

**ITINERARIO INTERNAZIONALE E78
S.G.C. GROSSETO - FANO
ADEGUAMENTO A 4 CORSIE
NEL TRATTO GROSSETO - SIENA (S.S. 223 "DI PAGANICO")
DAL KM 41+600 AL KM 53+400 - LOTTO 9**

PROGETTO ESECUTIVO

COD. **FI15**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GDG - ICARIA

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Nando Granieri
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A351

IL PROGETTISTA:

Dott. Ing. Federico Durastanti
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Terni n° A844

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini
Ordine dei Geologi della Regione Umbria n°108

Il R.U.P.

Dott. Ing.
Raffaele Franco Carso

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A1373

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

MANDANTI:



Dott. Ing. N. Granieri	Dott. Ing. D. Carlucci	Dott. Ing. V. Rotisciani
Dott. Arch. N. Kamenicky	Dott. Ing. S. Sacconi	Dott. Ing. F. Macchioni
Dott. Ing. V. Truffini	Dott. Ing. A. Rea	Geom. C. Vischini
Dott. Arch. A. Bracchini	Dott. Ing. V. De Gori	Dott. Ing. V. Piunno
Dott. Ing. F. Durastanti	Dott. Ing. C. Consorti	Dott. Ing. G. Pulli
Dott. Ing. E. Bartolucci	Geom. F. Dominici	Geom. C. Sugaroni
Dott. Geol. G. Cerquiglini		
Geom. S. Scopetta		
Dott. Ing. L. Sbrenna		
Dott. Ing. E. Sellari		
Dott. Ing. L. Dinelli		
Dott. Ing. L. Nani		
Dott. Ing. F. Pambianco		
Dott. Agr. F. Berti Nulli		



PROTOCOLLO

DATA

GEOTECNICA

Relazione sismica

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	T00-GE00-GET-RE02		
L O F I 1 5	E	1 9 0 1	CODICE ELAB. T 0 0 G E 0 0 G E T R E 0 2	A	-
A	Emissione		28/02/2020	C. Consorti	D. Carlucci
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO
					APPROVATO

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. EVOLUZIONE DEL QUADRO NORMATIVO IN MATERIA ANTISISMICA DELLA REGIONE TOSCANA	4
3. INQUADRAMENTO MORFO-IDRO-GEOLOGICO DELL'AREA	6
3.1 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DELL'AREA	6
3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTETTONICO DELL'AREA	6
3.3 CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE.....	10
4. INDAGINI ESEGUITE.....	12
4.1 CAMPAGNA DI INDAGINE DEL 2000	12
4.2 CAMPAGNA DI INDAGINE DEL 2019	12
5. SISMICITÀ	14
5.1 SISMICITÀ REGIONALE	15
5.2 CLASSIFICAZIONE SISMICA DELLA TOSCANA	19
5.3 SISMICITÀ DELL'AREA D'INDAGINE.....	20
5.4 CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA D'INDAGINE	23
5.5 PERICOLOSITÀ SISMICA DELL'AREA D'INDAGINE.....	24
5.6 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE	26
5.7 DEFINIZIONE DELLE AZIONI SISMICHE DI PROGETTO.....	30
5.8 ANALISI PSEUDO-STATICA	40
5.9 STABILITÀ NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE	40

1. PREMESSA

La presente relazione è finalizzata a definire gli elementi sismici per il progetto esecutivo della S.S. 223 “di Paganico”, itinerario internazionale E78 SGC Grosseto – Fano Adeguamento a 4 corsie del tratto dal km 41+600 al km 53+400.

Il tracciato stradale in studio ricade nel settore meridionale della provincia di Siena, nei territori dei comuni di Monticiano, Murlo e Sovicille.

L’infrastruttura segue la valle del fiume Merse, affluente del fiume Ombrone, e si posiziona quindi in un settore caratterizzato da una morfologia dolce e ondulata con quote topografiche degradanti verso ovest.

In particolare, si è proceduto ad illustrare la sismicità dell’area ed a fornire una caratterizzazione sismica dei terreni di fondazione interessati dal tracciato con le seguenti finalità:

- macrozonazione sismica dell’area attraverso l’individuazione delle zone sismiche dei comuni attraversati dalla nuova infrastruttura autostradale ai sensi dell’OPCM n. 3274 del 20 marzo 2003 come recepita dalla successiva normativa della Regione Toscana (DGR Toscana n. 604 del 16.06.2003, DGR Toscana n. 751 del 28.07.2003, DGR Toscana n. 431 del 19.06.2006, DGR Toscana n. 841 del 26.11.2007, DGR Toscana n. 878 del 08.10.2012, DGRT n. 421 del 26/05/2014)
- definire la categoria del suolo di fondazione lungo il tracciato ottenuta considerando i dati relativi alle indagini eseguite in questa fase progettuale;
- caratterizzare la pericolosità sismica dell’area mediante l’individuazione dei parametri a_g (accelerazione orizzontale massima del terreno) e dell’Intensità macrosismica I_{maxi}
- definire per ogni comune i parametri sismici dai quali poi viene poi ricavato dal progettista lo spettro di progetto $S_d(T)$ caratteristico del tipo d’opera seguendo le modalità riportate nelle NTC 2018.

La prima fase ha pertanto comportato una ricerca bibliografica per l’acquisizione della documentazione scientifica e tecnica relativa all’area, la consultazione dei documenti ed elaborati prodotti dai Servizi Tecnici della Regione Toscana, la raccolta dati e le informazioni provenienti dagli studi geologici allegati al Progetto Definitivo e, per quanto riguarda la pericolosità sismica dell’area, si è fatto riferimento alle mappe ed ai dati pubblicati dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia INGV e dal CNR Istituto Nazionale di Geofisica.

A supporto del progetto sono state eseguite varie campagne d’indagini geognostiche che hanno consentito di integrare i dati reperiti in letteratura, con i risultati dei rilevamenti geologici e di campagna e quindi di acquisire ulteriori informazioni di carattere geologico tecnico che approfondiscono il quadro conoscitivo già disponibile.

- campagna indagine del 2000 a sostegno del progetto definitivo;
- campagna indagine del 2019 a sostegno del progetto esecutivo.

Nella campagna di indagine del 2000 non sono state eseguite indagini di tipo sismico, mentre nella campagna del 2019 sono state condotte le sottoelencate indagini geofisiche che hanno consentito di eseguire una classificazione sismica dei siti e dei suoli

- n. 6 sondaggi geotecnici a carotaggio continuo attrezzati con tubazione per l’esecuzione di prove sismiche in foro tipo Down-Hole (denominati SG01-SG05-SG08-SG09-SG10-SG11)
- n. 8 indagini geofisiche di sismica a rifrazione in onde P e S. (denominate LS01-LS02-LS05-LS06-LS07-LS08-LS09-LS10)
- n. 9 prospezioni sismiche MASW. (denominate MASW01-MASW02-MASW03-MASW04-MASW05-MASW06-MASW07-MASW08-MASW09).

