

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA

DIPARTIMENTO DI FISICA E GEOLOGIA

Corso di Laurea in Geologia



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

TESI DI LAUREA

RAPPORTO TRA LE COMPONENTI ACCELEROMETRICHE VERTICALI ED ORIZZONTALI
DI TERREMOTI UMBRI RECENTI E CONFRONTO CON QUANTO PRESCRITTO DALLE
NORME TECNICHE SULLE COSTRUZIONI (NTC 17/01/18)

Laureando:

Susini Anna

Relatore:

Prof.ssa Pauselli Cristina

Correlatore:

Dott. Geol. Arcaleni Michele

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

1. Introduzione	4
2. Componente verticale del sisma e rapporto con quanto prescritto dalle Norme Tecniche sulle costruzioni	6
2.1 Riferimenti alla normativa NTC per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica	6
2.2 Descrizione dell'approccio semplificato di normativa (categorie di sottosuolo e condizioni topografiche).	7
2.2.1 Concetti di verifica agli stati limite.	8
2.3 Spettro di risposta sismica orizzontale e spettro verticale in base a quanto prescritto dalle Norme Tecniche sulle costruzioni.	12
2.3.1 Espressioni per il calcolo dello spettro di risposta delle componenti orizzontali.	12
2.3.2 Espressioni per il calcolo dello spettro di risposta sismica della componente verticale.	15
2.4 Quando progettare con la verifica della componente verticale.	16
2.5 Determinazione degli spettri di risposta sismica orizzontale e verticale relativi ad un sito della rete accelerometrica, applicando quanto prescritto dalla normativa tecnica.	17
3. Effetti reali dell'azione della componente accelerometrica verticale del sisma	25
3.1 Concetto di rischio sismico.	25
3.2 Componente verticale: evidenze della sottostima del danno atteso.	26
4. Presentazione dei dati e risultati	30
4.1 Descrizione della rete accelerometrica Re.Si.R.	30
4.2 Scelta dei dati	32
4.2.1 Sito di Cascia.	33
4.2.1.1 Analisi dei dati: valori di PGA	34
4.2.1.2 Analisi dei dati: componente verticale in termini di frequenza	37
4.2.2 Altri siti della rete Re.Si.R.	39

5. Conclusioni	43
Bibliografia	45

1

INTRODUZIONE

Gli eventi sismici che hanno colpito l'Italia Centrale durante la crisi sismica del 2016-2017 hanno coinvolto le strutture situate nelle zone in prossimità degli epicentri con particolari modalità di danneggiamento. Dall'analisi del quadro fessurativo riportato da numerosi edifici nelle zone del cratere 2016 è stato possibile ricollegare gli effetti manifestati non solo all'azione delle componenti orizzontali, ma anche di quella verticale. È stato dimostrato da studi ingegneristici che, quando l'accelerazione della componente verticale è opposta a quella della gravità, l'edificio, alleggerendosi, risulta più suscettibile alla componente orizzontale del moto sismico. In questa specifica circostanza, si sono spesso generate lesioni orizzontali nella superficie di passaggio da un piano all'altro. Dall'analisi degli effetti reali, si è ritenuto necessario indagare sulle caratteristiche effettive di questa componente, con particolare attenzione sia alla quantificazione dei parametri secondo le Norme Tecniche sulle costruzioni (NTC 17/01/18) sia al fatto che la verifica alla componente verticale è facoltativa nella maggior parte dei casi.

La collaborazione con l'Osservatorio sismico "A. Bina", realizzata secondo quanto previsto dalla convenzione tra l'Università di Perugia e lo stesso, ha reso possibile questo studio attraverso l'accesso alla banca dati accelerometrici della Regione Umbria. I dati accelerometrici analizzati provengono dall'attività di quattro stazioni di monitoraggio sismico posizionate dal centro sismico nel territorio umbro a partire dal 2018 (progetto Re.Si.R., Rete Sismica Regione Umbria). È stato possibile analizzare accelerogrammi di terremoti avvenuti dal 2019 fino all'anno 2021 e quantificare gli effetti reali, in termini di PGA (Peak Ground Acceleration) ed in termini di contenuto in frequenza della componente verticale ed orizzontali del sisma.

Le Norme Tecniche sulle costruzioni attualmente in vigore (NTC 17/01/18), nella maggior parte dei casi non rendono obbligatoria la verifica dell'edificio agli stati limite per la componente verticale del sisma ma solo per quella orizzontale. I casi per i quali le NTC obbligano a prendere in considerazione la componente verticale per la verifica delle strutture, risultano molto particolari ed estremi da un punto di vista progettuale. Alla luce dei dati

ottenuti dalle stazioni accelerometriche Re.Si.R. emerge che, in molti casi, la componente verticale del sisma risulta dello stesso ordine di grandezza di quella orizzontale. I dati sperimentali analizzati nella presente tesi dimostrano infatti che, se il terremoto è relativamente vicino al sito, la componente verticale risulta addirittura superiore rispetto a quella orizzontale. Per tali terremoti, l'analisi degli accelogrammi ha consentito anche di dimostrare che il contenuto in frequenza della componente verticale risulta avere una banda di ampiezza simile rispetto a quella delle frequenze delle componenti orizzontali. Tale banda, pertanto, non risulta più stretta, come spesso viene ritenuto ai fini ingegneristici, e risulta spostata verso frequenze più alte tali da interessare edifici di uso comune, molto diffusi nelle zone dell'Umbria con alto rischio sismico.

In seguito all'analisi di centinaia di accelerogrammi, i risultati emersi dal presente studio mettono in chiara evidenza che le NTC sottostimano l'azione sismica non tenendo adeguatamente in considerazione l'influenza della componente accelerometrica verticale. Data l'impossibilità di prevedere la localizzazione dell'ipocentro dei futuri eventi sismici, risulta necessaria una considerazione adeguata dell'azione sismica verticale per una concreta e consapevole riduzione del rischio sismico.

Componente verticale del sisma e rapporto con quanto prescritto dalle Norme Tecniche sulle costruzioni

2.1 Riferimenti alla normativa NTC18 per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica

I terremoti sono dei fenomeni imprevedibili, non si può stabilire quale sarà il prossimo evento sismico e nemmeno la possibile localizzazione. Conoscendo però una serie di informazioni sul sito (terreno, storia dei terremoti passati, etc), si può in qualche modo prevedere che tipo di sisma si avrà in un fissato periodo di tempo. Come riportato dalle Norme Tecniche sulle costruzioni (paragrafo 3.2 “Azione sismica”, NTC18), le azioni sismiche di progetto si valutano in relazione alla “pericolosità sismica di base” del sito definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa su suolo A e del corrispondente spettro di risposta elastico (Iervolino, Cosenza e Galasso, 2009) e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale. I tre parametri di sito da considerare per definire uno spettro di risposta elastico in accelerazione, sono a_g , cioè accelerazione orizzontale massima del terreno, T_c^* ovvero il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale e F_0 , il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (Giresini, 2018). Ai fini della valutazione dell'azione sismica di progetto, la normativa prevede di considerare la zona sismica di appartenenza del sito interessato (definita sulla base di opportuni e codificati studi di pericolosità sismica) e le condizioni geologiche locali sulla base di una specifica analisi della risposta sismica locale oppure ricorrendo ad una classificazione semplificata dei terreni di fondazione sulla base di parametri che ne descrivono il comportamento sotto sollecitazione sismica (Romeo, 2007).

2.2 Descrizione dell'approccio semplificato di normativa (categorie di sottosuolo e condizioni topografiche)

Categorie di sottosuolo

Qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili a particolari categorie definite nella tabella 2.1, si può far riferimento a un approccio semplificato, che si basa sulla classificazione del sottosuolo in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente della propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s) (paragrafo 3.2.2 “Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche”, NTC18), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Dove:

H: profondità substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido con $V_s > 800$ m/s (per $H > 30$ m, $V_{S,eq} = V_{s30}$)

$V_{s,i}$: velocità di propagazione delle onde di taglio nell'i-esimo strato

h_i : spessore dell'i-esimo strato (in metri)

N: numero di strati presenti nei primi 30 metri di profondità

In base a quanto riportato nelle NTC18, per queste cinque categorie di sottosuolo le azioni sismiche sono definibili tramite l'approccio semplificato. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie indicate nella tabella 2.1, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche (paragrafo 3.2.2 “Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche”, NTC18).

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 2.1: Categorie di sottosuolo per l'approccio semplificato in base alle NTC 18/01/2018 (3.2.2. tabella 3.2.II, NTC18).

Condizioni topografiche

Sono quelle condizioni che caratterizzano l'andamento della superficie del terreno sul quale si dovrà edificare l'opera in progetto (Sabatini, 2020). Come da NTC, per configurazioni superficiali semplici è previsto l'uso della classificazione indicata nella tabella 2.2, mentre per condizioni topografiche complesse è necessario procedere con specifiche analisi di risposta sismica locale.

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

Tabella 2.2: Categorie topografiche come da NTC 18/01/2018 (3.2.2. tabella 3.2.III, NTC18).

2.2.1 Concetti di verifica agli stati limite

Per stati limite si intendono quelle condizioni, superate le quali, la struttura o uno dei suoi elementi costitutivi non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata. Ci sono due tipi di stati limite per i quali la struttura deve essere verificata:

- Stati limite di esercizio (SLE): rappresentano un limite oltre il quale si genera una condizione non ottimale per l'utilizzo della struttura, che non può più garantire gli scopi preposti (Sabatini, 2020). Questi stati limite possono avere carattere reversibile o irreversibile e comunque possono essere di varia natura (es. danneggiamenti locali, deformazioni, vibrazioni eccessive, etc...).
- Stati limite ultimi (SLU): rappresentano un limite oltre il quale si ha una condizione di pericolo per la resistenza della struttura, che può portare a forme di cedimento strutturale che metterebbero in pericolo la sicurezza delle persone o delle cose che si trovano all'interno o nei pressi della costruzione (Sabatini 2020). Hanno carattere irreversibile e il superamento di questo stato si definisce collasso. Può verificarsi con la rottura localizzata della struttura, l'instabilità per deformazione, il raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti o della struttura nel suo insieme, etc...

Gli stati limite di esercizio si suddividono in (paragrafo 3.2.1 “Stati limite e relative probabilità di superamento”, NTC18):

- Stato Limite di operatività (SLO): la costruzione nel suo complesso (elementi strutturali, non strutturali, apparecchiature) non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi. È particolarmente utile come riferimento progettuale per le opere che debbono restare operative durante e subito dopo il terremoto (ospedali, caserme, centri della protezione civile, etc.).
- Stato Limite di danno (SLD): la costruzione nel suo complesso (elementi strutturali, non strutturali, apparecchiature) deve mantenersi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature. È definito come stato limite da rispettare per garantire inagibilità solo temporanea nelle condizioni post-sismiche;

Gli Stati limite ultimi si suddividono in:

- Stato Limite di salvaguardia della vita (SLV): a seguito del terremoto la struttura subisce rotture e crolli delle componenti non strutturali ed impiantistiche e

significativi danni delle componenti strutturali cui si associa una perdita significativa nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

- Stato Limite di prevenzione del collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli delle componenti non strutturali ed impiantistiche e danni molto gravi delle componenti strutturali: la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

I quattro stati limite definiti consentono di individuare quattro situazioni diverse che fanno corrispondere una progressiva crescita del danneggiamento all'insieme di struttura, elementi non strutturali ed impianti.

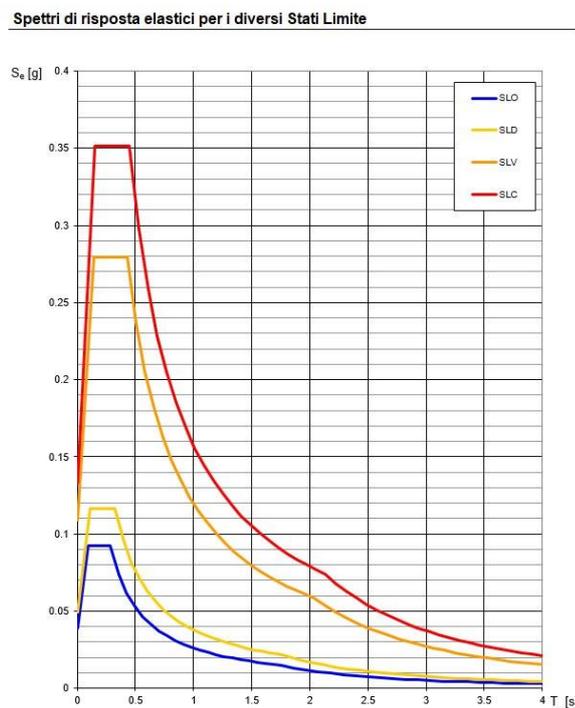


Figura 2.3: Spettri di risposta riferiti ad ogni stato limite.

