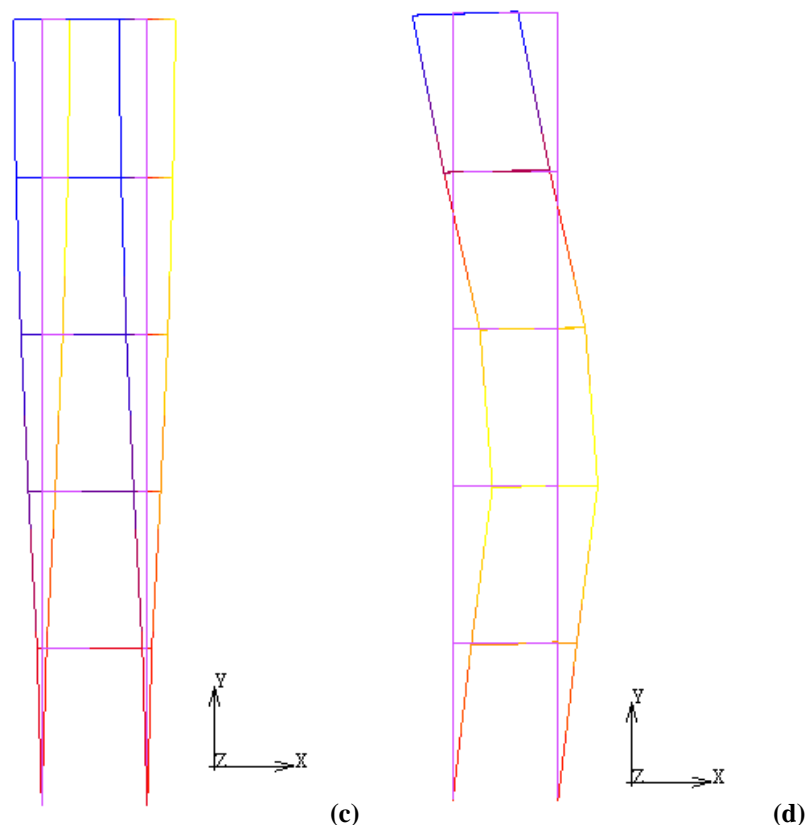


Figure 11 – Frequenze e modi propri modello A

3.2 Risposta della struttura a sisma: Analisi del transitorio dinamico

Per determinare la risposta dinamica della struttura ad un sisma, nel dominio temporale, è stata effettuata un'analisi di transitorio dinamico, tenendo conto degli effetti di non-linearità dei materiali con un adeguato coefficiente di smorzamento.

Nelle analisi effettuate è stato considerato lo smorzamento nella forma proposta da Rayleigh [2, 3, 4, 5] (pari 5% per strutture in acciaio) attraverso i due coefficienti α e β che sono rispettivamente correlati alla massa e rigidità del telaio analizzato.

Tali coefficienti sono stati calcolati secondo una legge quadratica dipendente dalle frequenze proprie del sistema e precedentemente calcolate.

Il comportamento dinamico-strutturale del telaio è stato determinato eseguendo differenti analisi non lineari utilizzando come input le componenti orizzontali e verticali dell'azione sismica ipotizzate come agenti simultaneamente: gli accelerogrammi considerati sono stati Nat1, Nat2, Aterno e Pettino, definiti nel par.2.2.

I dati sperimentali e successivamente quelli numerici ottenuti sono stati confrontati con le misurazioni accelerometriche e successivamente con i valori di accelerazione calcolati con il sistema 3D Vision.

I risultati in termini di accelerazione sono stati calcolati in corrispondenza del terzo e quinto livello del telaio in oggetto, indicati rispettivamente con le notazioni A4 e A6 oppure (11, 12) e (21, 22) rispettivamente per quanto riguarda gli accelerometri ed i markers del sistema 3D Vision. Tale disposizione è riportata nelle figure 12 e 13.

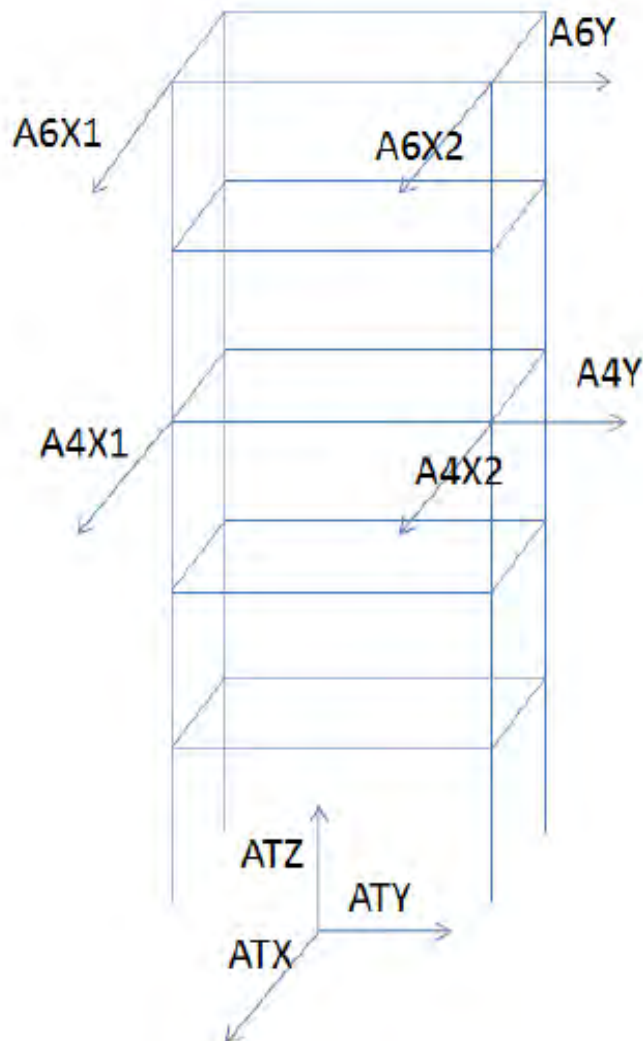


Figure 12 – Indicazione schematica posizioni accelerometri

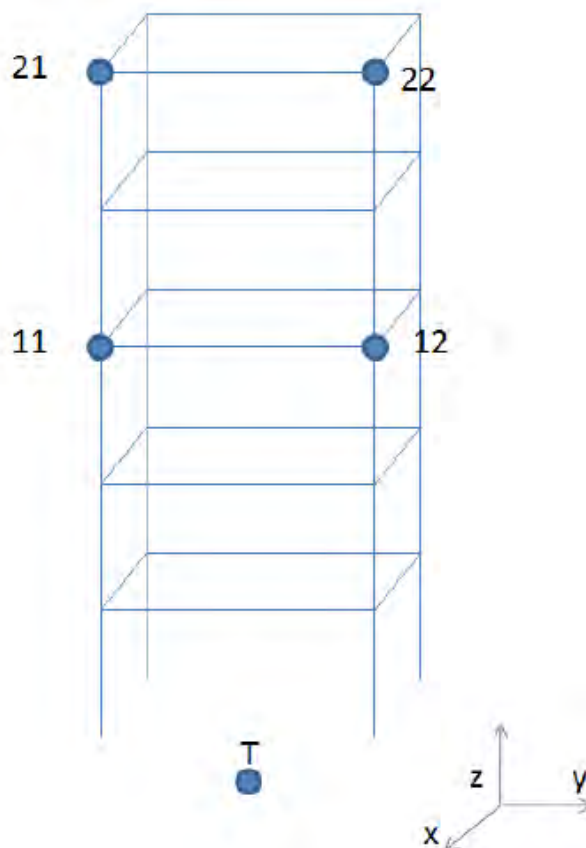


Figure 13 – Indicazione schematica posizioni marker

I dati sperimentali sono stati quindi acquisiti sia mediante sensori tradizionali (accelerometri), posizionati in corrispondenza del primo e terzo solaio, sia per mezzo del sistema di acquisizione 3D-Vision⁴.