2. EVOLUZIONE DEL QUADRO NORMATIVO IN MATERIA ANTISISMICA DELLA REGIONE TOSCANA

- O.P.C.M. n. 3274 del 20.03.2003
“Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.
Il riordino della normativa antisismica in Italia inizia con l’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 2003 che fornisce i primi elementi in materia di classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. È in questa Ordinanza che viene introdotta la classificazione dei terreni in base ai parametri Vs30, Nspt, cu.
- DM Infrastrutture e Trasporti 14.09.2005
“Norme Tecniche per le Costruzioni” del Ministero delle Infrastrutture che di concerto con il Dipartimento della Protezione Civile ha emanato un nuovo corpo normativo che assorbe anche quello adottato con l’Ordinanza 3274/03, pervenendo alla suddivisione delle zone sismiche 1, 2 e 3 anche in sottozone caratterizzate da valori dell’accelerazione intermedi rispetto ai valori di soglia;
- OPCM n. 3519 del 28.04.2006
“Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone”.
È stata emanata ad integrazione della OPCM n° 3274/03, tenuto conto che in tale Ordinanza contestualmente si dà atto della provvisorietà dei suddetti criteri, in attesa del completamento delle attività del Gruppo di Lavoro istituito con Decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici finalizzato alla revisione dei Criteri. Tale Ordinanza ha adottato la mappa di pericolosità sismica MPS04 (vedi figura 1) quale riferimento ufficiale.
- D.G.R. Toscana n. 431 del 19.06.2006
“Approvazione della riclassificazione sismica Nazionale di cui alla OPCM 3519-2006 con cui in particolare i comuni di Sovicille, Murlo e Monticiano oggetto di studio vengono classificati nella categoria 3S.
- DM Infrastrutture 14.01.2008
Il 4 febbraio 2008 viene pubblicato in Gazzetta Ufficiale il DM 14 gennaio 2008 contenente le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni che entrano in vigore il 30 giugno 2009. Le norme definiscono i principi per il progetto, l’esecuzione e il collaudo delle costruzioni, le prestazioni richieste in termini di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità. Forniscono i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e dei prodotti e trattano gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere. A fine gennaio 2008 una Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri fornisce indicazioni per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del

patrimonio culturale, con riferimento alle NTC. Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti fornisce, con la Circolare 617/2009, le istruzioni per l’applicazione delle nuove NTC di cui al DM del 14 gennaio 2008.

- Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 C.S.LL.PP.
“Istruzioni per l’applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008”.
- DGR 878 del 08/10/2012 Recepimento della n. 3519 del 28.04.2006
“Riclassificazione sismica dei comuni della Regione Toscana” in cui i comuni di Monticiano, Murlo e Sovicille vengono classificati nella categoria 3.
- DGRT n. 421 del 2/05/2014
Approvazione della classificazione sismica regionale relativa agli allegati 1 (elenco dei comuni) e 2 (mappa) della DGRT n. 878 – 2012 a seguito della fusione di 14 comuni Toscani e della istituzione di 7 nuove amministrazioni comunali
- DM N.8/2018
In data 17 gennaio 2018 è stato pubblicato il decreto del Ministero delle infrastrutture dei trasporti n. 8/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” entrato in vigore il 22 marzo 2018, che ha leggermente modificato le categorie di suolo.

3. INQUADRAMENTO MORFO-IDRO-GEOLOGICO DELL'AREA

In questo paragrafo si descrivono gli aspetti morfologici, geologici e idrogeologici dell'area in esame estratti dallo studio geologico eseguito, a cui si rimanda per maggiori dettagli in merito.

3.1 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

Il tracciato oggetto di studio si sviluppa in un settore meridionale del territorio Senese in cui scorre il F. Merse, affluente del Fiume Ombrone, corso d'acqua che taglia ortogonalmente il rilievo della Montagnola Senese, con percorsi meandriformi incassati; alcuni tratti di meandro abbandonati durante l'evoluzione dell'area sono ben visibili in foto aerea a quote più alte fi no a 400 m circa. Tale assetto è interpretabile come un caso di antecedenza per cui un originario drenaggio principale con direzione antiappenninica ha progressivamente scavato le formazioni in graduale sollevamento, senza subire deviazioni di percorso.

Il reticolo idrografico nell'area studiata presenta diversi tipi di drenaggio. I più diffusi sono quelli dendritico e subparallelo-dendritico che si presentano a tessitura più fine ed alta densità nei terreni argillosi, dove sono anche presenti forme calanchive. In tali tipi di drenaggio è comunque rilevabile anche un certo controllo strutturale dell'andamento delle aste fluviali principali, che sono quasi sempre orientate in direzione NE-SO oppure NO-SE.

La litologia affiorante influenza fortemente il rilievo del territorio e conseguentemente il paesaggio nel suo insieme. Le rocce delle Formazioni di età dal Paleozoico al Triassico (*Unità di Monticiano-Roccastrada*) occupano la maggior parte dell'area e consentono la presenza di una fitta copertura boschiva ma non di estesi insediamenti agrari.

La morfologia del territorio nelle aree fluviali è praticamente piatta (con pendenze inferiori al 5%), trattandosi della pianura alluvionale del F. Merse.

Sono poco frequenti i movimenti di massa gravitativi, rappresentati in massima parte da frane antiche, ormai stabilizzatesi, poste prevalentemente nei terreni riferibili al *Gruppo del Verrucano*.

Lungo il tratto stradale compreso nel comune di Monticiano il PAI identifica n. 4 aree di potenziale instabilità che lambiscono il tracciato e che sono stati oggetto di specifici approfondimenti.

3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTETTONICO DELL'AREA

Geologicamente l'area in esame è situata nella Toscana sud-occidentale; è caratterizzata da rilievi pedeappenninici costituiti dalle formazioni del Basamento Metamorfico della Serie Toscana e dalle Unità Liguridi di copertura.

L'area è estremamente complessa sia per la grande varietà di rocce e terreni presenti che per lo stato di minuta frammentazione tettonica a cui è stata sottoposta: inquadrandola nel contesto geologico regionale si individuano (vedasi Figura 1):

- a) una dorsale di forma arcuata, convessa ad oriente, lungo la direttrice Rosia–Monticiano–Roccastrada–Montepescali, discontinua all'altezza di Civitella–Paganico, formata

prevalentemente dalla formazione del Verrucano (appartenente al basamento metamorfico) e da soprastanti lenti di Calcare Cavernoso (appartenente alla Serie Toscana);

- b) due fasce laterali alla dorsale, costituite prevalentemente da due gruppi stratigrafici principali:
- b1) un gruppo calcareo-arenaceo-marnoso-argilloso, spesso con masse ofiolitiche immerse (“Complesso Flyschioide Ofiolitifero alloctono”, Unità Liguridi interne);
 - b2) un gruppo neogenico, comprendente argille, sabbie gialle, ghiaie, conglomerati, gessi.

Dal punto di vista stratigrafico, le Formazioni affioranti nell’area interessata dal progetto sono situate al di sopra del basamento paleozoico e appartengono ai seguenti complessi, in ordine di sovrapposizione:

- Unità di Monticiano-Roccastrada;
- Unità della “Falda toscana”;
- Unità Liguri alloctone s.l.;
- Complesso Neoautoctono;
- Alluvioni recenti ed attuali.

I rapporti geometrici tra le unità tettoniche presenti nell’area in esame sono la risultante di movimenti verificatisi in regimi tettonici diversi, che hanno portato, in fasi successive, all’attuale assetto strutturale. In quest’area sono riconoscibili, infatti, due stili tettonici principali: il primo, legato alle fasi tectogenetiche del corrugamento appenninico, è caratterizzato da movimenti orizzontali in regime di compressione, mentre durante il secondo si verificano dislocazioni prevalentemente verticali in regime di distensione.

Per le prime tre unità (Unità di Monticiano-Roccastrada, Unità della “Falda toscana” e Unità liguri alloctone s.l.), la posizione geometrica relativa viene attribuita a fenomeni di tettonica faldista. Tali fenomeni si erano già impostati nel Cretaceo superiore, ma è stato nel Miocene inferiore che alcune unità “liguri”, depositate in un bacino compreso tra l’attuale Corsica e la Liguria, a basamento oceanico, sono state abdotte su bacini a basamento continentale (Serie Toscana), interrompendone la sedimentazione e provocando un infaldamento di parte dei terreni di questi ultimi (Falda Toscana).