Per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati si deve tenere conto delle probabilità di superamento P_{VR}

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

Tabella 2.4: Probabilità di superamento dell'azione sismica in termini di accelerazione per SLE e SLU.

Classi d'uso

Stando alla normativa, non tutte le verifiche agli Stati limite sopra descritti vanno effettuate per qualunque struttura. I tipi di verifica dipendono infatti dalla tipologia strutturale e dalla classe d'uso di appartenenza.

Le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite (2.4.2 “classi d'uso”, NTC18):

- Classe I: costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.
- Classe II: costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
- Classe III: costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
- Classe IV: costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”, e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

2.3 Spettro di risposta sismica orizzontale e spettro verticale in base a quanto prescritto dalle Norme Tecniche sulle costruzioni

L'azione sismica è caratterizzata da 3 componenti traslazionali, due orizzontali contrassegnate da X ed Y ed una verticale contrassegnata da Z, da considerare tra di loro indipendenti (3.2.3 “Valutazione dell'azione sismica”, NTC18).

Le componenti possono essere descritte mediante una delle seguenti rappresentazioni:

- Accelerazione massima in superficie;
- Accelerazione massima e relativo spettro di risposta in superficie;
- Storia temporale del moto del terreno.

2.3.1 Espressioni per il calcolo dello spettro di risposta delle componenti orizzontali

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$\begin{array}{l|l}
 0 \leq T < T_B & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \\
 T_C \leq T < T_D & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)
 \end{array}$$

Figura 2.5: Espressioni per il calcolo dello spettro di risposta orizzontale (3.2.3.2.1, NTC18).

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_g \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Figura 2.6: Espressioni dei parametri dipendenti, componente orizzontale.

Nelle quali (3.2.3.2.1, “Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali”, NTC18):

-T è il periodo proprio di vibrazione;

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

$$S = S_S \cdot S_T$$

essendo S_S il coefficiente di amplificazione stratigrafica (vedi Tab. 2.7) e S_T il coefficiente di amplificazione topografica (vedi Tab. 2.8);

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

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

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

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

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

$$T_C = C_C \cdot T^*_C$$

dove: T^*_C è il valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale e C_C è un coefficiente funzione della categoria di sottosuolo (vedi Tab. 2.7);

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

$$T_B = T_C / 3$$

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

$$T_D = 4,0 \cdot \frac{a_g}{g} + 1,6$$

Amplificazione stratigrafica

Per sottosuolo di categoria A i coefficienti S_S e C_C valgono 1. Per le categorie di sottosuolo B, C, D ed E i coefficienti S_S e C_C possono essere calcolati, in funzione dei valori di a_g , F_o e T^*_C relativi al sottosuolo di categoria A, mediante le espressioni fornite nella Tab. 2.7 dalle NTC18, nelle quali $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

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

Tabella 2.7: Espressioni di calcolo dei coefficienti S_S e di C_C (3.2.3.2.1, Tab 3.2.IV delle NTC18).

Amplificazione topografica

Per tener conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T riportati nella Tab. 3.2.V delle NTC18, in funzione delle categorie topografiche e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento.

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Tabella 2.8: Valori del coefficiente di amplificazione topografica S_T (3.2.3.2.1, Tab 3.2.V delle NTC18).

2.3.2 Espressioni per il calcolo dello spettro di risposta sismica della componente verticale

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)

$$\begin{array}{l|l}
 0 \leq T < T_B & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \\
 T_C \leq T < T_D & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)
 \end{array}$$

Figura 2.9: Espressioni per il calcolo dello spettro di risposta verticale (3.2.3.2.2, NTC18)

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_s \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_o \cdot \left(\frac{a_g}{g} \right)^{0,5} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

Figura 2.10: Espressioni dei parametri dipendenti, componente verticale

nelle quali (3.2.3.2.2 “Spettro di risposta elastico in accelerazione della componente verticale”, NTC18):

-T è il periodo proprio di vibrazione (in direzione verticale);

-F_v è il fattore che quantifica l’amplificazione spettrale massima, in termini di accelerazione orizzontale massima del terreno a_g su sito di riferimento rigido orizzontale, mediante la relazione:

$$F_v = 1,35 \cdot F_o \cdot \left(\frac{a_g}{g} \right)^{0,5}$$

I valori di a_g, F_o, S, η sono definiti sopra per le componenti orizzontali del moto sismico; i valori di S_s, T_B, T_C e T_D, salvo più accurate determinazioni, sono riportati nella Tab. 2.11.

Categoria di sottosuolo	S_S	T_B	T_C	T_D
A, B, C, D, E	1,0	0,05 s	0,15 s	1,0 s

Tabella 2.11: Valori dei parametri S_S , T_B , T_C e T_D della componente verticale (3.2.3.2.2, Tab. 3.2.VI. delle NTC18).

Mentre lo spettro di risposta sismica orizzontale aumenta gradualmente passando da una categoria di sottosuolo di tipo A (spettro più basso) ad una categoria di sottosuolo tipo D (spettro più gravoso), come ben visibile dalle formule riportate in precedenza, lo spettro verticale non dipende dalle categorie di sottosuolo. Dall'analisi delle formule sopra indicate infatti, il coefficiente di amplificazione stratigrafica S_S risulta sempre uguale a 1 indipendentemente dalla qualità dei terreni espressa dalla categoria di sottosuolo.

2.4 Quando progettare con la verifica della componente verticale

Le Norme Tecniche per le costruzioni nella maggior parte dei casi, non prescrivono di verificare l'edificio agli stati limite per la componente verticale ma solo per quella orizzontale del sisma. L'azione sismica, pertanto, viene calcolata attraverso uno spettro orizzontale. I casi per i quali le NTC obbligano a prendere in considerazione la componente verticale per la verifica delle strutture, risultano molto particolari ed estremi da un punto di vista progettuale. L'ingegnere può omettere la verifica dell'edificio per la componente verticale per quanto riguarda la progettazione di edifici comuni di civile abitazione (classe d'uso 2, coefficiente d'uso 1) e quindi nella maggior parte delle situazioni. Nello specifico, la normativa esclude la verifica della componente verticale in zone aventi una bassa pericolosità sismica (a_g inferiore a 0.15 g (3.2.3.1 "Descrizione del moto sismico in superficie e sul piano di fondazione", NTC18). La stessa normativa obbliga di verificare l'edificio per la componente verticale del sisma (7.2.2 "Criteri generali di progettazione dei sistemi strutturali", NTC18) quando vi sono situazioni estreme come, ad esempio, elementi orizzontali con luce superiore a 20 m, elementi a mensola di luce superiore a 4 m, pilasti in falso, edifici con piani sospesi, ponti e costruzioni con isolatori sismici.



Figura 2.12/2.13: Immagini di tipologie progettuali per le quali è obbligatorio verificare la componente verticale del sisma.

2.5 Determinazione degli spettri di risposta sismica orizzontale e verticale relativi ad un sito della rete accelerometrica, applicando quanto prescritto dalla normativa tecnica

Nello specifico, a titolo esemplificativo, si prende in esame il sito di Perugia, che coincide con l'osservatorio sismico "A.Bina", situato presso la basilica di San Pietro (con coordinate (lat, lon) 43.10127, 12.39549). Per la determinazione degli spettri di risposta si utilizza il software "Spettri di risposta" ver. 1.0.3 realizzato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Tale software determina i parametri di pericolosità sismica in base all'allegato B che le attuali norme tecniche 17/01/18 richiamano dalla precedente versione NTC 14/01/08. I parametri di input risultano essere: le coordinate geografiche del sito (ED 50), il valore di vita nominale dell'opera in progetto, la classe d'uso, lo stato limite, la categoria di sottosuolo e la categoria topografica. In questo esempio viene preso in considerazione lo spettro di risposta relativo allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), utilizzando una classe d'uso 2 ed una vita nominale di 50 anni.



Figura 2.14: Schermata di introduzione del foglio di calcolo “Spettri di risposta” realizzato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il foglio di calcolo permette di definire gli spettri di risposta in tre fasi:

- Fase 1: consente di individuare la pericolosità del sito su un qualunque punto del territorio italiano tramite l’inserimento delle coordinate in ED 50. In Italia la “pericolosità sismica di base” è stata determinata su tutto il territorio nazionale dall’INGV con il progetto INGV-DPC S1 attraverso un reticolo che ricopre tutto il territorio nazionale. Le Norme Tecniche utilizzano gli stessi nodi su cui sono state condotte le stime di pericolosità sismica da parte di INGV. Le coordinate e l’identificatore dei nodi (ID) coincidono. Rispetto al numero di dati pubblicati da INGV (circa 16000 nodi), le Norme hanno ridotto le aree in mare e riportano poco più di 10000 nodi (INGV, 2009). Per ogni nodo sono stati calcolati i parametri che descrivono in maniera esaustiva la pericolosità sismica (a_g , F_0 , T_c^*) per diversi valori del periodo di ritorno T_R , per i punti interni i parametri si ricavano con una media tra i 4 vertici pesata in funzione delle distanze. Nel caso del sito di Perugia qui preso in considerazione, le coordinate geografiche WGS 84 di partenza risultano essere (Lat, Lon) 43.10127, 12.39549 che, una volta trasformate nel sistema ED 50 diventano Lat: 43.102234, Lon: 12.396436.



Figura 2.15: Schermata della Fase 1.

- Fase 2: si inseriscono il valore di vita nominale (V_N), inteso come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata (Iervolino, Cosenza e Galasso, 2009) e il coefficiente d'uso (C_U). Quest'ultimo è determinato in base alle classi d'uso, con riferimento alle conseguenze di un eventuale interruzione di operatività della struttura o collasso.

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Tabella 2.16: Valori minimi di Vita nominale per le diverse tipologie di costruzioni (2.4.1, tab. 2.4.I dalle NTC18).

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 2.17: Valori del coefficiente di uso (2.4.3, tab. 2.4.II dalle NTC18)

Tra i valori di progetto è necessario inserire il periodo di riferimento per la costruzione (V_R) che si ricava moltiplicando la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

e il periodo di ritorno per la definizione dell'azione sismica (T_R).

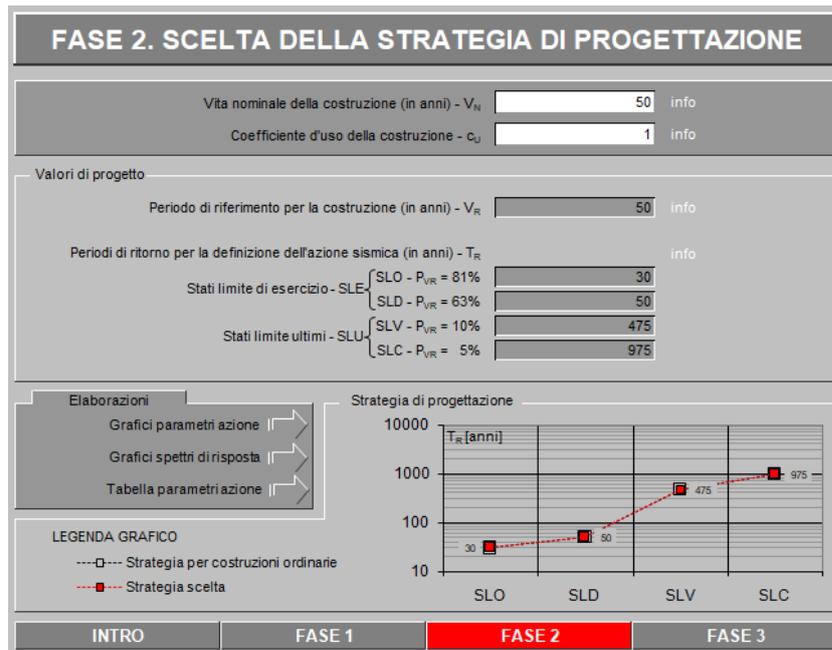


Figura 2.18: Schermata della Fase 2

- Fase 3: in seguito all'inserimento della categoria di sottosuolo (di tipo B nel caso preso in esame) e della categoria topografica, il software determina gli spettri di risposta sismica per lo stato limite considerato (SLV) che sono gli spettri di progetto riferiti alla componente orizzontale e a quella verticale e lo spettro elastico di riferimento per un suolo di categoria A.