Il sistema 3D Vision (Fig. 14) si basa su un approccio di tipo “motion capture” e, quindi, sulla capacità di rilevamento del moto da parte di un dispositivo stereofotogrammetrico, ovvero da parte di un sistema costituito da più telecamere.

L’acquisizione del movimento, ed in particolare la successiva determinazione dei valori di accelerazione, è resa possibile monitorando gli spostamenti della struttura mediante appositi marcatori ed avvalendosi di sistemi di grafica tridimensionale. Il tipo di elaborazione effettuata per ottenere le informazioni di posizione si basa su un approccio di natura geometrica, ne consegue che le irregolarità o le discontinuità geometriche accentuate, come angoli, buchi, ecc., possono ridurre l’accuratezza dell’acquisizione visiva.

^{4,5} Immagine del sistema di acquisizione 3D vision disponibile c/o ENEA

Infine è necessario precisare che, essendo le accelerazioni, ricavate negli stessi punti di riferimento ai dati accelerometrici, mediante l'operazione di derivazione a partire dai dati di spostamento, tali valori possono essere affetti da errore (il progetto MOCA, Univ. Bologna, è uno degli esempi di "MOtion Capture with Accelerometers" in cui acquisendo direttamente i valori di accelerazione si evita tale errore).



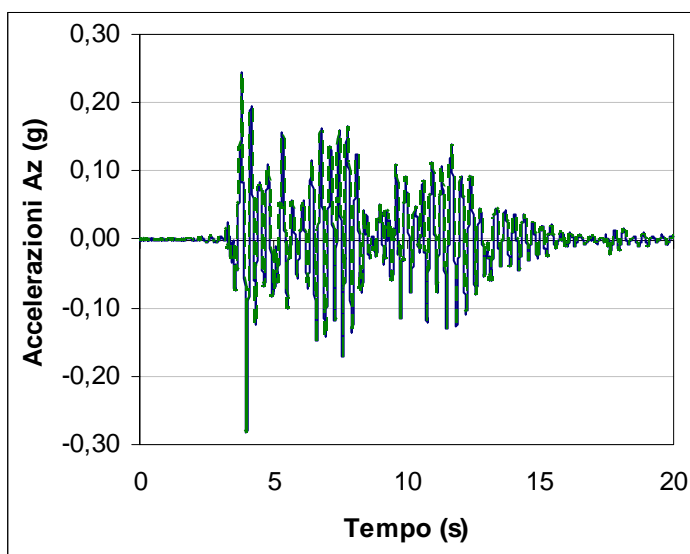
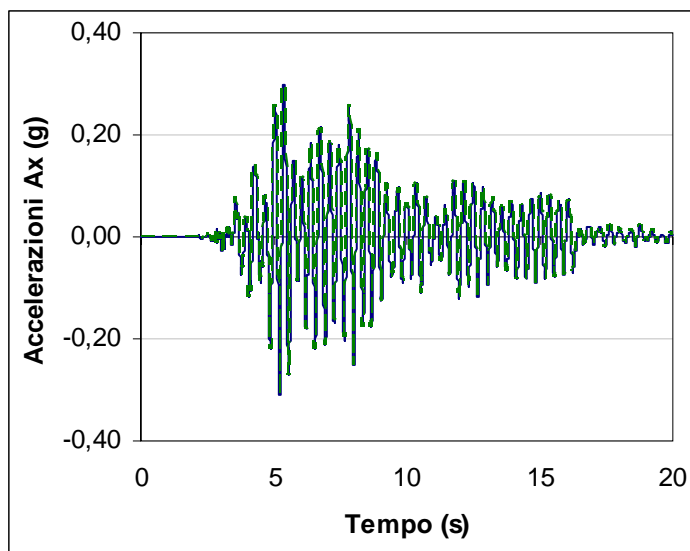
Figure 14 – Schema sistema 3D vision: posizione delle telecamere⁵

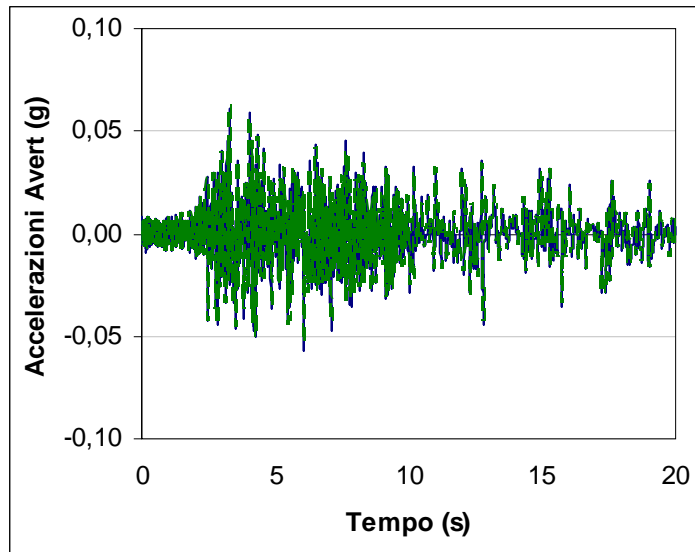
Infine occorre sottolineare che i valori di accelerazione acquisiti sia con il sistema 3D Vision che con le misure accelerometriche sono stati forniti da ENEA per conseguire la convalida della metodologia proposta.

4. Risultati numerici

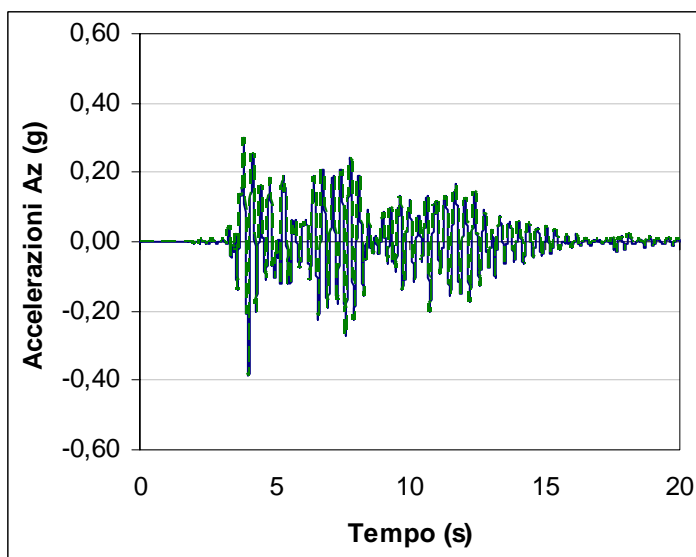
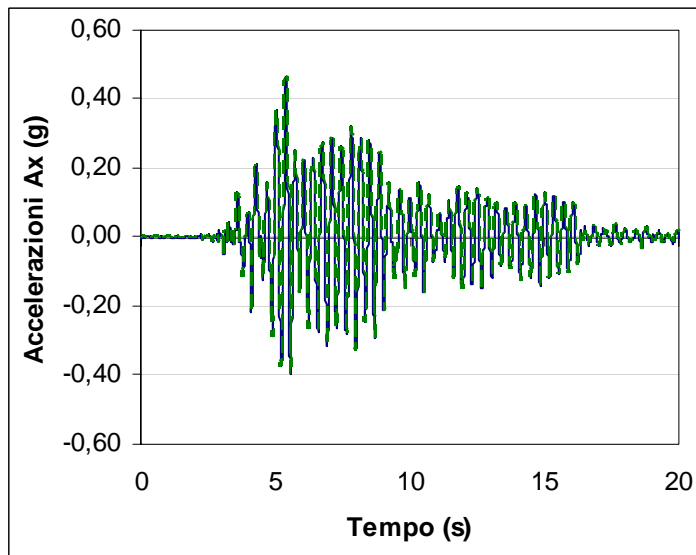
I dati ottenuti dalle simulazioni di transitorio dinamico sono riportati in termini di time history delle accelerazioni (componenti orizzontali e verticale) per i sismi analizzati nelle seguenti figure 15, 16, 17 e 18.