Questi grandi fenomeni tettonici hanno comportato intense deformazioni plastiche nei terreni coinvolti, che si sono manifestate in pieghe di varia dimensione vergenti verso NE e in numerose faglie e fratture, anche di notevole sviluppo, disposte generalmente in senso normale (NW-SE) e in senso parallelo (SW-NE) alla vergenza.

Le Formazioni metamorfiche dell’Unità di *Monticiano-Roccastrada*, appartenenti all’ *Unità di Massa* definita da Rau e Tongiorgi (1974), si sarebbero sovrapposte al basamento paleozoico autoctono della Toscana meridionale, che in affioramento è rappresentato dall’*Unità di Boccheggiano* (Burgassi et Alii, 1979), affiorante a Ovest del Comune di Monticiano. Questa unità alloctona corrisponderebbe ad una grande anticlinale coricata Est-vergente, totalmente sradicata dalla sua area di provenienza.

Sopra di essa è sovrascorsa l’Unità della “*Falda Toscana*” formata dagli stessi terreni (dal Calcare Cavernoso alle sequenze torbiditiche del Macigno). Sopra la *Falda Toscana* stessa (o *Serie Toscana non metamorfica*) erano già state impilate, in una fase di poco precedente, le *Unità Liguri s.l.*

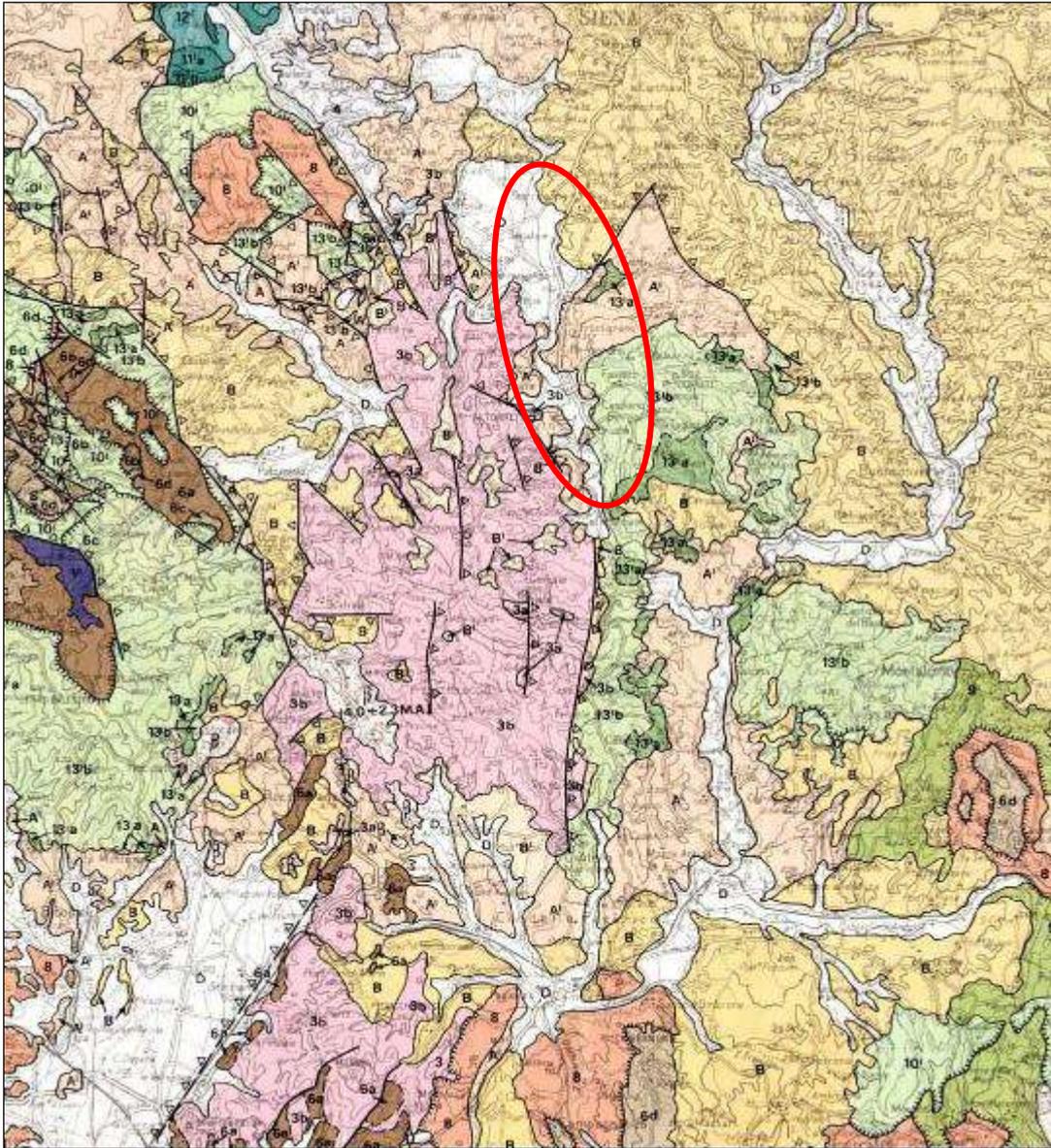


Figura 1: Stralcio della Carta Strutturale dell'Appennino settentrionale (tratta da CNR).

Al secondo stile tettonico citato è riferibile la formazione dei bacini neautoctoni; il quadro tettonico è caratterizzato da dislocazioni a carattere rigido distensivo a componente verticale, attribuibili alle fasi tardo-orogenetiche, successive al corrugamento della Catena Appenninica. È in questa fase distensiva che si ha la formazione di alti e bassi strutturali (bacini), separati da faglie dirette ad andamento appenninico NNW-SSE, spesso interrotte da altre faglie ad andamento antiappenninico WSW-ENE.

Il generale sollevamento si ha nel Pleistocene, con movimenti verticali di alcune centinaia di metri. Le *Alluvioni recenti ed attuali* si sono disposte indifferentemente al di sopra di tutti i terreni precedenti.

Gli studi a carattere geologico-strutturale (Costantini et Alii, 1988) hanno permesso di ricostruire i vari eventi deformativi che hanno interessato i sedimenti paleozoico-triassici. Ne risulta una storia polifasata con diversi periodi di deformazione compressiva di cui tre di età prealpina e tre di età alpina.

L'attuale assetto delle strutture compressive, legato principalmente alla seconda fase deformativa dell'orogenesi alpina è correlabile con le grandi strutture a pieghe osservabili nell'area appenninica, risulta influenzato da eventi riconducibili ad uno stile tettonico distensivo che si instaura a partire dal Miocene Inferiore-Medio (Bertini et Alii, 1991). Questo si sarebbe esplicato con lo sviluppo di faglie, principalmente a componente estensionale, che dislocano le strutture precedentemente formatesi, dando origine ad un articolato sistema di fosse tettoniche separate fra loro da alti strutturali.

Per quanto concerne l'età di tali eventi distensivi, sono state riconosciute due fasi deformative. La prima si realizza nell'intervallo tra il Miocene medio e il Tortoniano superiore, ed è caratterizzata da faglie dirette a basso angolo. Tale evento distensivo è ritenuto responsabile della formazione della cosiddetta “Serie ridotta”, ovvero della sovrapposizione delle Unità “Liguri” sia sul Gruppo del Verrucano, o addirittura sulle Formazioni paleozoiche, sia sui vari termini della “Falda Toscana” qualora non ci sia stata la loro totale omissione. Esempi di questa sovrapposizione sono osservabili nell'area di studio lungo il bordo orientale, in cui le Argille a Palombini, appartenenti all'Unità ofiolitifera del M. Gottero, vengono a contatto per sovrascorrimento sia con il Calcere Cavernoso della Serie Toscana sia con le Formazioni del Gruppo del Verrucano.