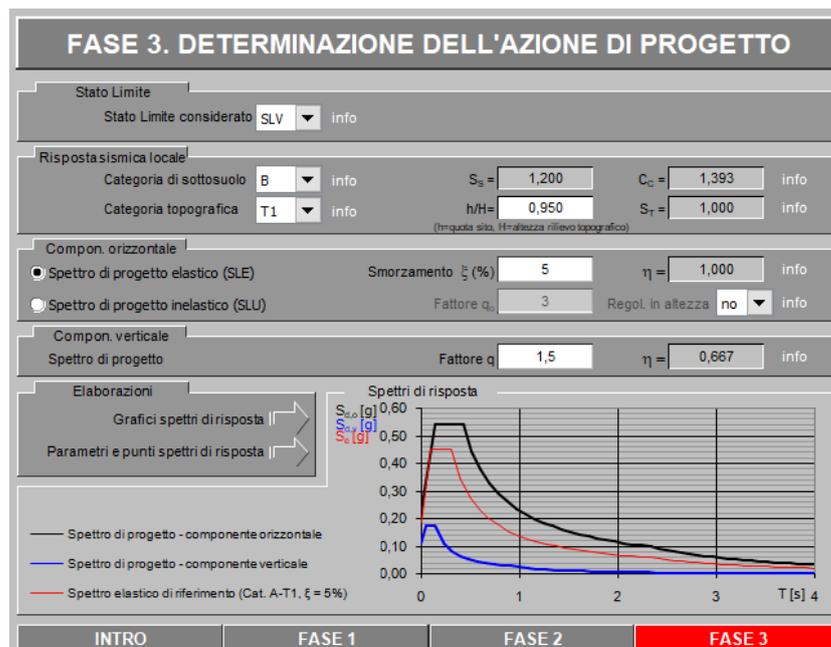


Foto 2.19: Schermata della Fase 3, determinazione dell'azione di progetto.

Spettro di risposta

Lo spettro di risposta elastico in termini di accelerazione è un grafico che riporta, in funzione del periodo naturale di vibrazione di una costruzione ipotizzata a comportamento indefinitamente elastico, l'accelerazione massima che subirà quando sarà investita da un evento sismico con una data probabilità di accadimento (De Pisapia, 2019). È espresso da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicata per il valore della accelerazione orizzontale massima attesa a_g su sito di riferimento rigido orizzontale. Per accelerazione massima attesa s'intende il picco del segnale che ha una certa probabilità, P_{VR} , di essere superato in un periodo di riferimento V_R (Iervolino, Cosenza e Galasso, 2009). Sia la forma spettrale che il valore di a_g variano al variare della probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} . Gli spettri così definiti possono essere utilizzati per strutture con periodo fondamentale minore o uguale a 4,0 s. Per strutture con periodi fondamentali superiori lo spettro deve essere definito da apposite analisi ovvero l'azione sismica deve essere descritta mediante accelerogrammi. Conoscendo solo il periodo di vibrazione della costruzione e le masse degli impalcati, ci permetterà di valutare l'azione sismica massima che la struttura dovrà essere in grado di sopportare. Il valore del periodo di vibrazione a sua volta dipende da com'è stata concepita la struttura, dalla rigidità e dalla massa dell'edificio.

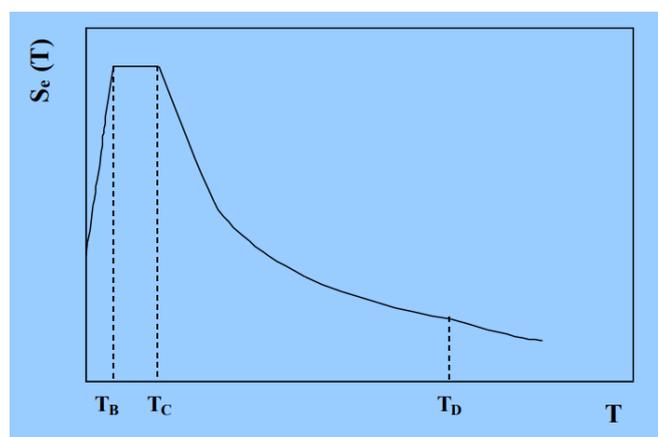


Figura 2.20: Schematizzazione di uno spettro di risposta.

Gli spettri da normativa dipendono da parametri indipendenti a_g, T_C^*, F_0 dati dalla norma, altri ξ fissati dal progettista e T_B, T_C, T_D, S_S, S_T dipendenti dai precedenti. Lo spettro con forma standard (NTC 2018) è costituito da un ramo con accelerazione crescente lineare (da 0 a T_B), un ramo ad accelerazione costante da (T_B a T_C), ed un ramo in cui l'accelerazione decresce con $1/T$ e quindi con velocità costante.

- T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, determinato mediante la relazione:

$$T_C = C_C \cdot T_C^*$$

- T_B periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante, determinato mediante la relazione:

$$T_B = T_C / 3$$

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

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6$$

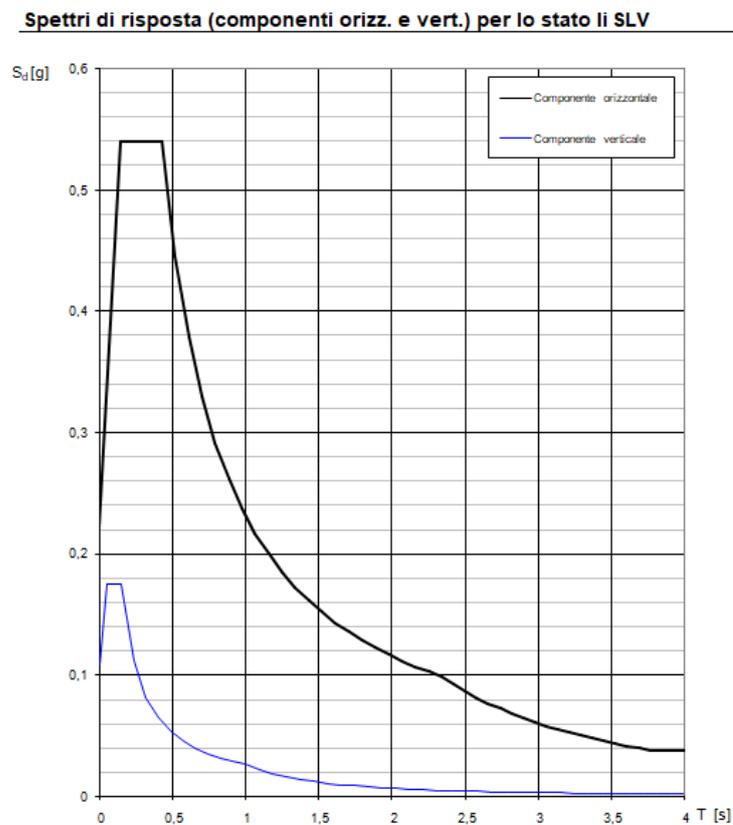


Figura 2.21: Spettro di risposta verticale ed orizzontale per il sito di Perugia. Categoria di sottosuolo B.

In riferimento alla determinazione dello spettro di risposta sismica verticale accennato in precedenza, mantenendo come esempio il sito di Perugia, si noti come modificando la categoria di sottosuolo nel foglio di calcolo si ha una variazione dello spettro di risposta della componente orizzontale, che aumenta man mano che si passa da una categoria A ad una D, a differenza di quello della componente verticale che risulta invariato per ogni categoria di sottosuolo.

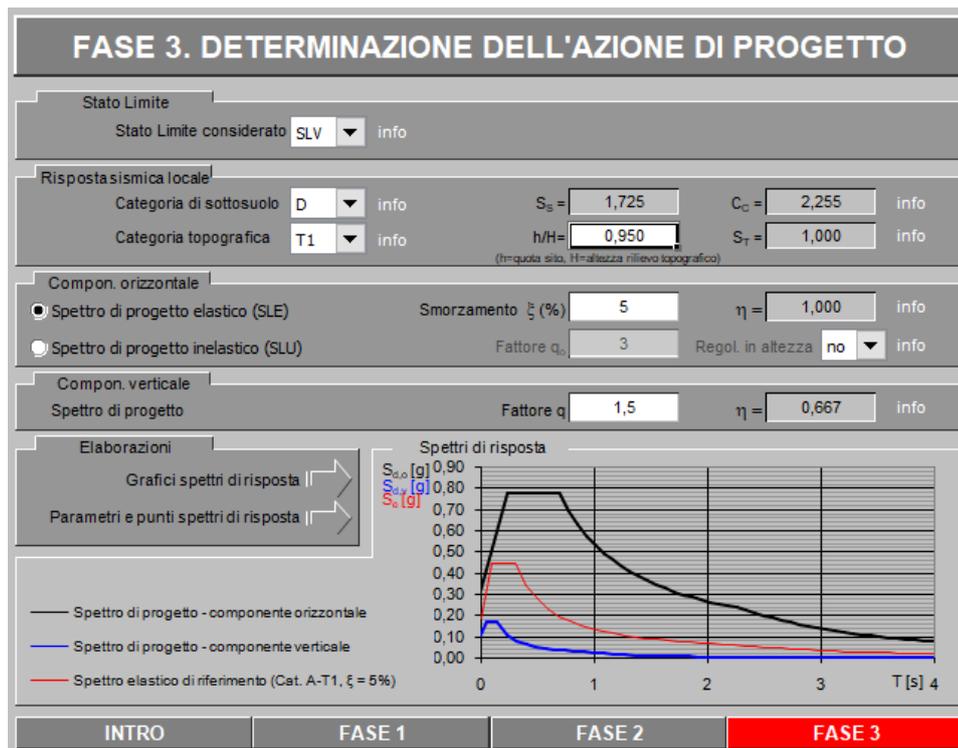


Figura 2.22: Esempio della variazione dello spettro orizzontale con il cambiamento della categoria di sottosuolo.

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato lim SLV

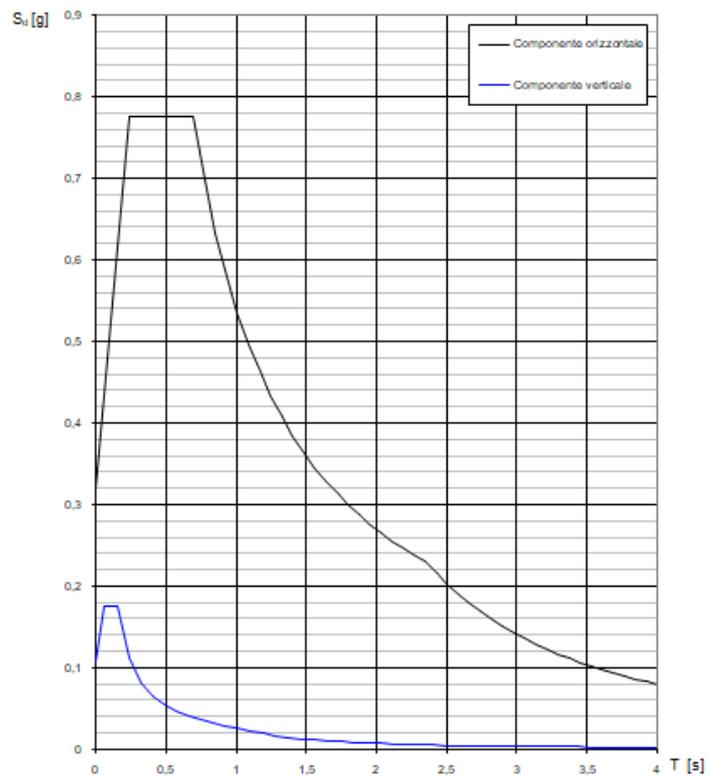


Figura 2.23: Spettro di risposta verticale ed orizzontale per il sito di Perugia. Categoria di sottosuolo D.

3

Effetti reali dell'azione della componente accelerometrica verticale del sisma

3.1 Concetto di rischio sismico

Ridurre il rischio sismico attraverso la prevenzione risulta essere un investimento estremamente conveniente sia dal punto di vista della salvaguardia della vita umana (anche con l'aumento dei livelli di protezione a livello della consapevolezza del rischio e dei comportamenti corretti da adottare in caso di sisma) sia dei costi della gestione delle varie emergenze e ricostruzioni successive. Dato che non è possibile intervenire sull'intensità o sulla frequenza degli eventi sismici, ciò che risulta fattibile è il miglioramento delle caratteristiche strutturali e non strutturali degli edifici, con la calibrazione degli interventi rispetto alla pericolosità del sito ed alle prestazioni attese.

$$\text{RISCHIO SISMICO} = \text{Pericolosità} \times \text{Esposizione} \times \text{Vulnerabilità}$$

Dove:

- Pericolosità del sito (P): probabilità che in una determinata zona si verifichi un evento sismico che supera una determinata intensità in un determinato periodo di tempo;
- Esposizione (E) : misura (stima economica) della probabile perdita associata a tutto quanto è soggetto agli effetti del sisma: vite umane, valore economico, costi indotti per perdita di funzionalità, valore storico artistico, etc;
- Vulnerabilità sismica (V): misura della propensione a subire dei danni di tutto quanto è soggetto agli effetti del sisma: manufatti, reti tecnologiche, etc...