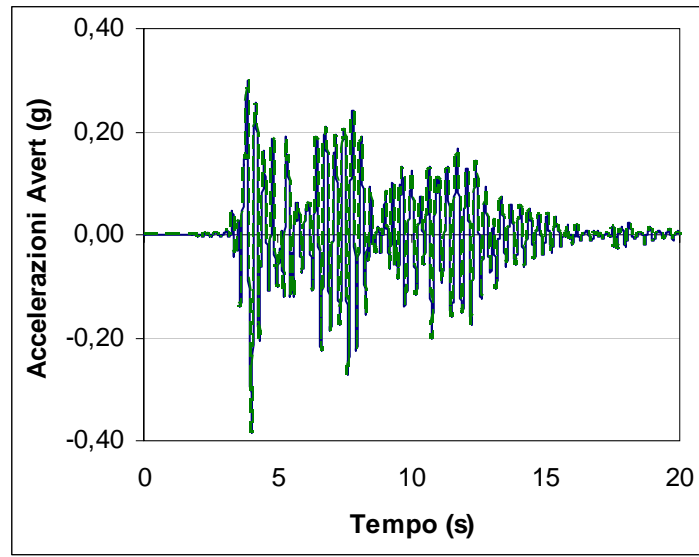
Gli andamenti delle accelerazioni non hanno evidenziati variazioni rilevanti in corrispondenza dello stesso livello, mentre hanno evidenziato una leggera amplificazione lungo lo sviluppo verticale del telaio stesso.





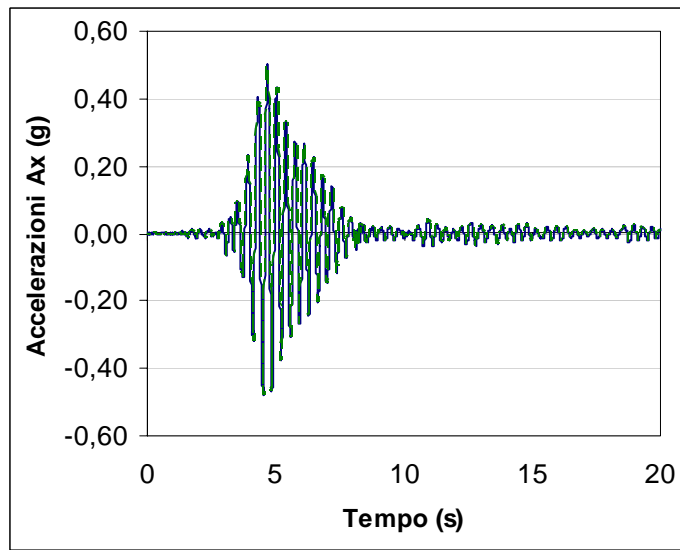
(a)

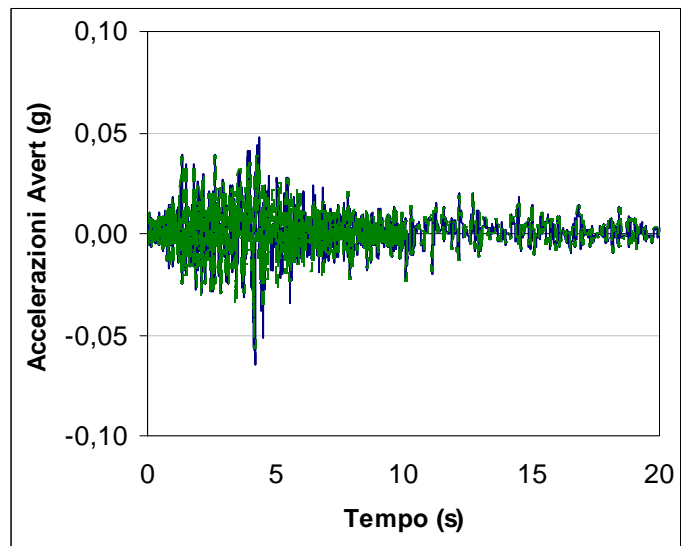
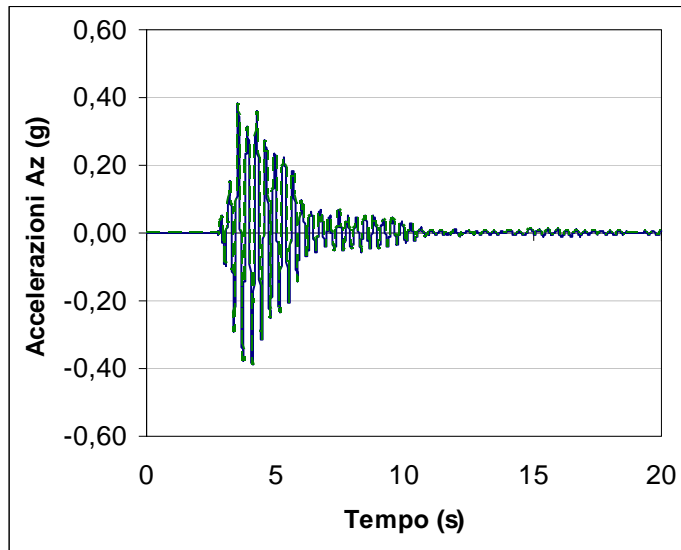




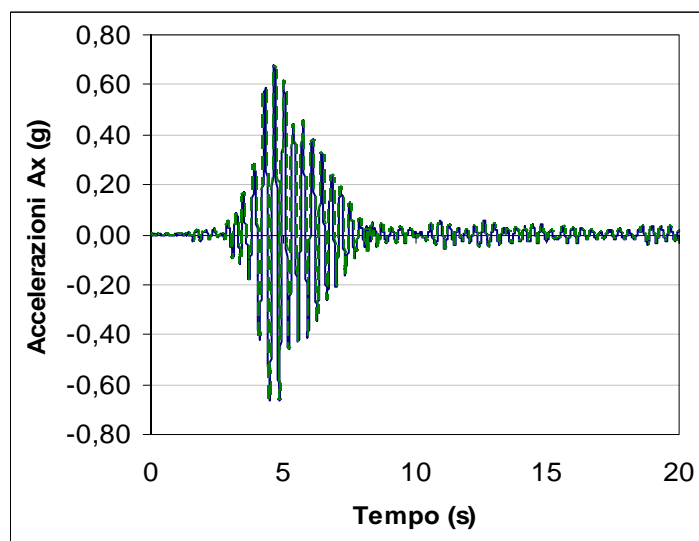
(b)