Questa sovrapposizione si realizza su superfici di scorrimento di tipo flat-ramp-flat: si hanno superfici orizzontali (flat) in corrispondenza delle Formazioni poco competenti e superfici inclinate (ramp) in corrispondenza di Formazioni maggiormente competenti (Bettini et Alii, 1991). Questi movimenti si sono verificati dopo la messa in posto delle “Liguridi” sulla “Falda Toscana”.

La seconda fase distensiva si realizza in un intervallo di tempo che va dal Tortoniano superiore al Pliocene superiore, ed è caratterizzata da faglie ad alto angolo che dislocano le strutture formatesi precedentemente. Numerose sono le faglie attribuite a questa fase distensiva presenti nel territorio; sono presenti sia faglie con direzione appenninica (SE-NO), sia con direzione antiappenninica (SO-NE). Ci sono però anche rari esempi di faglie con direzione N-S e di faglie con direzione E-O. Le unità principalmente interessate dalle faglie dirette sono le Formazioni del Gruppo del Verrucano.

Nell'area di interesse progettuale affiorano litologie attribuibili alle Unità sottoelencate descritte dettagliatamente nella relazione geologica.

-DOMINIO TOSCANO – UNITA' TOSCANE METAMORFICHE (TRASSICO)

- Verrucano (V)
- Formazione di Tocchi (FT)

DOMINIO TOSCANO – FALDA TOSCANA (TRASSICO SUP.)

- Calcere cavernoso (CV)

DOMINIO LIGURE INTERNO (CRETACICO SUP.-PALEOCENE)

- Formazione di Sillano (SIL)

DOMINIO LIGURE ESTERNO (GIURASSICO SUP. – CRETACICO INF.)

- Argille a Palombini (Pb)

CICLO STRATIGRAFICO DEL MIOCENE

- Formazione di Cerreto a Merse, brecce di Grotti (CM)

CICLO STRATIGRAFICO DEL PLIOCENE

- Argille azzurre (Pa)
- Sabbie e sabbie argillose (Ps)

DEPOSITI QUATERNARI

- Depositi fluvio-lacustri (dl)
- Alluvioni fluviali antiche terrazze (at1 at2 at3)
- Alluvioni fluviali recenti terrazze (at)
- Cumuli di frana (F)
- Alluvioni fluviali attuali (a)
- Detrito di falda (DT)

3.3 CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

Il tipo di permeabilità dei terreni descritti nel precedente capitolo sono essenzialmente suddivisibili in due tipi: i terreni sciolti e non cementati (quali i sedimenti mio-pliocenici e recenti) possiedono una permeabilità primaria o interstiziale che dipende essenzialmente dalla porosità, quindi dalla granulometria, e compattezza del deposito, mentre i terreni lapidei, i livelli diagenizzati delle sabbie e delle argille e/o i livelli cementati dei conglomerati, possiedono una permeabilità di tipo secondario, a luoghi per dissoluzione dei termini carbonatici, dovuta essenzialmente alla fratturazione e alla comunicazione dei sistemi di fratture.

Anche se all'interno delle varie Formazioni sono presenti litotipi a composizione e granulometria differente, si possono fare dei raggruppamenti basati sul litotipo prevalente, sul grado di cementazione o di fratturazione e sul tipo di permeabilità.

Un comportamento idrogeologico del tutto particolare è attribuibile alle unità flyschoidi (Argille a Palombini-Flysch di Sillano) che sono caratterizzate da permeabilità di tipo misto, primario nei termini terrigeni e secondario nei livelli litoidi.

Per quanto concerne la possibilità di circolazione idrica e di presenza di falde idriche all'interno delle formazioni suddette possono essere fatte le seguenti osservazioni preliminari.

Nel Verrucano appaiono scarse le possibilità di circolazione idrica, limitata solo alle porzioni fratturate, in particolare agli interstrati quarzitici e quarzarenitici, in cui possono instaurarsi piccole falde, anche in pressione.

Nell’ambito del Calcare Cavernoso la circolazione idrica è molto sviluppata e costituisce falde di base delle strutture carbonatiche che alimentano le sorgenti poste ai loro confini, con portate costanti e talora elevate.

Per quel che riguarda i Argille a Palombini ed il Flysch di Sillano le possibilità di circolazione idrica sono limitate alle porzioni litoidi fratturate nelle quali possono essere presenti falde discontinue di modesta estensione in grado di alimentare piccole, pur se localmente numerose, sorgenti a regime irregolare.

Nell’ambito dei Depositi Neogenici si osserva che nei sedimenti più marcatamente granulari è presente una discreta circolazione idrica, ma le potenzialità della stessa sono limitate a causa sia della discontinuità che della limitata estensione di tali affioramenti (sabbie e sabbie limose marine plioceniche).

Nelle coltri detritiche di maggiore spessore possono instaurarsi acquiferi epidermici che alimentano piccole sorgenti per lo più a regime intermittente. Nell’ambito della piana alluvionale del F. Merse sono presenti falde idriche di una certa potenzialità, circolanti preferenzialmente nelle porzioni granulometricamente più grossolane.

Il maggiore acquifero è rappresentato dalle Breccie di Grotti che costituisce uno dei maggiori acquiferi della Toscana Meridionale (secondo, per risorsa idrica, solo a quello del M. Amiata). Tale acquifero, da cui trae la maggior parte dell’approvvigionamento idropotabile la città di Siena, è denominato Acquifero del M. Maggio-Montagnola Senese ed occupa un territorio molto vasto.

L’aquiclude dell’acquifero è costituito dalle rocce metamorfiche del Dominio toscano (Gruppo carbonatico-argilloso-siliceo della Montagnola Senese).

4. INDAGINI ESEGUITE

Nelle varie fasi di progettazione sono state eseguite nell'area oggetto di studio le sottoelencate campagne di indagine:

- campagna indagine del 2000 a sostegno del progetto definitivo;
- campagna indagine del 2019 a sostegno del progetto esecutivo.

L'ubicazione delle suddette indagini è illustrata negli elaborati “Planimetria ubicazione indagini - Tav. 1÷7” (T00-GE00-GEO-PU01÷07).

4.1 CAMPAGNA DI INDAGINE DEL 2000

Nell'ambito della progettazione definitiva, nel mese di febbraio 2000 sono state eseguite delle indagini geognostiche consistite in:

- n. 56 sondaggi geotecnici a carotaggio continuo (S1÷ S56) all'interno dei quali sono state eseguite n. 236 prove penetrometriche dinamiche *SPT*; sono stati prelevati n.118 campioni da analizzare in laboratorio, di cui n. 92 rimaneggiati e n. 26 indisturbati. In n. 7 verticali è stato installato un piezometro a tubo aperto.

In questa campagna non sono state eseguite prospezioni mirate alla classificazione sismica del sito e dei suoli.

4.2 CAMPAGNA DI INDAGINE DEL 2019

La campagna di indagine realizzata per la redazione del progetto esecutivo è consistita nella realizzazione di:

- n. 29 sondaggi geotecnici a carotaggio continuo all'interno dei quali sono state eseguite n. 121 prove penetrometriche dinamiche *SPT* e sono stati prelevati n. 170 campioni da sottoporre a prove di laboratorio, di cui n. 110 rimaneggiati e n. 60 indisturbati. Sono stati installati piezometri in n. 17 sondaggi, tutti con cella di Casagrande e n. 5 con l'aggiunta di un piezometro a tubo aperto; all'interno di n. 6 sondaggi è stato installato un tubo per l'esecuzione di prove geofisiche “Down-Hole”.
- n. 8 indagini geofisiche di sismica a rifrazione in onde P e S.
- n. 9 prospezioni sismiche MASW.