La conoscenza della pericolosità del territorio è necessaria per poter agire adeguatamente sulla riduzione della vulnerabilità e dell'esposizione e per questo risulta essere fondamentale conoscere lo stato e le caratteristiche delle costruzioni esistenti. L'Italia si distingue per un'elevata esposizione al rischio sismico: con la sola eccezione della Sardegna, l'intero territorio nazionale è classificato come "sismicamente rilevante", sebbene con diversi livelli di vulnerabilità (Rubino, 2019). I dissesti mostrati dagli edifici in occasione dei ricorrenti eventi sismici sul territorio italiano hanno confermato in generale l'alta vulnerabilità del patrimonio edilizio esistente, con particolare riferimento agli edifici residenziali dei nuclei storici. Pertanto l'analisi delle modalità di danneggiamento visibili negli edifici rappresenta un metodo per l'interpretazione delle reazioni delle costruzioni e una possibilità di previsione dell'eventuale risposta di manufatti assimilabili a quelli presi in considerazione. Tenendo conto di queste evidenze, intervenire con l'adeguamento delle strutture ai livelli di sicurezza moderni (oneroso in termini di progettazione e di esecuzione), attuare interventi di miglioramento (meno efficaci ma con costi minori) o intervenire localmente e/o attuare riparazioni per migliorare le condizioni dell'edificio sono provvedimenti essenziali per garantirne la sicurezza. Per quanto riguarda le nuove costruzioni, invece, la prevista agibilità anche a lungo termine dovrebbe essere garantita dall'applicazione delle normative tecniche e dalla corretta esecuzione dei lavori.

3.2 COMPONENTE VERTICALE: EVIDENZE DELLA SOTTOSTIMA DEL DANNO ATTESO

Per analizzare l'evidenza dell'azione della componente verticale è necessario osservare i danni presenti negli edifici in seguito agli eventi sismici. Qui di seguito vengono presi in esame alcuni edifici nella frazione di San Pellegrino di Norcia, zona epicentrale del terremoto del Centro Italia del 2016. Viene qui presa in considerazione la fenomenologia della sequenza sismica, ponendo particolare attenzione ai danneggiamenti riconducibili agli effetti della componente verticale. L'evento sismico del Centro Italia del 30 Ottobre 2016 ha evidenziato in alcuni fabbricati, anche di recente costruzione, una modalità di danneggiamento differente da casi precedenti.



Figura 3.1: Edifici lesionati presso la Frazione di San Pellegrino di Norcia, Ottobre 2016 (Comodini, Fagotti, Mezzi)

Non si osservano le tipiche lesioni visibili negli edifici colpiti da eventi sismici, i livelli più bassi, in alcuni casi, non sono particolarmente interessati dal danneggiamento. Il quadro fessurativo mostra chiaramente che non esclusivamente le componenti orizzontali hanno avuto luogo in questa zona. Le immagini qui di seguito permettono senza dubbio di osservare, soprattutto in corrispondenza del passaggio tra un piano e l'altro, delle superfici di scorrimento che si sono formate a causa della contemporaneità delle azioni orizzontali e quelle verticali (Mariani e Pugi, 2019). Quando l'azione della componente verticale ha un verso opposto alla gravità, genera una riduzione dei carichi e quindi, in generale, comporta una riduzione della soglia di resistenza degli elementi di un edificio.

L'elemento comune in tutti gli edifici riportati sono i piani di scorrimento situati nelle superfici di raccordo tra i piani. La causa è da ricercare nelle azioni sismiche verticali, ben superiori ai valori di norma, che hanno prodotto un decremento dei carichi assiali statici dei piani superiori, tali da produrre una riduzione della resistenza allo scorrimento nell'interpiano, sottoposto contemporaneamente anche all'azione delle accelerazioni orizzontali (Comodini, Fagotti e Mezzi, 2019).

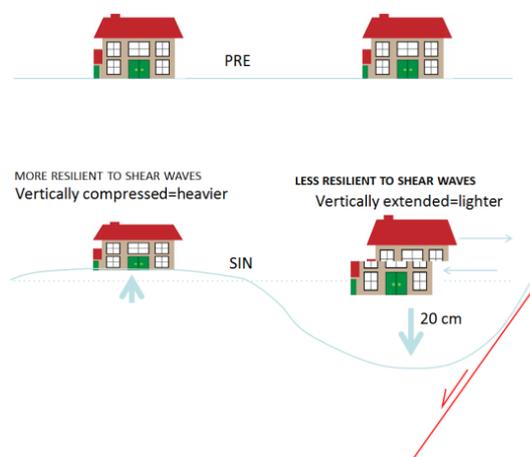


Figura 3.2: Schema del meccanismo di danneggiamento degli edifici a causa della combinazione dell'azione della componente verticale e delle orizzontali (prof. Carlo Doglioni, da rivista Ingenio, Mariani e Pugi).

Quando una tipologia edilizia ha mostrato sperimentalmente comportamenti riconoscibili per causa ed effetto per tutte le costruzioni con caratteristiche ed evidenze di danno comparabili, tali comportamenti divengono “attesi” e quindi devono necessariamente essere presi in considerazione ai fini della valutazione della sicurezza (Mariani e Pugi, 2019). Il comportamento strutturale atteso è la reazione che l'edificio sottoposto ad un certo tipo di azioni previste manifesterà, nel rispetto di quanto già in precedenza mostrato da configurazioni strutturali analoghe. Ai fini della valutazione della sicurezza, non considerare la componente verticale significa sottostimare il danno reale con la valutazione sbagliata del danno atteso.



Figura 3.3: Altri esempi di edifici lesionati presso la fraz. San Pellegrino di Norcia (Ing. Alessandro De Maria, da articolo di Ingenio, Mariani e Pugi).

Come gli edifici si comportano sotto l'influenza delle accelerazioni orizzontali e verticali è ormai certo dall'osservazione dei danni che hanno subito. Esso è dunque un comportamento "atteso", anche dal punto di vista degli effetti della componente verticale soprattutto nelle zone vicine alla sorgente sismica. Questa componente non può quindi essere ignorata nell'analisi di edifici situati in possibili zone di sorgente e risulta anche complicato prevedere con precisione la localizzazione di quali aree saranno coinvolte (Mariani e Pugi, 2019). Gli effetti delle componenti sismiche interessano quindi una vasta parte del patrimonio edilizio, dovuto al fatto che, come ben visibile nella mappa epicentrale della sequenza sismica di Amatrice-Visso-Norcia, gli eventi sismici sono caratterizzati da un'ampia variabilità delle coordinate geografiche degli epicentri.

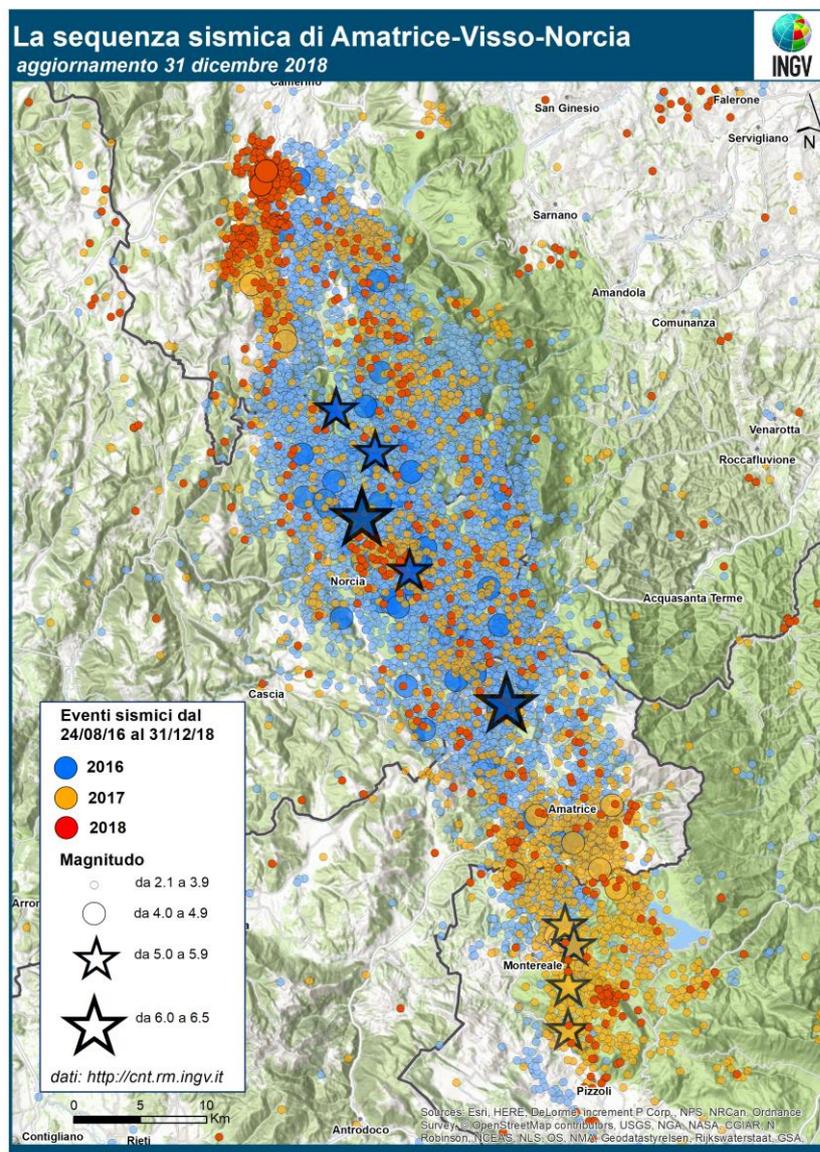


Figura 3.4. Mappa epicentrale relativa alla sequenza di Amatrice-Visso-Norcia. Da INGV.

4

Presentazione dei dati e risultati

4.1 Descrizione della rete accelerometrica Re.Si.R.

La rete accelerometrica Re.Si.R. consiste nel monitoraggio accelerometrico degli eventi sismici presso quattro stazioni situate nella regione Umbria e ha permesso di archiviare e rendere disponibili a tutti alcune centinaia di accelerogrammi naturali locali, utili per studi di risposta sismica locale e nell'ambito della progettazione di edifici. Questo progetto, nato da una collaborazione tra la Regione Umbria e l'Osservatorio Sismico "A. Bina", è iniziato nell'anno 2018 in modo sperimentale, per poi diventare ufficialmente operativo dall'inizio dell'anno 2019. Durante l'anno 2021 le stazioni accelerometriche hanno acquisito molte decine di accelerogrammi locali. Attraverso la Regione Umbria, tali dati vengono messi a disposizione di ingegneri progettisti, geologi, geofisici e addetti ai lavori nell'ambito della prevenzione del rischio sismico. La strumentazione accelerometrica è stata tarata in modo tale da consentire la registrazione sia di eventi con magnitudo contenuta, sia di forti terremoti (strong motion). Nella banca dati accelerometrici della Regione Umbria vengono inseriti generalmente, gli accelerogrammi di terremoti locali aventi magnitudo superiore a 2.5. Attraverso la modellazione numerica di accelerogrammi naturali è possibile risalire alla risposta sismica locale "reale". Tale fattore risulta di estrema utilità per lo studio del moto del terreno e per la definizione dei parametri progettuali (come prescritto dalle attuali Norme Tecniche sulle costruzioni - NTC 17/01/18). L'attività di monitoraggio ha, tra gli scopi, anche quello di contribuire alla riduzione del rischio sismico, alla tutela della pubblica incolumità ed alla prevenzione del rischio sismico.

I siti monitorati dalle stazioni accelerometriche della Re.Si.R. sono:

- Municipio di Città di Castello e attigua Cattedrale (stazione 2742);
- Abbazia di San Pietro in Perugia (stazione 2740);
- Istituto Scolastico Superiore di Giano dell'Umbria - Bastardo (stazione 2739);
- Zona urbanizzata presso Cascia (stazione 2741).