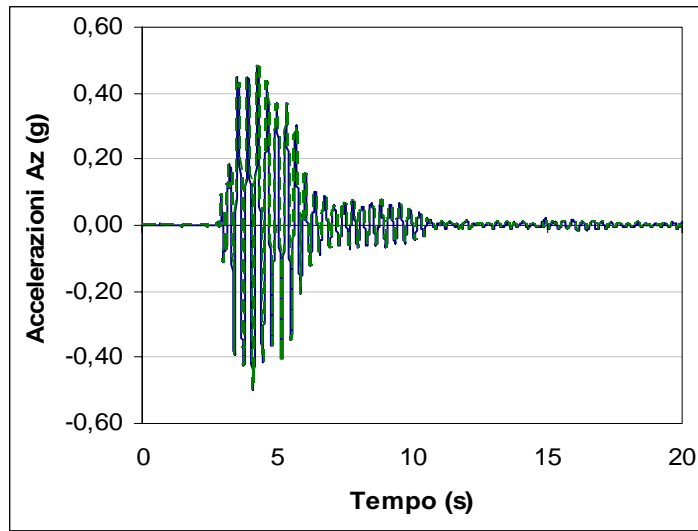
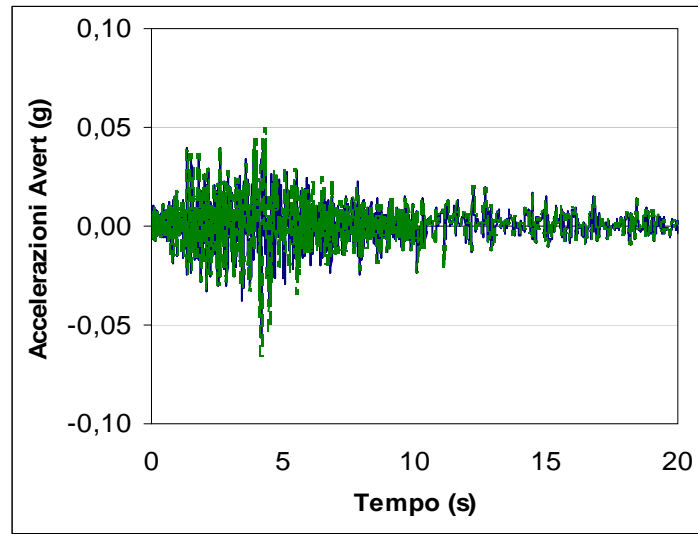
Figure 15 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Aterno





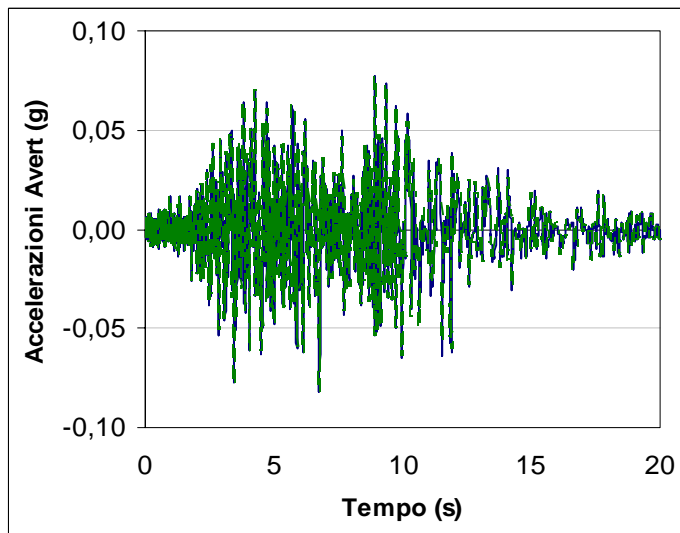
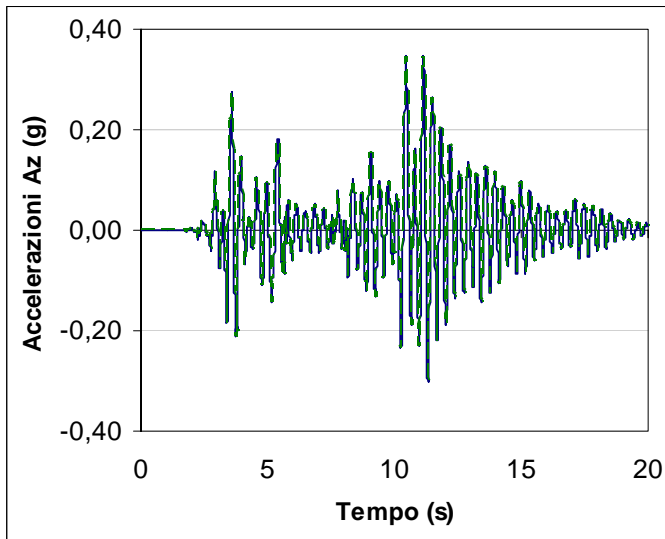
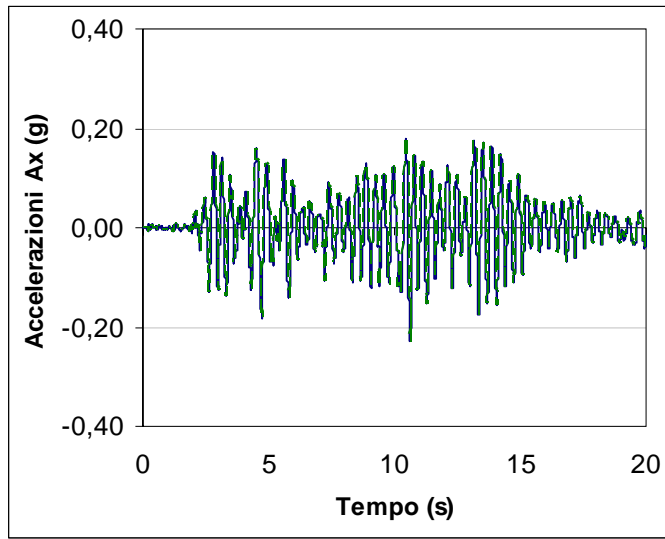
(a)