Di seguito sono riportate le tabelle riepilogative delle indagini sismiche eseguite, che hanno consentito di eseguire una classificazione sismica dei siti e dei suoli.

Tabella 1: Campagna di indagine del 2019 - Scheda sintetica dei sondaggi attrezzati per prove *Down Hole*.

Denominazione	L _{sondaggio} (m)	Attrezzato con
SG01-DH	50	Down-Hole
SG05-DH	45	Down-Hole
SG08-DH	45	Down-Hole
SG09-DH	45	Down-Hole
SG10-DH	45	Down-Hole
SG11-DH	45	Down-Hole

Tabella 2: Campagna di indagine del 2019 - Scheda sintetica delle sismiche a rifrazione.

Denominazione	L _{stendimento} (m)	Geofoni (n°)	Distanza intergeofonica (m)
LS01	110	24	2.5
LS02	110	24	2.5
LS05	46	24	2
LS06	46	24	2
LS07	110	24	2.5
LS08	46	24	2
LS09	110	24	2.5
LS010	110	24	2.5

Tabella 3: Campagna di indagine del 2019 - Scheda sintetica delle prospezioni *Masw*.

Denominazione	L _{stendimento} (m)	Geofoni (n°)	Distanza intergeofonica (m)
MASW1	46	24	2
MASW2	46	24	2
MASW3	46	24	2
MASW4	46	24	2
MASW5	46	24	2
MASW6	46	24	2
MASW7	46	24	2
MASW8	46	24	2
MASW9	46	24	2

5.SISMICITÀ

In seguito al terremoto del Molise del 2002, in Italia è stato avviato un percorso per la stima della pericolosità sismica secondo dati aggiornati e metodi condivisi a livello internazionale, dove per pericolosità sismica si intende lo scuotimento del suolo atteso in un sito a causa di un terremoto. Con ordinanza del Presidente del Consiglio n° 3274 del 20/03/2003, il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) ha adottato la nuova riclassificazione sismica nazionale con le nuove normative tecniche per gli edifici, i ponti e le opere di fondazione e sostegno dei terreni.

Nel 2004 è stata rilasciata una nuova mappa di pericolosità sismica (Figura 5.1) che fornisce un quadro delle aree più pericolose in Italia. I valori massimi delle accelerazioni orizzontali sono riferiti a un ipotetico suolo omogeneo con buone caratteristiche per le fondazioni. L’Ordinanza PCM n. 3519/2006 ha reso tale mappa uno strumento ufficiale di riferimento per il territorio nazionale.

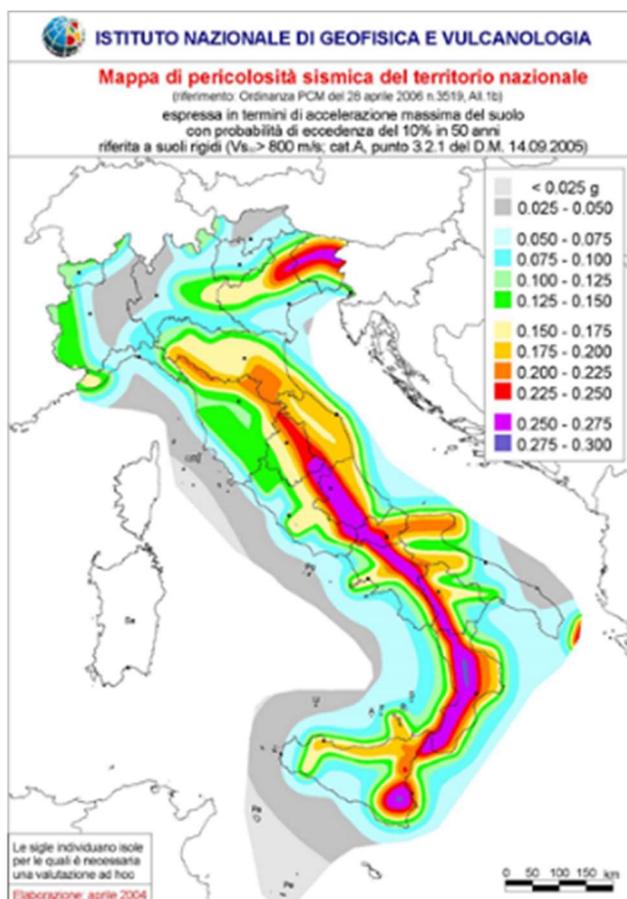


Figura 2: Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (OPCM 3519/06).

Con la D.G.R. Toscana n. 431 del 19.06.2006 viene approvata una prima classificazione sismica Nazionale con cui i comuni di Sovicille, Murlo e Monticiano oggetto di studio vengono classificati nella categoria 3S.

Successivamente, con DGR 878 del 08/10/2012, nell’ottica del totale recepimento della OPCM n. 3519 del 28.04.2006 si esegue una Riclassificazione sismica dei comuni della Regione Toscana in cui i comuni di Monticiano, Murlo e Sovicille vengono classificati nella categoria 3.

In data 02-05 2014, con la DGRT n. 421, a seguito della fusione di 14 comuni Toscani e della conseguente istituzione di 7 nuove amministrazioni comunali, si approva un aggiornamento della classificazione sismica regionale relativa agli allegati 1 (elenco dei comuni) e 2 (mappa) della DGRT n. 878 – 2012.

5.1 SISMICITÀ REGIONALE

In generale nella regione toscana si riconoscono 5 differenti zone sismogenetiche che innescano una attività costituita da scosse con $I_{max} < 8$ e $M < 5,5$. Tali valori sono stati superati solo in 4 casi (1293 Pistoia, 1414 Toscana Occidentale, 1558 Val d’Ambra e 1846 Orciano Pisano).

- Lunigiana garfagnana
- Mugello
- Appennini Forlivese
- Alta Valtiberina
- Chianti montagnola senese

La sismicità che interessa la provincia senese proviene prevalentemente dalla zona sismogenetica Chianti Montagnola Senese e costituisce un effetto delle deformazioni preneogeniche subiscono in risposta alla compressione longitudinale indotta dalla spinta della porzione tirrenica dell’appennino centro meridionale (mantovani et alii 2009).