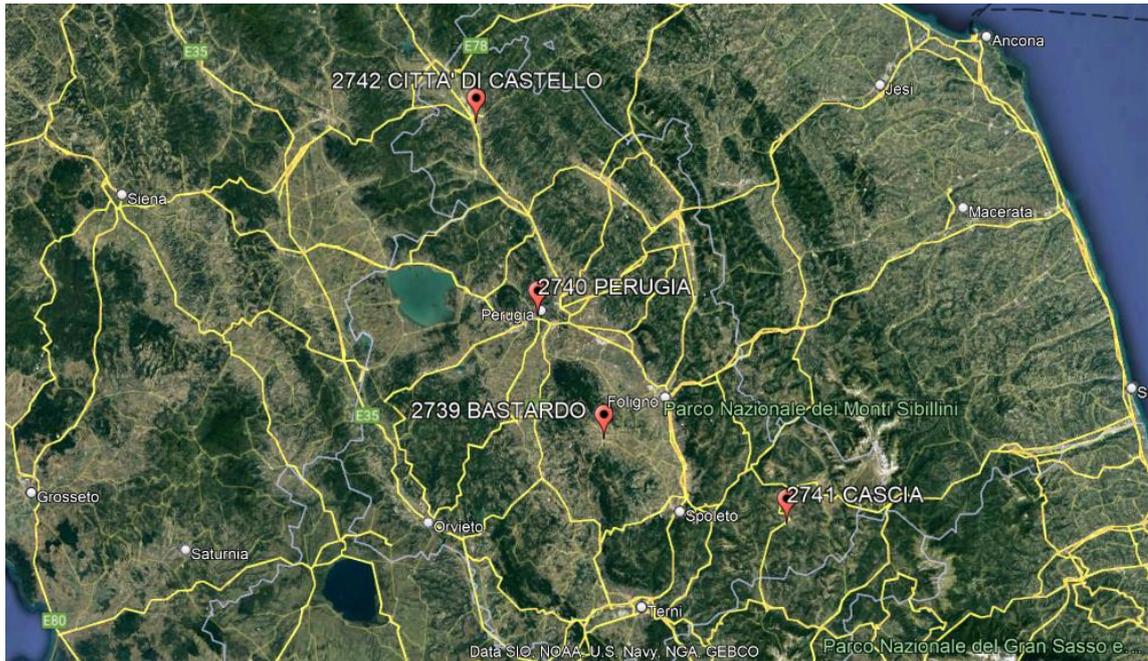


Figura 4.1: Localizzazione delle stazioni sismiche Re.Si.R. nel territorio umbro. Da Google Earth.

L'unità di misura delle accelerazioni è g (corrispondente a 9.81 m/s^2). Le n. 4 stazioni accelerometriche sono costituite dai medesimi componenti e sono impostate con gli stessi parametri di acquisizione. Ogni stazione ha lo stesso tipo di accelerometro (episensor). Ogni postazione è costituita dall'acquisitore (sismografo) da un sensore a tre componenti (accelerometro), da un'antenna GPS e da un apparato per la trasmissione dei dati dal sito di registrazione all'Osservatorio Sismico "A. Bina" (modem GSM con configurazione VPN). La rete viene gestita con il pacchetto software Seismowin, prodotto dalla ditta Sara Electronic Instruments. Si tratta di una serie di moduli utilizzati in ambito sismologico, geofisico ed ingegneristico. Alcuni moduli (Link, Log) gestiscono l'acquisizione del segnale digitale proveniente dalle stazioni accelerometriche remote e permettono l'analisi del dato e della sua memorizzazione in svariati formati standard. Il modulo Resp permette di calcolare la risposta strumentale e di memorizzarla. Il modulo Survey è utilizzabile per effettuare conversioni del segnale sismico in termini di velocità, accelerazione e spostamento. Il modulo Report permette di localizzare eventuali epicentri e di confrontare le localizzazioni con i dati ufficiali INGV. Il modulo Desk permette di convertire i valori di accelerazione in velocità e spostamento e di effettuare delle analisi spettrali del dato. Inoltre consente di convertire l'accelerogramma in diverse unità di misura (g , m/s^2 , cm/s^2 , ecc) e in diversi formati.

4.2 Scelta dei dati

Per analizzare la componente verticale dei sismi in funzione della distanza geografica della faglia di origine, in questo lavoro sono stati presi in considerazione esclusivamente accelerogrammi di terremoti recenti, che risalgono agli anni 2021, 2020, 2019, 2018 e di magnitudo superiore a 3.0. Vengono analizzate le accelerazioni al suolo registrate a distanze variabili dalla sorgente. Per la caratterizzazione del moto sismico in riferimento agli effetti della componente verticale, risulta indispensabile riferirsi ad eventi localizzati sia vicino alla sorgente, che lontano dalla stessa. I dati sono stati forniti dall' Osservatorio Sismico A.Bina attraverso la banca dati accelerometrici corrispondenti agli anni presi in considerazione. Per ogni evento sismico è stata seguita la stessa procedura per convertire i file nel programma di lettura. Qui viene riportato come esempio il terremoto avvenuto il 13 Ottobre 2021 di magnitudo 3.0 con epicentro a Norcia (coordinate 42.76, 13.08).

Dalla cartella di archiviazione dei dati (Collector da default) corrispondenti alle registrazioni accelerometriche degli eventi sismici, sono stati estratti i file di interesse e aperti con il modulo "Desk". Per ogni accelerogramma utilizzato viene ricavato il valore di PGA per ogni componente in mm/s^2 e convertito poi in g.

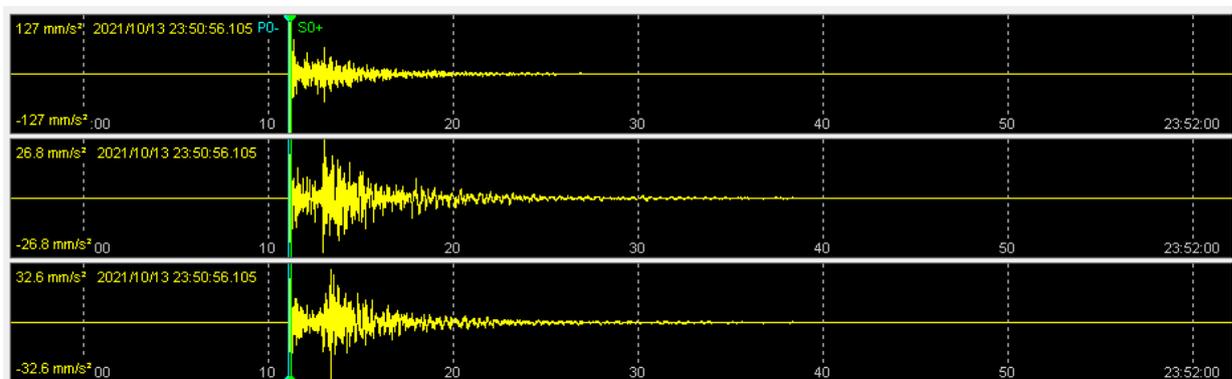


Figura 4.2: Esempio degli accelerogrammi delle tre componenti del sisma per il terremoto di Norcia con magnitudo 3.0 del 13/10/2021. Modulo Desk.

In seguito, sapendo il giorno e l'orario preciso dell'evento sismico, attraverso il sito dell'INGV, con una ricerca mirata è stato possibile risalire alle coordinate per la localizzazione dell'evento sismico. Queste sono state poi inserite nel programma "Google Earth", dal quale è stata calcolata la distanza che intercorre tra l'epicentro e la stazione sismica, che nel caso in esempio corrisponde a 7 Km.

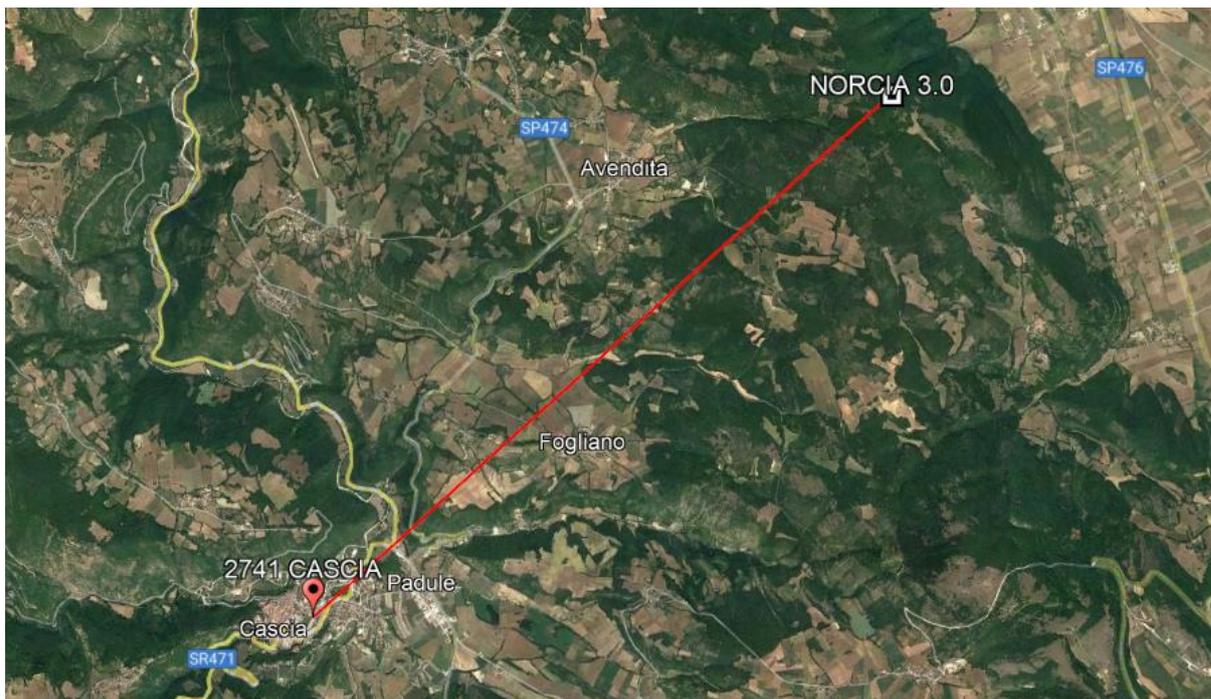


Figura 4.3: Esempio del calcolo della distanza tra epicentro e la stazione sismica di Cascia per il terremoto di Norcia con magnitudo 3.0 del 13/10/2021. Da Google Earth.

Tra le quattro stazioni sismiche della rete Re.Si.R. quella di Cascia ha registrato eventi sismici con distanza minore rispetto alle altre e risulta essere la stazione che ha registrato per prima gli impulsi della maggior parte degli eventi sismici. Ciò è dovuto al fatto che il sito si trova nella zona più sismica dell'Umbria in questo periodo storico. Per queste motivazioni nell'analisi dei dati sono stati presi in considerazione principalmente gli accelerogrammi riferiti a questa località.

4.2.1. Sito di Cascia

Le distanze epicentrali dei dati disponibili vanno dai 7 km ai 198 Km. Questo range relativamente ampio ha consentito di poter analizzare l'andamento delle componenti del sisma, con particolare attenzione a quella verticale, su molteplici distanze. I dati sono stati classificati in riferimento alla distanza. Sono state riportate le accelerazioni delle tre componenti del sisma in g per poi individuare la componente con valori di PGA maggiori. In totale sono stati analizzati circa cento accelerogrammi.

Terremoto	Magnitudo	Distanza (Km)	PGA - Componente verticale (g)	PGA - Componente orizzontale N-S (g)	PGA - Componente orizzontale E-W (g)
NORCIA	3.0	7	0,012946	0,002732	0,003323
NORCIA	3.1	7,14	0,004429	0,00289	0,002316
NORCIA	3.3	8,67	0,010375	0,008014	0,009408
NORCIA	3.0	9,22	0,002213	0,001201	0,001989
NORCIA	3.0	12,23	0,00117	0,001439	0,001285
NORCIA	4.0	12,93	0,01184	0,00863	0,0097
NORCIA	3.0	13,3	0,002217	0,000942	0,001226
CITTAREALE	3.5	13,8	0,01	0,00528	0,004036
NORCIA	3.0	13,93	0,001843	0,001061	0,00147
PRECI	3.0	17,34	0,002032	0,000931	0,001162
ACCUMOLI	3.3	19,13	0,002842	0,002331	0,002777
AMATRICE	3.1	24,41	0,000732	0,00034	0,000412
VISSO	3.7	24,76	0,006962	0,00674822	0,007146
CASTELSANTANGELO SUL NERA	3.1	25,69	0,000617	0,00048	0,000698
CAMPOTOSTO	3.0	31,89	0,000548	0,000388	0,000342
ACQUASANTA TERME	3.1	33,82	0,000308	0,000171	0,000168
FIASTRA	3.0	34,36	0,000016	0,00001	0,000006
FIORDIMONTE	3.3	34,69	0,001214	0,000605	0,001042
BARETE	3.8	34,79	0,003763	0,00384	0,004514
BARETE	3.4	34,97	0,001261	0,001223	0,001261
AMANDOLA	3.3	37,35	0,000842	0,000525	0,000606
AMANDOLA	3.4	37,44	0,001481	0,000843	0,001007
MASSA MARTANA	3.5	37,72	0,000475	0,000294	0,000357
FIORDIMONTE	3.1	37,86	0,000419	0,00026	0,000285
MONTEFALCO	3.2	38,35	0,00019	0,000194	0,000165
SARNANO	3.2	40,61	0,000166	0,00021	0,000214
CESSAPALOMBO	3.0	43,58	0,000215	0,000222	0,000288
CERRETO D'ESI	3.1	72,23	0,0002	0,000172	0,000223
MONTE URBINO	3.0	73,94	0,000073	0,000057	0,00007
GUBBIO	3.0	81,33	0,000022	0,000032	0,000026
CETONA	3.4	56,62	0,000068	0,000092	0,000091
CARTOCETO	4.1	117,11	0,000391	0,000753	0,000633
SCARPERIA E SAN PIERO	4.5	198,45	0,000032	0,000073	0,001261

Figura 4.4: Terremoti e relativi valori di PGA analizzati per il sito di Cascia.