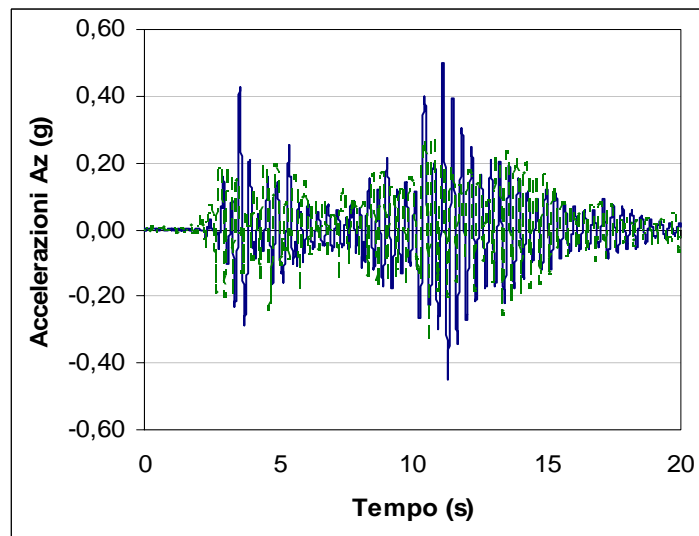
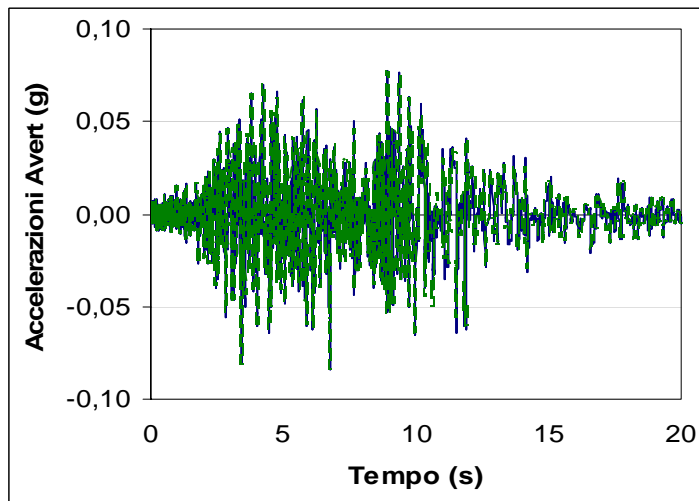
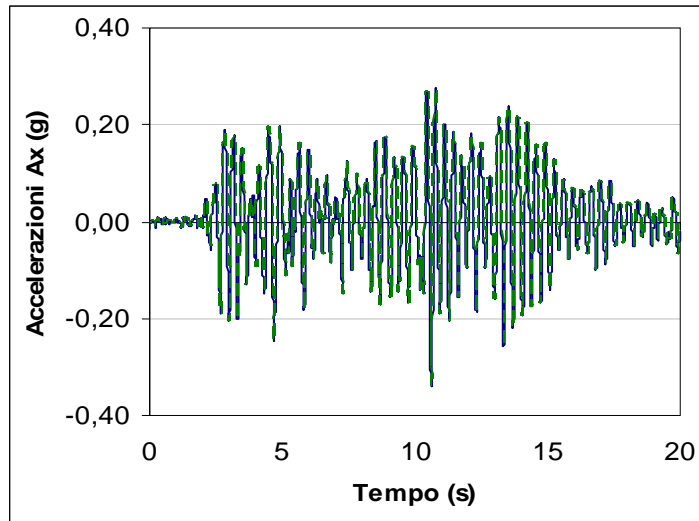


(b)

Figure 16 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Nat1

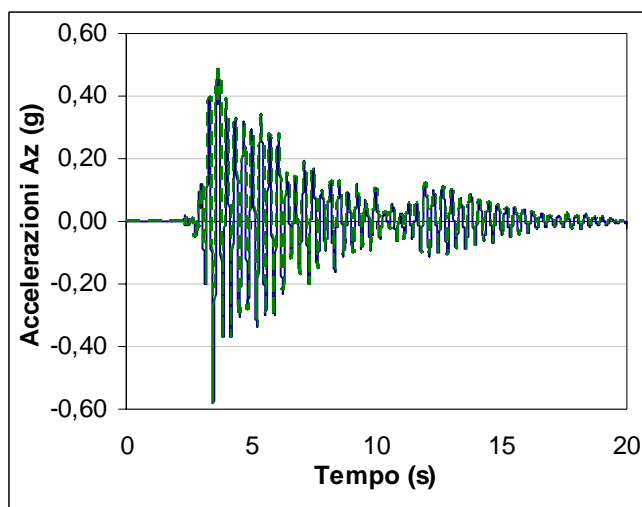
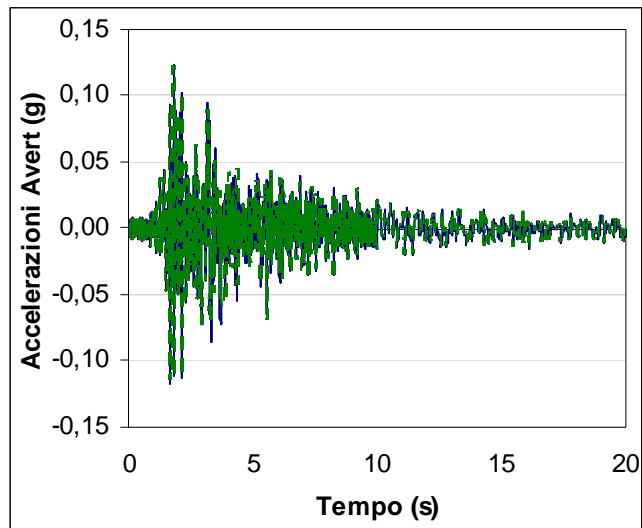
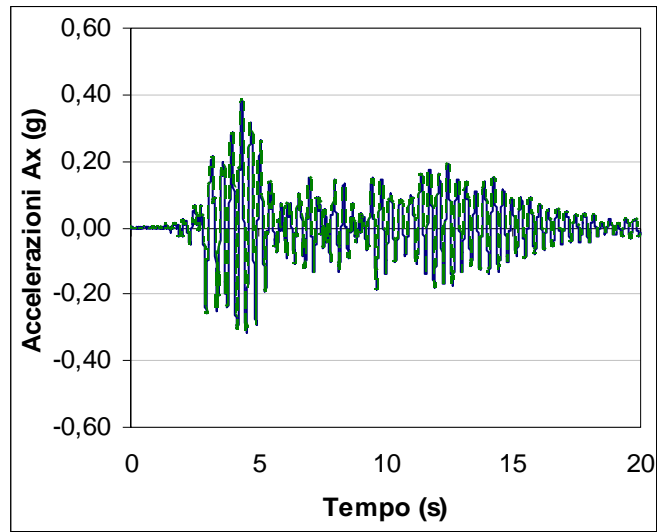


(a)

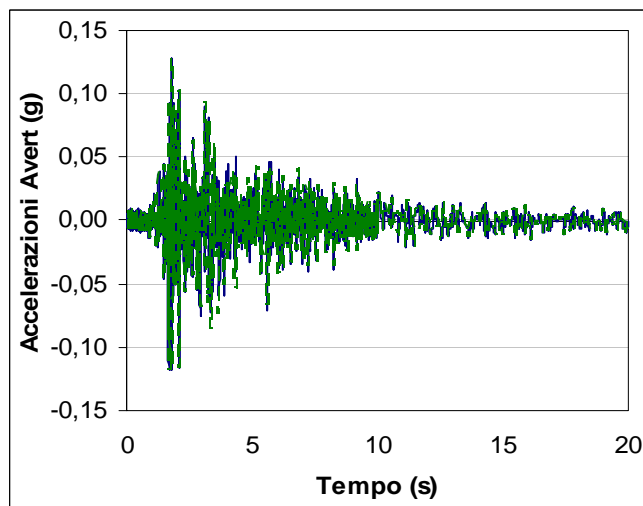
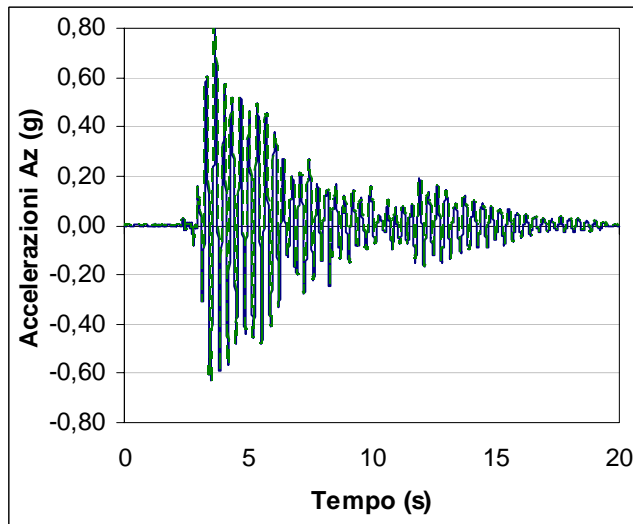
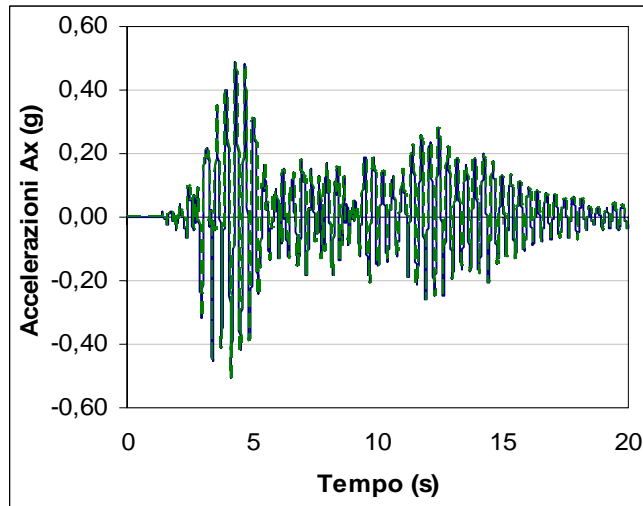