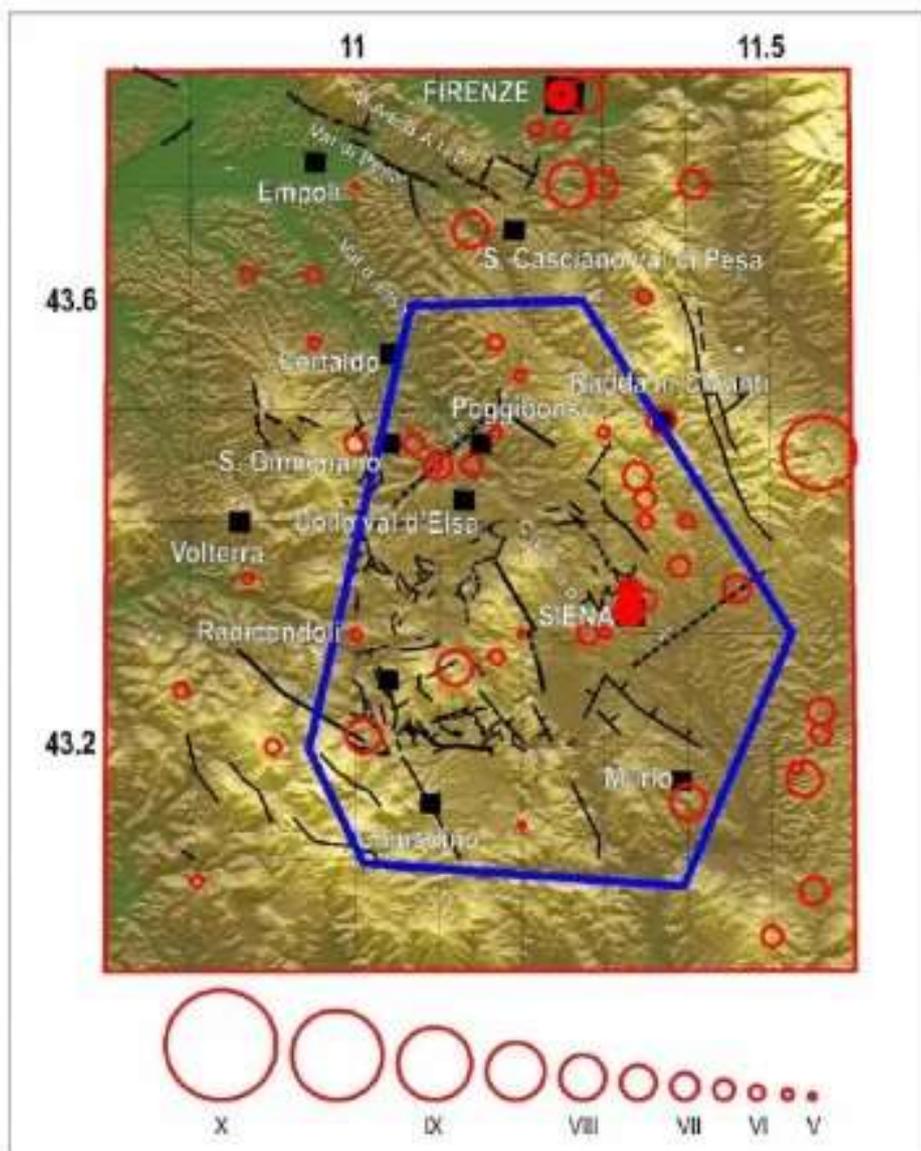


Figura 3: I cerchi rossi evidenziano i terremoti avvenuti dopo l'anno 1000, in nero sono evidenziati i principali elementi tettonici, il contorno blu evidenzia l'area in cui possono verificarsi eventi sismici con $I_{max} = 9$ (Mantovani et Alii 2009).

In un quadro di pericolosità sismica la figura seguente mostra i valori di intensità massima sull'intera regione, con i valori più elevati concentrati lungo la dorsale appenninica umbro marchigiana.

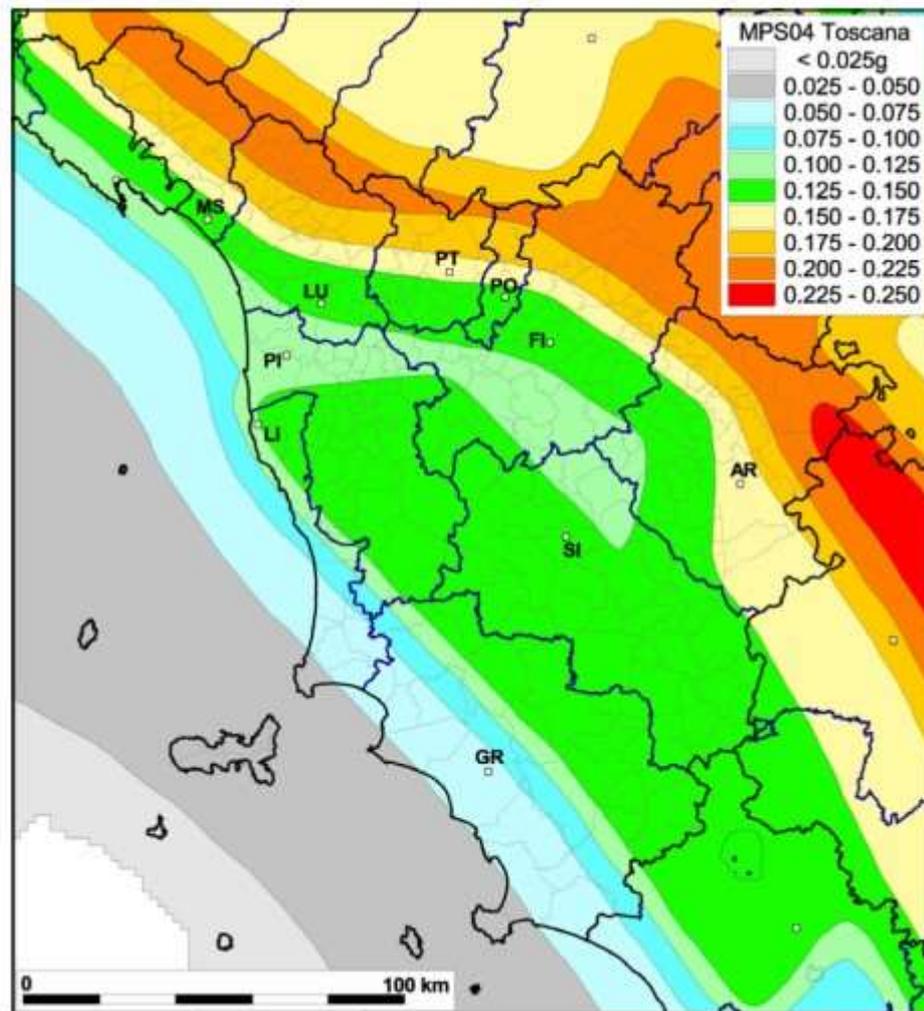


Figura 4: Regione Toscana. Mappa di pericolosità sismica (MPS) della Toscana (mappa mediana al 50° percentile). I valori di accelerazione sono riferiti ad un tempo di ritorno pari a 475 anni (INGV 2004).

Nell'ambito dello studio è stata eseguita una verifica della presenza nel corridoio di progetto e/o nelle sue vicinanze di faglie Capaci e sorgenti sismogenetiche.

Esaminando lo stralcio, (figura 5) della carta del progetto ITHACA (*Italy Hazard from capable faults*) emesso e aggiornato continuamente dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) si rileva l'assenza nell'area in esame di faglie "Capaci" in grado di trasmettere in superficie gli effetti della loro attività (rigetti e/o fagliazioni superficiali)