4.2.1.1. Analisi dei dati: valori di PGA

Dalla lettura dei dati analizzati si evince che ogni sisma ha prodotto accelerazioni verticali dello stesso ordine di grandezza rispetto a quelle orizzontali. E' importante notare che i valori di PGA della componente verticale sono superiori a quelli delle componenti orizzontali in vari eventi sismici, soprattutto in quei casi in cui le stazioni accelerometriche risultano vicine all'epicentro. I valori di PGA sono stati riportati in un grafico a istogramma così da rendere immediato il confronto tra le varie componenti. Nell'asse delle ordinate i dati inseriti sono i valori in g della PGA di ogni componente mentre nell'asse delle ascisse figurano le distanze in Km degli epicentri rispetto alla stazione di Cascia.

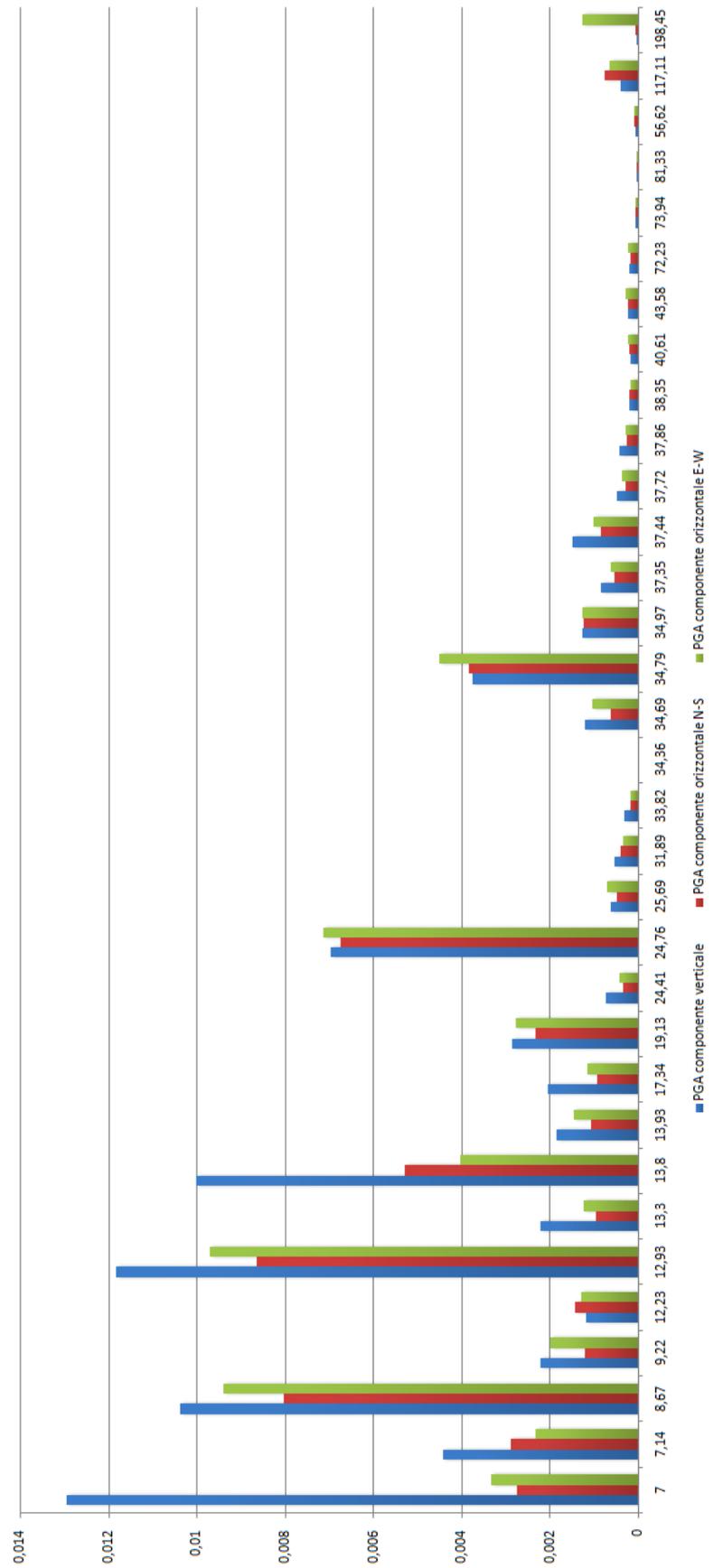


Figura 4.5: Grafico di confronto dei valori di PGA delle tre componenti del sisma per i dati analizzati riguardo il sito di Cascia.

Nel caso del terremoto più vicino (distanza di 7 Km), i valori di PGA registrati dalle due componenti orizzontali N-S ed E-W ($26,8 \text{ mm/s}^2$ e $32,6 \text{ mm/s}^2$) risultano nettamente inferiori rispetto alla componente massima fatta registrare dalla componente verticale ($127,0 \text{ mm/s}^2$). In tale situazione quindi, la componente verticale risulta circa 4 volte superiore rispetto a quella orizzontale.

Nel caso di terremoti più lontani (es. 117,11 Km), invece, i valori massimi di accelerazione corrispondenti alle due componenti orizzontali N-S ed E-W ($7,39 \text{ mm/s}^2$ e $6,21 \text{ mm/s}^2$) risultano nettamente superiori (di circa il doppio) rispetto alla componente verticale ($3,84 \text{ mm/s}^2$).

Analizzando l'andamento dei valori di PGA in relazione alla distanza, è possibile affermare che l'influenza della componente verticale è predominante (o comunque non trascurabile) entro i primi 20 Km circa. In quasi tutti gli accelerogrammi registrati entro 20 km dall'epicentro, la componente verticale del sisma ha avuto valori di picco dell'accelerazione superiori alle componenti orizzontali. Come si deduce dal capitolo precedente, la combinazione delle tre componenti nella sfera del pratico ha effetti reali nelle costruzioni esistenti.

Pur evidenziando la massima influenza nei primi chilometri, la componente verticale risulta comunque non trascurabile almeno fino a 40 km. Il rapporto tra il valore di PGA della componente verticale e quello massimo registrato tra le due componenti orizzontali risulta essere elevato per gli eventi sismici molto vicini al punto di sorgente e relativamente costante (con valori che si aggirano a 1,5) fino a 40 Km circa, per poi diminuire per distanze maggiori.

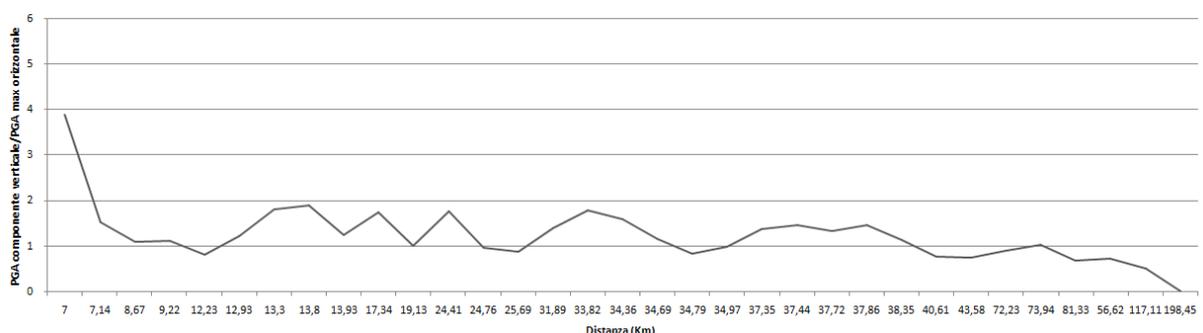


Figura 4.6: Grafico andamento del rapporto tra i valori di PGA della componente verticale e il valore massimo di PGA tra le componenti orizzontali in base alle distanze dalla stazione di Cascia.

4.2.1.2. Analisi dei dati: componente verticale in termini di frequenza

Come è stato visto nel paragrafo precedente, dai dati ottenuti delle stazioni accelerometriche Re.Si.R. emerge che, in molti casi, la componente verticale del sisma risulta dello stesso ordine di grandezza di quella orizzontale, sia in termini di picco massimo di accelerazione (PGA) che, come vedremo, in termini di contenuto in frequenza. Quest'ultima affermazione risulta di particolare interesse in quanto la componente accelerometrica verticale viene considerata a livello ingegneristico (come appare evidente nelle NTC attuali) estremamente impulsiva o, comunque, povera di frequenze capaci di interferire pesantemente con gli edifici. Per verificare questo aspetto si è proceduto ad effettuare un'analisi qualitativa dello spettro di Fourier per ogni componente accelerometrica del sisma. Tale analisi è stata svolta in tre differenti eventi sismici: Norcia 3.0 (13 Ottobre 2021), Visso 3.7 (18 Ottobre 2021), Cartoceto 4.1 (29 Ottobre 2021).

- Terremoto con epicentro presso Norcia di magnitudo 3.0 del 13 Ottobre 2021;

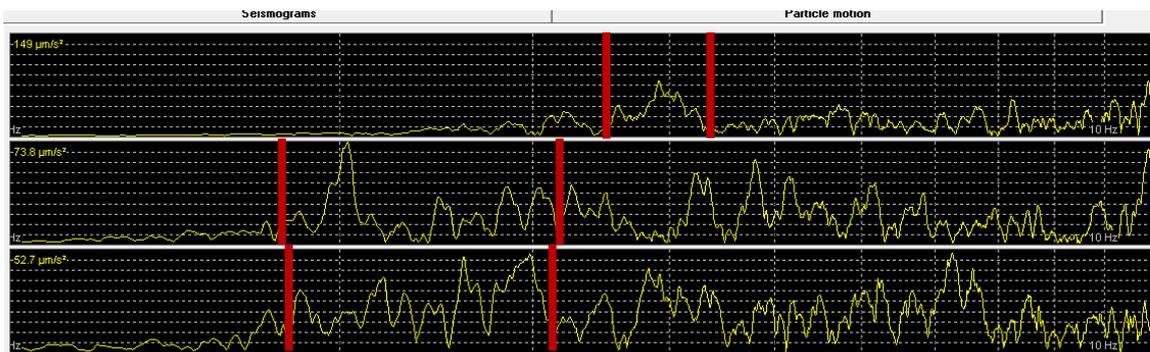


Figura 4.7: Spettri di Fourier per le tre componenti del sisma di Norcia del 13/10/2021.

- Terremoto con epicentro presso Visso di magnitudo 3.7 del 18 Ottobre 2021;

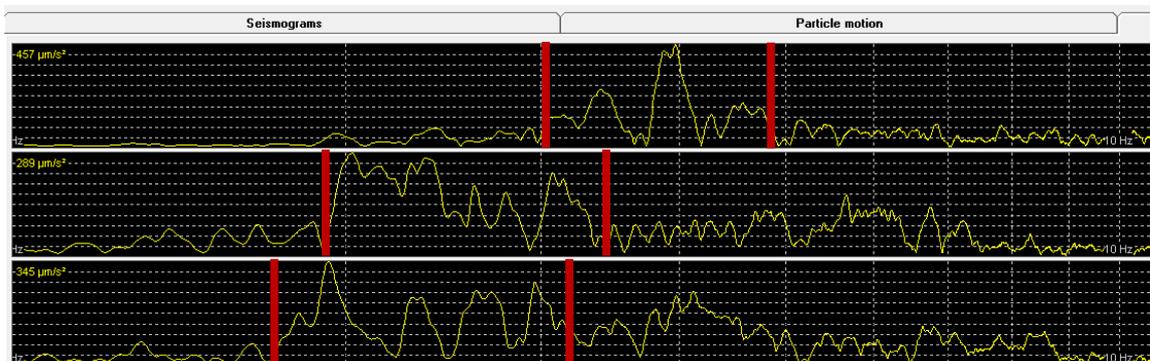


Figura 4.8: Spettri di Fourier per le tre componenti del sisma di Visso del 18/10/2021.

- Terremoto con epicentro presso Cartoceto di magnitudo 4.1 del 29 Ottobre 2021.



Figura 4.9: Spettri di Fourier per le tre componenti del sisma di Cartoceto del 29/10/2021.