(b)

Figure 17 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Nat2



(a)



(b)

Figure 18 – Accelerazioni indotte al 3° (a) e 5° (b) livello del telaio dal sisma Pettino

5. Confronto dei risultati Numerici vs. Sperimentali

Per la convalida della metodologia proposta un passo importante è rappresentato dall'analisi critica dei risultati che si basa generalmente su un confronto fra i dati sperimentali osservati e le stime numeriche ad essi correlabili.

Allo scopo di rendere chiara e rapida la percezione della precisione della misura (cosa più importa in questo contesto ai fini della convalida della metodologia proposta) è stato valutato l'ordine di grandezza dell'errore (diretto o indiretto) ad essa riferibile; è stato, pertanto, valutato l'errore standard (in percentuale).

L'entità dell'errore commesso nella previsione del valore stimato ha permesso di convalidare la metodologia proposta e di ottenere informazioni utili per migliorare il settaggio delle apparecchiature sperimentali utilizzate (limitare e/o contenere i disturbi e perturbazioni del segnale acquisito, gli eventuali errori sistematici, ecc.).

Infine è utile ricordare che le informazioni derivanti dalla fase di pre-test (sensibilità dello strumento di misura, taratura sia degli accelerometri che del sistema 3D vision, ecc.) sarebbero state utili e di fondamentale importanza per la convalida che, quindi allo stato attuale, deve considerarsi preliminare.

5.1 Risultati numerici vs. dati accelerometrici

Nelle seguenti figure 19 e 20, si riporta il confronto fra i dati accelerometrici misurati e quelli stimati, per il terremoto Nat2⁶, come esempio.

⁶ il confronto è stato fatto solo per quanto riguarda le componenti orizzontali, essendo queste ultime le sole acquisite del sistema accelerometrico utilizzato c/o il Lab. ENEA

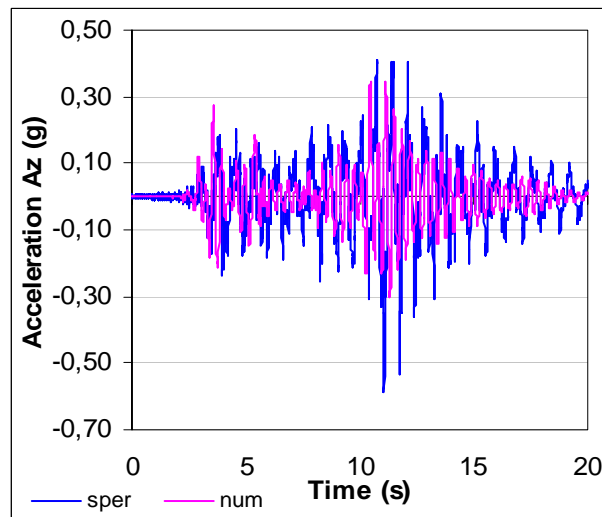
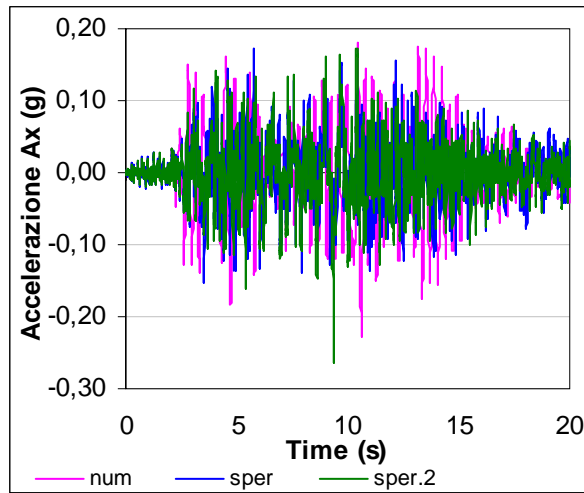
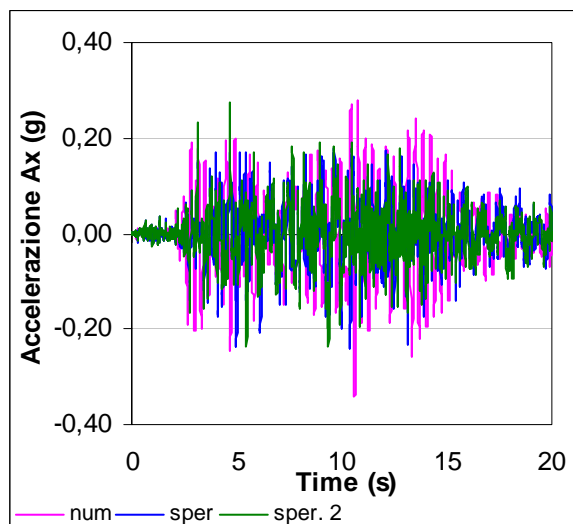


Figure 19 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 3° livello del telaio indotte dal sisma Nat2



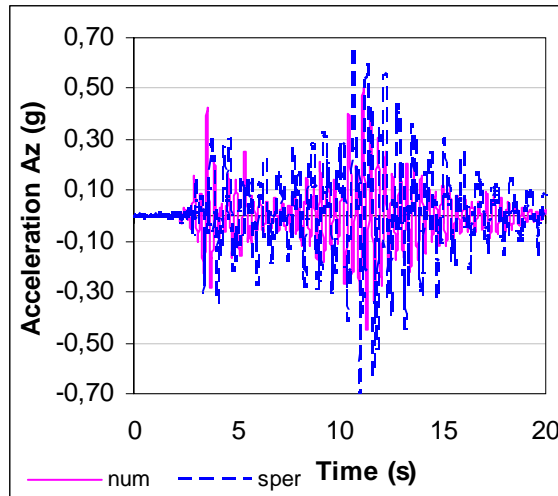


Figure 20 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 5° livello del telaio indotte dal sisma Nat2

Il valore dell'errore standard, connesso con la stima dei valori di accelerazione risulta essere pari a circa il 7% al 3° livello del telaio analizzato, mentre risulta pari a circa il 12% al 5° livello (figure 21 e 22).