Viewer Map

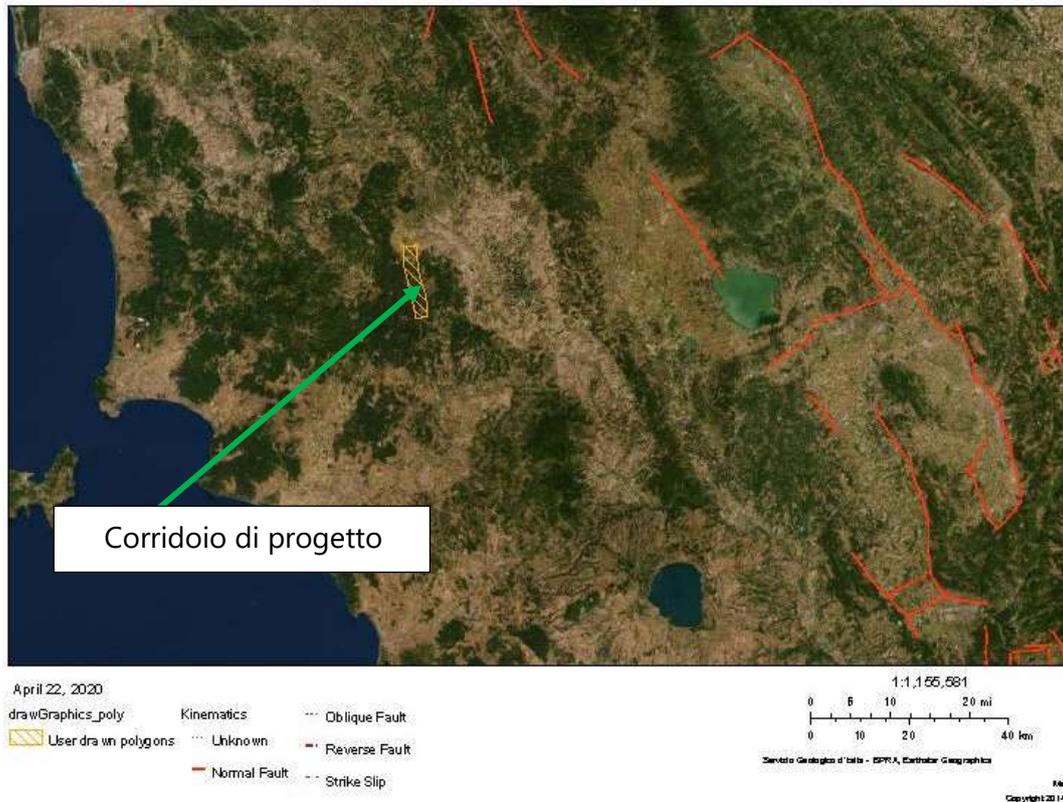


Figura 5: Stralcio Carta delle faglie Capaci – Progetto ITHACA (ISPRA).

Esaminando lo stralcio (figura 6) della carta del progetto DISS (*Database of Individual Seismogenic Sources*) emesso nel 2017 ed aggiornato al 16/01/2019 dall'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) si rileva l'assenza nell'area in esame di potenziali sorgenti di terremoti di Magnitudo superiore a 5,5.

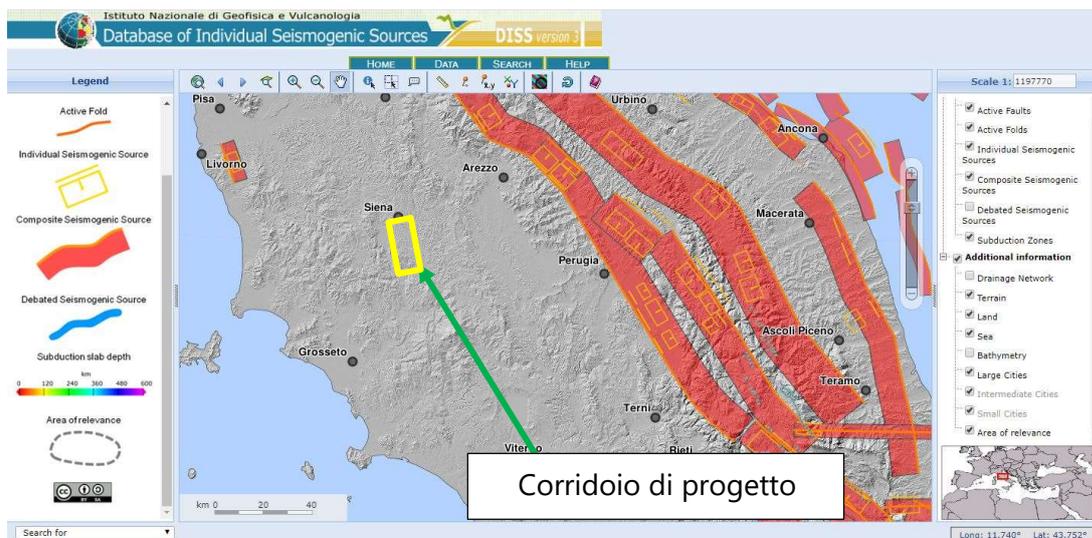


Figura 6: Stralcio Database delle sorgenti sismogenetiche DISS (INGV).

5.2 CLASSIFICAZIONE SISMICA DELLA TOSCANA

L’Ordinanza PCM n. 3274/2003 ha aggiornato l’assegnazione dei Comuni alle zone sismiche, adottando un criterio cautelativo e introducendo la zona 4 che indica pericolosità moderata.

Con la D.G.R. Toscana n. 431 del 19.06.2006 viene approvata una prima classificazione sismica Nazionale con cui i comuni di Sovicille, Murlo e Monticiano oggetto di studio vengono classificati nella categoria 3S.

Successivamente con DGR 878 del 08/10/2012 nell’ottica del totale recepimento della OPCM n. 3519 del 28.04.2006 si esegue una Riclassificazione sismica dei comuni della Regione Toscana” in cui i comuni di Monticiano, Murlo e Sovicille vengono classificati nella categoria 3.

In data 02-05-2014 con la DGRT n. 421, a seguito della fusione di 14 comuni Toscani e della conseguente istituzione di 7 nuove amministrazioni comunali, si approva un aggiornamento della classificazione sismica regionale relativa agli allegati 1(elenco dei comuni) e 2 (mappa) della DGRT n. 878 – 2012 (Figura 7).

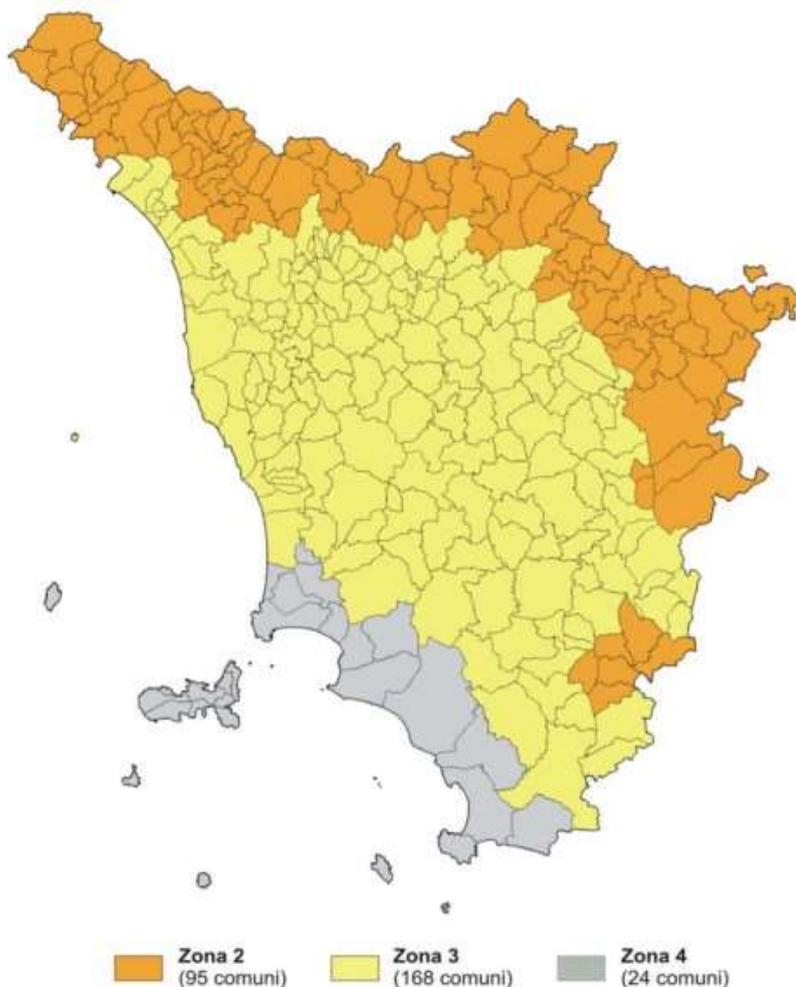


Figura 7: Classificazione sismica (DGR T n. 421/2014).