Gli eventi presi in esame sono di sismi con valori differenti di magnitudo (3.0, 3.7, 4.1) e con distanze variabili (7 Km dall'epicentro di Norcia, 27,76 Km da Visso e 117,11 da Cartoceto). Dai risultati emersi dall'analisi degli spettri è stato possibile dimostrare che il contenuto in frequenza della componente verticale risulta avere una banda di ampiezza simile rispetto alla banda delle frequenze delle componenti orizzontali anche se "più stretta". Tale banda, pertanto, non risulta impulsiva e quindi trascurabile, come riportato nelle NTC. Un altro risultato emerso è che la banda di frequenza della componente accelerometrica verticale risulta spostata verso frequenze più alte, dell'ordine dei 4/5 Hz nei casi analizzati, rispetto alle componenti orizzontali che si stabilizzano su valori più bassi. I valori delle frequenze degli accelerogrammi verticali risultano pertanto corrispondere alle frequenze di risonanza di edifici comuni nelle zone del cratere sismico 2016. Gli edifici con tali frequenze corrispondono a quelli costituiti da due piani e con la presenza del sottotetto, per un totale di circa 8 m di altezza. Fabbricati con queste connotazioni trovano una piena corrispondenza negli esempi riportati nel capitolo precedente e risultano essere tipologie di costruzioni comuni in tutte le aree del centro Italia caratterizzate da forti eventi sismici. È necessario quindi, considerare la reale natura degli spettri di frequenza della componente verticale del sisma, per non sottostimare le reali conseguenze che si potrebbero verificare nei centri abitati situati in zone altamente sismiche.

4.2.2. Altri siti della rete Re.Si.R.

Per le stazioni sismiche di Città di Castello, Giano dell'Umbria - Bastardo e Perugia il numero di accelerogrammi disponibili sono stati di numero inferiore rispetto a quelli acquisiti dal sito di Cascia e non si sono verificati eventi sismici con distanze contenute rispetto ai punti di collocazione delle tre stazioni. I valori di PGA delle tre componenti sono stati comunque analizzati con le stesse modalità che sono state seguite per il sito di Cascia. Dall'analisi dei dati si è ottenuto che i valori di PGA della componente verticale risultano essere di grandezza inferiore rispetto a quelli delle orizzontali per quasi tutti gli eventi sismici. Il rapporto tra il valore di PGA della componente verticale e il valore massimo di PGA tra le orizzontali si mantiene costante sotto al valore di 1 per tutti e tre i siti. Solo per la stazione di Giano dell'Umbria - Bastardo è presente un evento sismico con rapporto superiore al valore di 1 che non presenta comunque valori esemplari, anche data la contenuta entità delle magnitudo. La componente verticale non risulta notevolmente più elevata rispetto alle orizzontali, come era stato visto per brevi distanze presso il sito di Cascia. L'unico dato con distanza inferiore a 27 Km è stato acquisito dalla stazione di Giano dell'Umbria – Bastardo e presenta per la componente verticale un valore che corrisponde alla metà rispetto a quello della componente orizzontale. Da queste osservazioni si evince che l'entità della componente verticale sembra essere dipendente dal sito interessato dall'evento sismico, e quindi che le caratteristiche topografiche influiscono sulla predominanza di una componente rispetto ad un'altra. Sarebbe necessario ampliare l'analisi degli accelerogrammi su altri siti con distanze dagli epicentri contenuti e su eventi con magnitudo di grande entità, come non è stato possibile procedere in questo lavoro data la mancata corrispondenza di eventi sismici notevoli e la collocazione delle stazioni sismiche della rete Re.Si.R. Gli effetti della componente verticale sembrano essere molto significativi su eventi sismici che si verificano ad una distanza contenuta rispetto all'epicentro, quindi i dati acquisiti dalle stazioni sismiche di Città di Castello, Giano dell'Umbria – Bastardo e Perugia non risultano essere molto rilevanti ai fini di questo studio. Vengono qui di seguito riportati i dati analizzati e i grafici corrispondenti delle tre località.

Città di Castello

Terremoto	Magnitudo	Distanza (Km)	PGA - Componente verticale (g)	PGA - Componente orizzontale N-S (g)	PGA - Componente orizzontale E-W
GUBBIO	3.0	27,21	0,000165	0,000215	0,000241
GUBBIO	3.0	28,2	0,000158	0,000195	0,000176
GUBBIO	3.9	28,55	0,000973	0,001893	0,00154
MONTE URBINO	3.1	29,8	0,001581	0,002021	0,00114
CERRETO D'ESI	3.1	62,71	0,000078	0,000108	0,000112
CETONA	3.4	64,09	0,000341	0,000461	0,000392
MONTEFALCO	3.2	68,49	0,000128	0,000178	0,000202
CESSAPALOMBO	3.0	87,66	0,000029	0,0000522	0,000043
AMANDOLA	3.4	100,98	0,000073	0,000098	0,000074

Figura 4.10: Terremoti e relativi valori di PGA analizzati per il sito di Città di Castello.

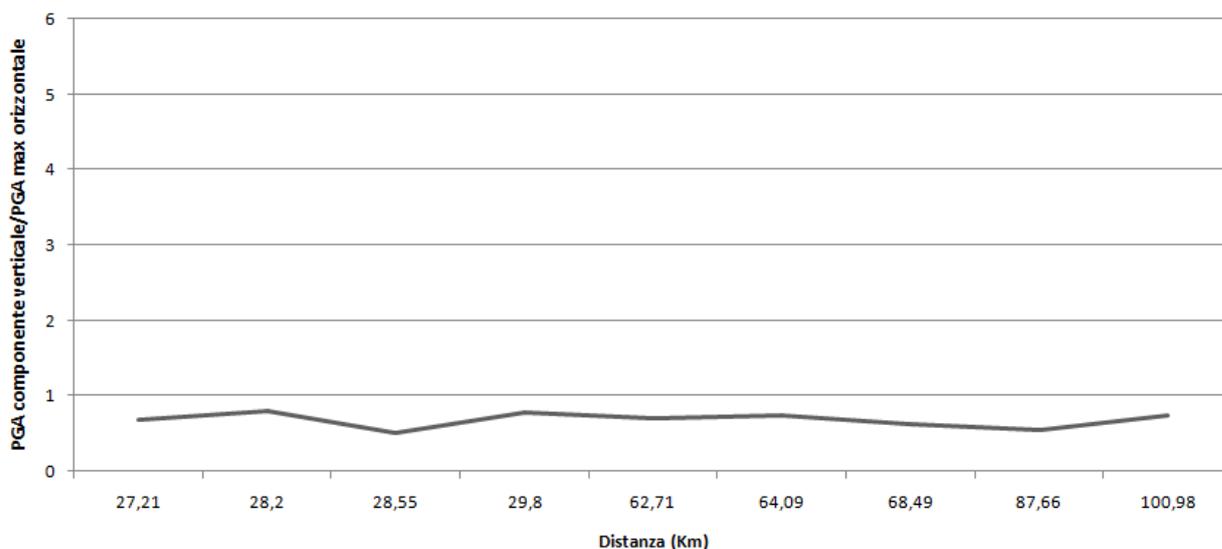


Figura 4.11: Grafico andamento del rapporto tra i valori di PGA della componente verticale e il valore massimo di PGA tra le componenti orizzontali in base alle distanze dalla stazione di Città di Castello.

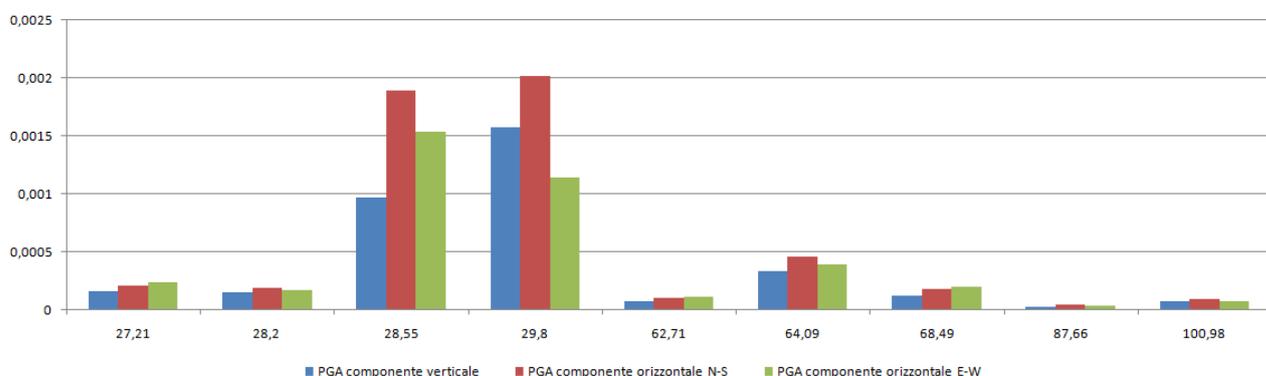


Figura 4.12: Grafico di confronto dei valori di PGA delle 3 componenti del sisma per i dati analizzati riguardo il sito di Città di Castello.

Giano dell'Umbria - Bastardo

Terremoto	Magnitudo	Distanza (Km)	PGA - Componente verticale (g)	PGA - Componente orizzontale N-S (g)	PGA - Componente orizzontale E-W (g)
MASSA MARTANA	3.5	12,95	0,002382	0,004655	0,005745
MONTE URBINO	3.0	42,53	0,000223	0,000234	0,000323
NORCIA	3.3	42,54	0,000356	0,000566	0,000823
NORCIA	3.0	44,24	0,000104	0,000177	0,000262
VISSO	3.7	45,47	0,000297	0,000554	0,000419
FIORDIMONTE	3.3	46,45	0,00019	0,000424	0,000562
NORCIA	4.0	47,31	0,002961	0,00529	0,00572
NORCIA	3.0	48,4	0,000184	0,000187	0,000206
FIORDIMONTE	3.1	49,61	0,000108	0,000108	0,000094
NORCIA	3.0	50,18	0,0001	0,000187	0,000223
CASTELSANTANGELO SUL NERA	3.1	52,2	0,000154	0,000153	0,000213
CITTAREALE	3.5	54,07	0,000233	0,000372	0,000432
GUBBIO	3.9	54,26	0,000294	0,000665	0,000893
CETONA	3.4	56,62	0,000109	0,000201	0,000221
AMANDOLA	3.4	61,42	0,000135	0,00025	0,000291
CERRETO D'ESI	3.1	65,64	0,000098	0,000121	0,000108
ACQUASANTA TERME	3.1	69,94	0,000148	0,000079	0,000091
BARETE	3.8	73,4	0,00028	0,000692	0,00059
BARETE	3.4	73,48	0,000078	0,000148	0,0002
SCARPERIA E SAN PIERO	4.5	160,99	0,00006	0,000114	0,000067

Figura 4.13: Terremoti e relativi valori di PGA analizzati per il sito di Bastardo

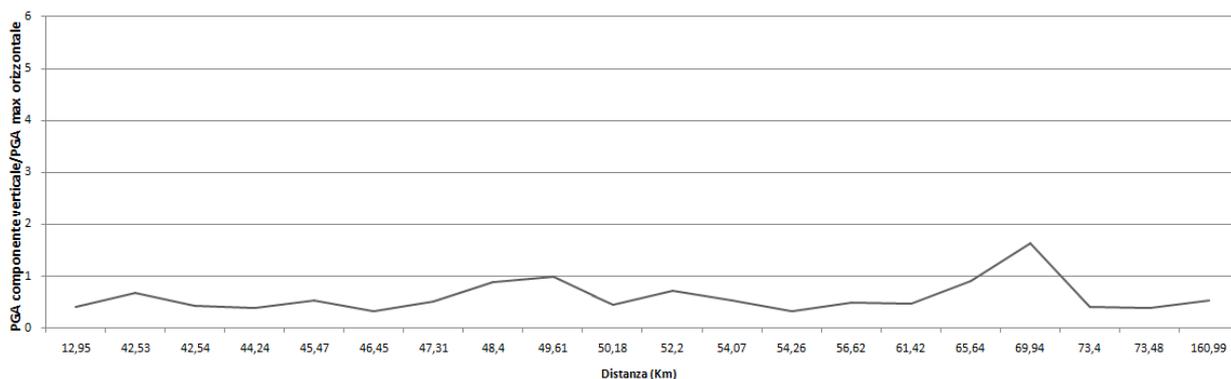


Figura 4.14: Grafico andamento del rapporto tra i valori di PGA della componente verticale e il valore massimo di PGA tra le componenti orizzontali in base alle distanze dalla stazione di Bastardo.