Analizzando le distribuzioni dell'errore standard si notano dei picchi isolati che si ritiene essere dovuti al fatto che l'input sismico impresso dalla tavola vibrante risente inevitabilmente dei rumori di fondo e/o delle vibrazioni connessi con la movimentazione di tale sistema: tali valori, comunque, non influenzano la discrepanza fra i dati suddetti.

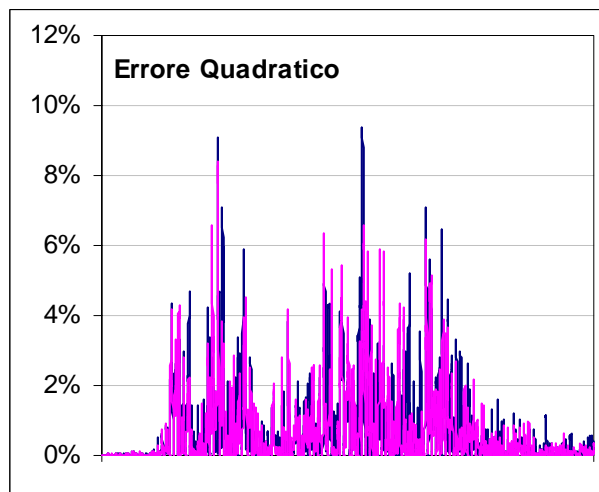


Figure 21 – Distribuzione dell'errore relativo alle accelerazioni (3° livello del telaio)

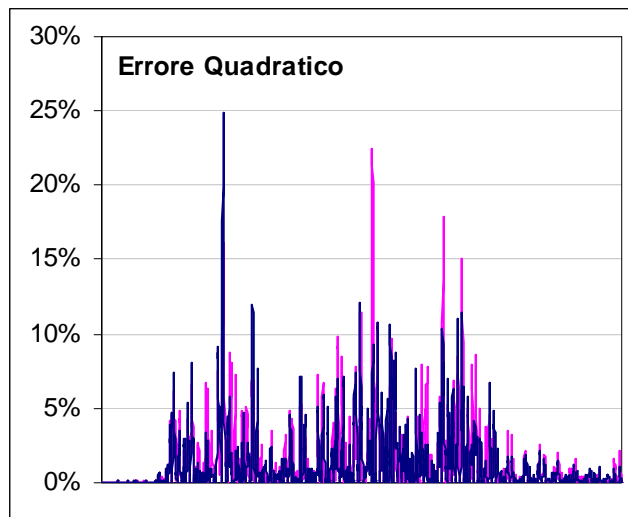


Figure 22 – Distribuzione dell'errore relativo alle accelerazioni (5° livello del telaio)

5.2 Risultati numerici vs. dati 3D-Vision

Per quanto riguarda i dati acquisiti con il sistema 3D VISION, che sono spostamenti, occorre sottolineare che essendo stati tali dati sottoposti ad doppia derivazione per il calcolo delle accelerazioni essi risultano inevitabilmente caratterizzati da un'amplificazione dell'errore, connesso con l'acquisizione dello spostamento (monitoraggio ed acquisizione delle traiettorie dei marker secondo le componenti spaziali x,y,z in accordo con il sistema di assi cartesiani stabilito come riferimento nella fase di calibrazione del sistema stesso).

Nelle seguenti figure 23 e 24 si riportano gli andamenti dell'errore quadratico medio (MSE), calcolato per stimare la variazione fra i valori di accelerazione (numeriche e stimate con il sistema 3D-Vision) per lo stesso sisma Nat 2 considerato in precedenza.

I confronti hanno evidenziato un discrepanza maggiore dovuta al suddetto errore connesso con la derivazione dello spostamento acquisito.

Infatti come si evidenzia nella figura 25 il medesimo sistema 3D-Vision acquisisce due differenti time history delle accelerazioni: la discrepanza fra i due markers posti al 3° livello del telaio è circa l'8 %, per il sisma in esame.

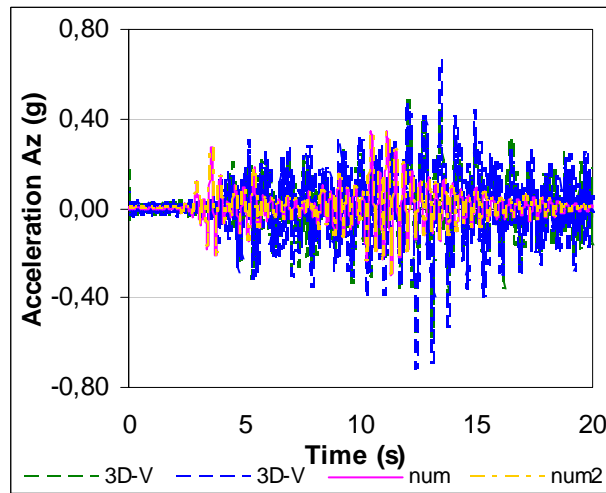
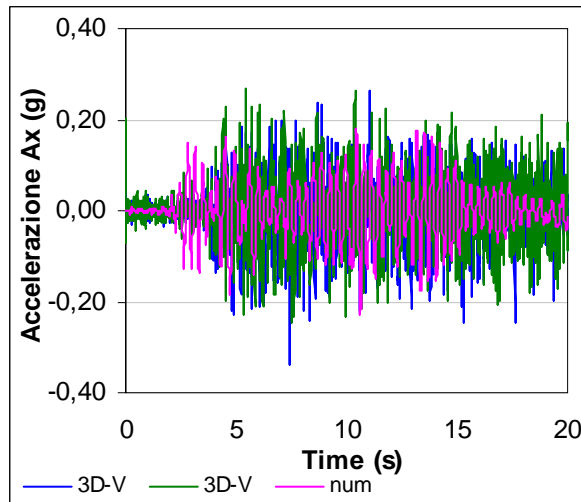
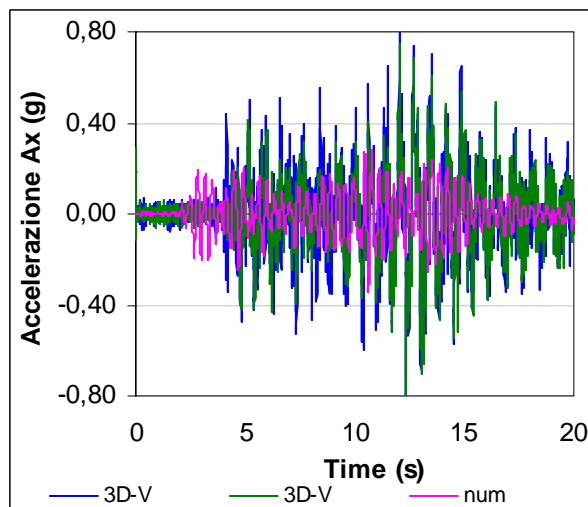


Figure 23 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 3° livello del telaio indotte dal sisma Nat2



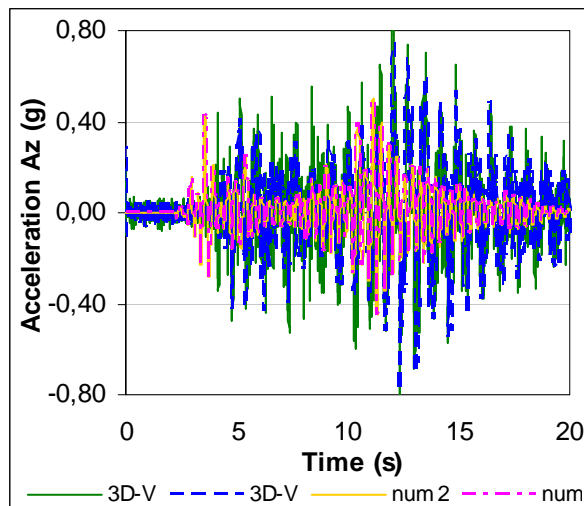


Figure 24 – Confronto fra i valori di accelerazioni relativi al 5° livello del telaio indotte dal sisma Nat2

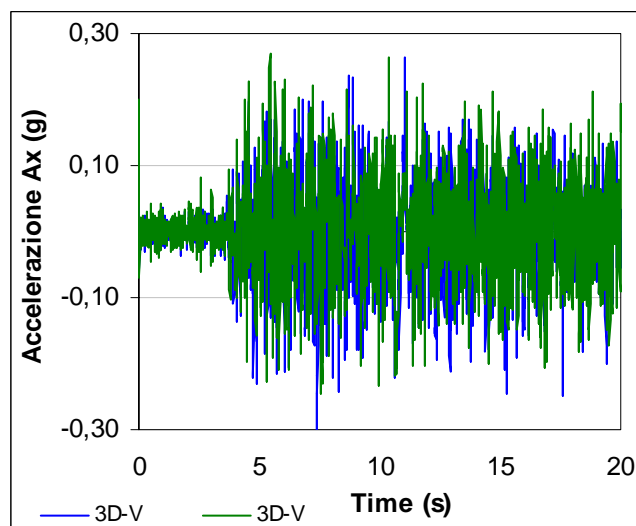


Figure 25 – Confronto fra i valori di accelerazioni acquisiti da 3D-Vision nelle posizioni

Infine l'errore standard, relativo alle accelerazioni, stimate numericamente e con il sistema "motion capture" per il suddetto sisma Nat 2, risulta pari a circa il 10 % in corrispondenza del 3° livello del telaio analizzato e circa il 18 % in corrispondenza del 5° livello (figure 26 e 27).

Anche in questo caso, analizzando la distribuzione dell'errore si osservano dei picchi isolati (cfr.5.1) che si ritiene essere dovuti ai rumori di fondo e/o vibrazioni indotte dalla tavola vibrante e dalla taratura delle telecamere (e relativa catena di acquisizione dati del sistema 3D-Vision).

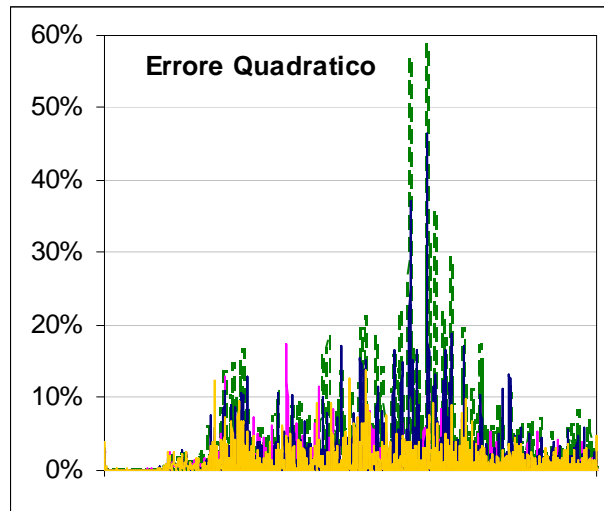


Figure 26 – Distribuzione dell'errore relativo alle accelerazioni (3° livello del telaio)

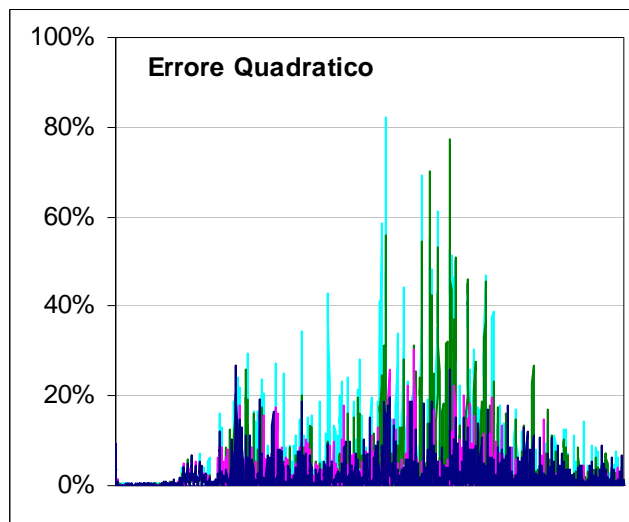


Figure 27 – Distribuzione dell'errore relativo alle accelerazioni (5° livello del telaio)

6. Conclusioni

Nel presente rapporto è documentata la messa a punto e la convalida a fronte di dati sperimentali (acquisiti da ENEA) di un modello di calcolo agli elementi finiti implementato su un calcolatore per l'analisi dinamica in condizioni di sisma per strutture di tipo reticolare/travature relativamente complesse.

Le indicazioni che si possono trarre dal lavoro svolto sono, in sintesi, le seguenti:

- a. La buona coincidenza fra i dati sperimentali ed i risultati numerici conferma la attendibilità e caratteristiche del modello e del codice di calcolo di riferimento per strutture reticolari e/o intelaiate del tipo di quella assoggettata alle esperienze svolte presso il Lab. ENEA della Casaccia.
- b. I risultati ottenuti con il sistema 3D-Vision sono in ragionevole accordo con quelli numerico; è peraltro da ritenere opportuno un allargamento della fase sperimentale con misure accelerometriche effettuate negli stessi punti in cui sono stati eseguiti i rilievi 3D-Vision.
- c. Si rileva che la necessità di analizzare sperimentalmente e numericamente altri tipologie di strutture (ad esempio sistemi di tubazioni, recipienti in pressione, depositi e serbatoi di liquidi, ecc.) oltre quella presa in esame nel presente lavoro preliminare.
- d. E' molto opportuno che la suddetta nuova fase sperimentale sia affrontata in sinergia con le analisi numeriche attraverso le fasi di progetto delle esperienze pre-test e valutazione dei risultati con analisi di post-test.
- e. L'ampliamento dell'attività di convalida sperimentale indicata/proposta nei precedenti punti c) e d) costituirebbe un importante contributo nella direzione della riduzione delle impegnative esperienza su modelli fisici complessi, che potrebbero essere sostituiti proficuamente con simulazioni di tipo convalidato. Allo stesso tempo, con l'approccio numerico opportunamente convalidato, si potrebbero progettare esperienze che si ritenessero comunque necessarie, ai fini certificativi, in modo più razionale ed in numero più ridotto, accompagnandole

con una più estesa attività di simulazione numerica certamente impegnativa ma più economica e rapida di quella sperimentale.

7. Bibliografia

1. R.W.Clough, J.Penzien, Dynamics of structures, Mc Graw Hill International Editions, New York, 1993.
2. Liu, M., Gorman, D.G., 1995. Formulation of Rayleigh damping and its extensions. *Computer & Structures* 57 (2), 277–285.
3. R. Lo Frano, G. Forasassi et al. Preliminary seismic analysis of an innovative near term reactor: Methodology and application, *Nuclear Engineering and Design* 240 (2010) 1671–1678.
4. R. Lo Frano, G. Forasassi, Preliminary evaluation on the influence of faulted isolators in the propagation of seismic loadings, CERSE-UNIPI RL 1058/2010.
5. R. Lo Frano, G. Forasassi, Isolation systems influence in the seismic loading propagation analysis applied to an innovative near term reactor, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.240, Issue 10, October 2010, 3539-3549.