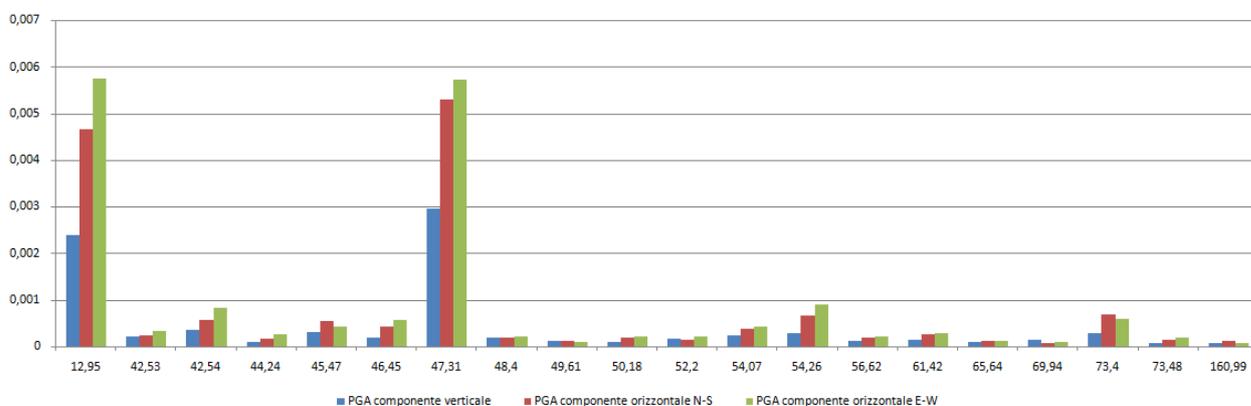


Figura 4.15: Grafico di confronto dei valori di PGA delle 3 componenti del sisma per i dati analizzati riguardo il sito di Bastardo.

Perugia

Terremoto	Magnitudo	Distanza (Km)	PGA - Componente verticale (g)	PGA - Componente orizzontale N-S (g)	PGA - Componente orizzontale E-W (g)
MONTEFALCO	3.2	28,4	0,000354	0,000408	0,000317
GUBBIO	3.9	32,1	0,001146	0,001362	0,00144
GUBBIO	3.0	32,81	0,000094	0,000182	0,000153
GUBBIO	3.0	33,02	0,00013	0,000179	0,000151
MASSA MARTANA	3.5	40,41	0,000279	0,000341	0,000286
PRECI	3.0	55,06	0,000048	0,000049	0,000037
FIORDIMONTE	3.3	57,34	0,000091	0,000164	0,000129
FIORDIMONTE	3.1	59,25	0,00004	0,000055	0,000066
CESSAPALOMBO	3.0	64,92	0,000042	0,000045	0,000054
NORCIA	3.3	65,08	0,000065	0,000073	0,000058
SCARPERIA E SAN PIERO	4.5	132,86	0,000073	0,000135	0,000113

Figura 4.16: Terremoti e relativi valori di PGA analizzati per il sito di Perugia.

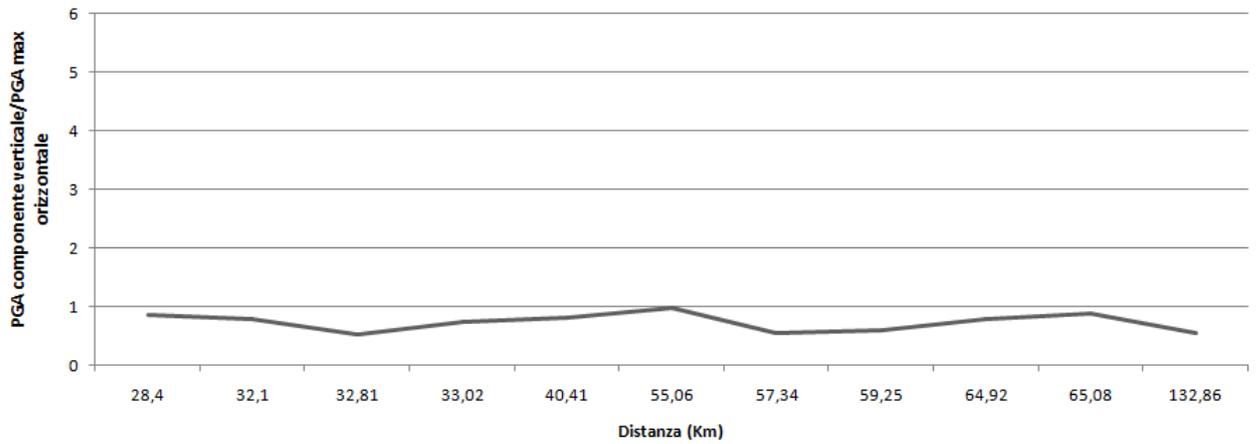


Figura 4.17: Grafico andamento del rapporto tra i valori di PGA della componente verticale e il valore massimo di PGA tra le componenti orizzontali in base alle distanze dalla stazione di Perugia.

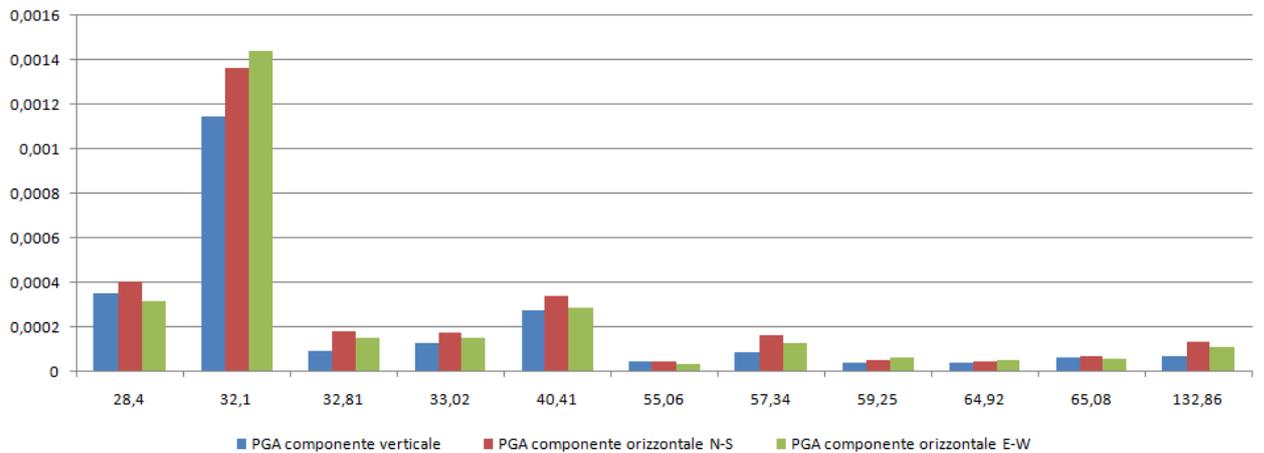


Figura 4.18: Grafico di confronto dei valori di PGA delle 3 componenti del sisma per i dati analizzati riguardo il sito di Perugia.

5

CONCLUSIONI

Il presente lavoro si è concentrato soprattutto nell'area di Cascia in quanto risulta essere collocata in una zona particolarmente interessata da eventi sismici (il Comune di Cascia rientra nella zona del cratere sismico del 2016), quindi vi è stata una notevole disponibilità di accelerogrammi recenti. Inoltre, a livello di attività sismica, gli ultimi anni si sono dimostrati relativamente sterili per quanto riguarda altri distretti sismici nei quali sono localizzate le altre stazioni della rete accelerometrica Re.Si.R. (Alta valle del Tevere, Umbria Centrale). Le stazioni sismiche collocate presso Città di Castello, Giano dell'Umbria – Bastardo e Perugia hanno acquisito eventi con distanze superiori a 27 Km tranne che in un unico caso registrato dal sito di Bastardo con distanza di circa 13 Km. Per queste tre stazioni i valori di PGA della componente verticale risultano essere di grandezza inferiore rispetto a quelli delle orizzontali per quasi tutti gli eventi sismici acquisiti. Il rapporto tra il valore di PGA della componente verticale e il valore massimo di PGA tra le orizzontali si mantiene costante sotto al valore di 1 per tutti e tre i siti senza presentare notevoli picchi. Per avere un'analisi il più dettagliata possibile è stato ritenuto opportuno estendere l'analisi ad accelerogrammi risalenti non solo all'anno 2021 ma anche ad anni precedenti, così da arricchire lo studio con terremoti di magnitudo rilevanti (comunque inferiore a 4.1). Anche se i risultati ottenuti sono riferiti ad una zona relativamente circoscritta, analisi qualitative consentono di affermare che i risultati ottenuti siano esportabili anche ad altre località.

Per quanto riguarda il sito di Cascia, dall'analisi effettuata su oltre cento accelerogrammi acquisiti dalla rete Re.Si.R. si è arrivati alle seguenti conclusioni:

- Entro un raggio di 20 km dall'epicentro di un terremoto, in termini di valori massimi di accelerazione (PGA), la componente accelerometrica verticale del sisma risulta quasi sempre superiore rispetto a quella orizzontale. Per l'evento più vicino che è stato registrato dalla rete accelerometrica, con distanza di 7 Km, i valori di PGA della componente verticale risultano essere 4 volte superiori rispetto alle PGA orizzontali.

- I valori di PGA delle componenti del sisma mantengono valori dello stesso ordine di grandezza fino a 40 Km circa (con un rapporto che si mantiene intorno al valore di 1,5) per poi avere una decrescita significativa della componente verticale con l'aumentare della distanza.
- Il contenuto in frequenza della componente verticale degli accelerogrammi analizzati risulta avere un'ampiezza di banda simile rispetto a quella delle frequenze della componente orizzontale. La componente verticale non è quindi "impulsiva" come spesso considerata a livello ingegneristico.
- La banda delle frequenze della componente accelerometrica verticale risulta traslata verso frequenze più alte rispetto alla componente orizzontale, con il picco della frequenza principale corrispondente tra 4 e 5 Hz nei casi analizzati. Anche se diversi dalle orizzontali, questi valori di frequenze sono comunque compresi all'interno della banda di interesse ingegneristico e risultano corrispondenti alle frequenze di risonanza di alcune tipologie di edifici (due piani più sottotetto). Tali tipologie risultano tra le più colpite in seguito alla crisi sismica del 2016.

Alla luce di queste conclusioni appare chiara la sottostima della componente verticale da parte della normativa tecnica sulle costruzioni. Oltre ai limitati casi in cui è obbligatorio tenerla in considerazione, gli spettri di risposta calcolati per questa componente sono poco cautelativi, anche tenendo conto che, con il cambiamento della classe di sottosuolo, non si ha in alcun modo una variazione dello spettro di risposta della componente verticale.

Valutare una corretta azione sismica verticale da parte di un tecnico progettista per ora risulta un percorso estremamente complesso e non "normato" adeguatamente.

In attesa che le NTC prendano atto dei dati accelerometrici verticali e dei danni reali attribuibili inequivocabilmente alla componente verticale del sisma, ci si auspica che i progettisti decidano di verificare gli edifici per la componente verticale anche nei casi in cui possono ometterla.

Bibliografia

- Consiglio superiore dei lavori pubblici, D.M. 14 Gennaio 2008 – Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, software *Spettri di risposta ver. 1.0.3*.
- Sara Electronic Instruments, *Seismowin* – pacchetto software per la gestione di accelerogrammi e dell'accelerometro.
- Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, 2018, *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*. Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale”, n. 42
- Fabrizio Comodini, Gianluca Fagotti, Marco Mezzi, 2019. *Effetti della componente verticale del terremoto nelle murature: meccanismi di III modo ?*. Ascoli Piceno, 15-19 settembre 2019 (Pisa University Press, 2019).
- INGV chiarimenti sulle Norme Tecniche per le Costruzioni. <http://esse1.mi.ingv.it/ntc.html>.
- Massimo Mariani, Francesco Pugi, 2019. *“Sisma verticale” in ntc 2018: edifici esistenti e comportamento strutturale “atteso”*. Ingenio-web.
- <https://www.ingv.it/it/risorse-e-servizi/ambiente-terremoti-e-vulcani/mappe>.
- Alessandro Sabatini, 2020, *Determinazione della risposta sismica locale, con metodo sperimentale, di un'area presso Cascia (PG), in seguito al terremoto del 201*. Università degli studi di Perugia, Tesi di Laurea, anno accademico 2019/2020.
- Marco De Pisapia, 2019. *Spettri di risposta elastici*. www.marcodepisapia.com.
- Paolo Clemente, 2018. *L'azione sismica nella progettazione delle strutture, concetti di base e aspetti normativi*. Slides del seminario “La (mancata) valutazione del rischio sismico” IGEAM, Roma.
- Massimo Mariani, Francesco Pugi, 2019. *La componente sismica verticale è sempre da considerare perché rilevante vicino e lontano dalla sorgente*. Ingenio-web.

- I. Iervolino, E. Cosenza, C. Galasso, 2009. *Spettri, accelerogrammi e le nuove norme tecniche per le costruzioni*. Rivista “Progettazione Sismica, N. 1.
- L. Giresini, 2018. *Fondamenti di ingegneria sismica*. Università di Pisa
- Roberto W. Romeo. *Le azioni sismiche e le categorie di sottosuolo*. Giornale di Geologia Applicata 6, 65-80. doi: 10.1474/GGA.2007 -06.0-07.0188, 2007.
- Piero Rubino, 2019. *La mitigazione del rischio sismico in Italia: obiettivi e strumenti*. Argomenti 12 (2019): 37-60.