5.3 SISMICITÀ DELL'AREA D'INDAGINE

Dall'analisi del Catalogo Parametrico dei terremoti italiani, (CPTI15-DBMI15) redatto dal Gruppo Nazionale Difesa Terremoti (GNDT), ora inserito nell'ambito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), si possono osservare le massime intensità macrosismiche risentite nell'area d'indagine.

Nelle Figure 8, Figura 9 e Figura 10 si elencano le intensità macrosismiche storiche risentite nella Provincia di Siena e rispettivamente nei territori dei comuni di Monticiano, Murlo e Sovicille.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1897	11	15	23	52		Val d'Orcia	26	5	4.10
NF	1901	09	22	21	42	1	Valdelsa	35	6	4.68
3-4	1905	02	12	08	28		Monte Amiata	61	6	4.55
2-3	1906	04	21	06	35		Valdelsa	45	5-6	4.30
NF	1907	12	15	13	06	5	Chianti	20	5	4.19
7-8	1909	08	25	00	22		Crete Senesi	259	7-8	5.34
5	1911	09	13	22	29	0	Chianti	115	7	5.08
3	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
3	1947	12	24				Crete Senesi	26	6	4.46
NF	1956	02	22	22	55	0	Senese	29	5	4.03
NF	1980	09	08	19	41	1	Costa Grossetana	55	5-6	4.44
NF	1984	05	07	17	50		Monti della Meta	911	8	5.86
NF	1984	05	11	10	41	4	Monti della Meta	342	7	5.47
NF	1993	08	06	07	51	4	Colline Metallifere	35	5-6	4.03
3	1998	05	20	11	07	4	Colline Metallifere	31	4-5	4.19

Figura 8: Massime intensità macrosismiche risentite nel territorio del comune di Monticiano.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1906	04	21	06	35		Valdelsa	45	5-6	4.30
7-8	1909	08	25	00	22		Crete Senesi	259	7-8	5.34
4-5	1911	09	13	22	29	0	Chianti	115	7	5.08
NF	1917	04	26	09	35	5	Alta Valtiberina	134	9-10	5.99
4	1947	12	24				Crete Senesi	26	6	4.46
NF	1956	02	22	22	55	0	Senese	29	5	4.03
NF	1984	04	29	05	02	5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
NF	1997	09	26	00	33	1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
NF	1997	10	14	15	23	1	Valnerina	786		5.62
NF	2000	04	01	18	08	0	Monte Amiata	68	6	4.52
NF	2001	11	26	00	56	5	Casentino	211	5-6	4.63

Figura 9: Massime intensità macrosismiche risentite nel territorio del comune di Murlo.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
4	1895	05	18	19	55	1	Fiorentino	401	8	5.50
NF	1905	02	12	08	28		Monte Amiata	61	6	4.55
3	1906	04	21	06	35		Valdelsa	45	5-6	4.30
3	1906	12	20	02	38		Valdelsa	28	4	3.96
3-4	1907	12	15	13	06	5	Chianti	20	5	4.19
6-7	1909	08	25	00	22		Crete Senesi	259	7-8	5.34
4	1940	01	31	11			Siena	30	5-6	4.23
NF	1947	12	24				Crete Senesi	26	6	4.46
NF	1948	06	13	06	33	3	Alta Valtiberina	142	7	5.04
5	1956	02	22	22	55	0	Senese	29	5	4.03
5	1968	06	26	03	15		Senese	7	5	4.19
NF	1980	09	08	19	41	1	Costa Grossetana	55	5-6	4.44
3-4	1993	08	06	07	51	4	Colline Metallifere	35	5-6	4.03
4-5	1997	09	26	00	33	1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66

Figura 10: Massime intensità macrosismiche risentite nel territorio del comune di Sovicille.

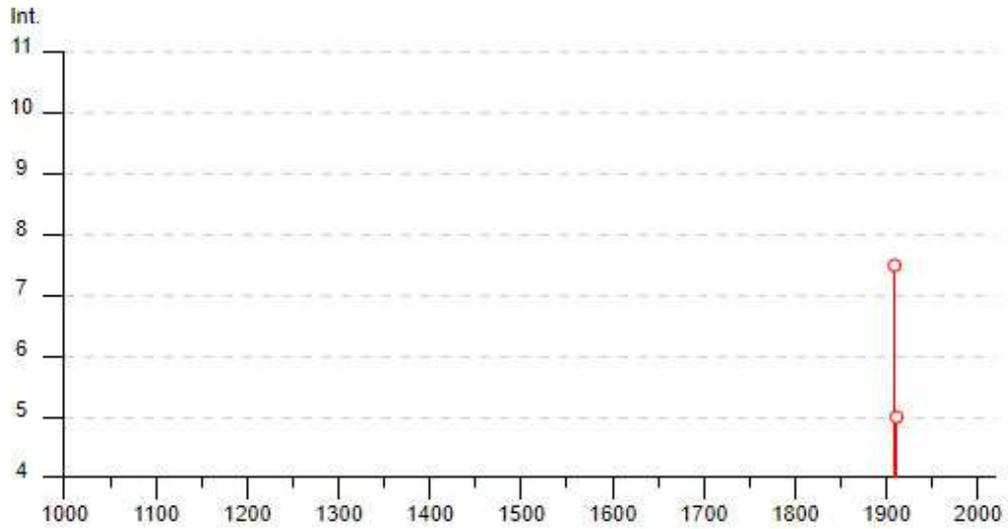


Figura 11: Diagramma dei terremoti storici di massima intensità – Comune di Monticiano.

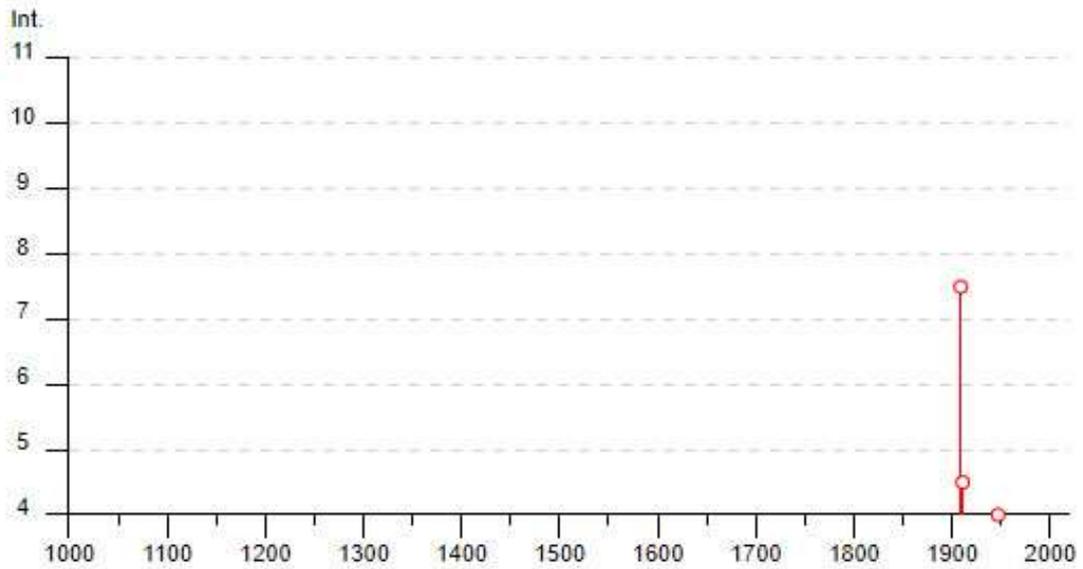


Figura 12: Diagramma dei terremoti storici di massima intensità – Comune di Murlo.

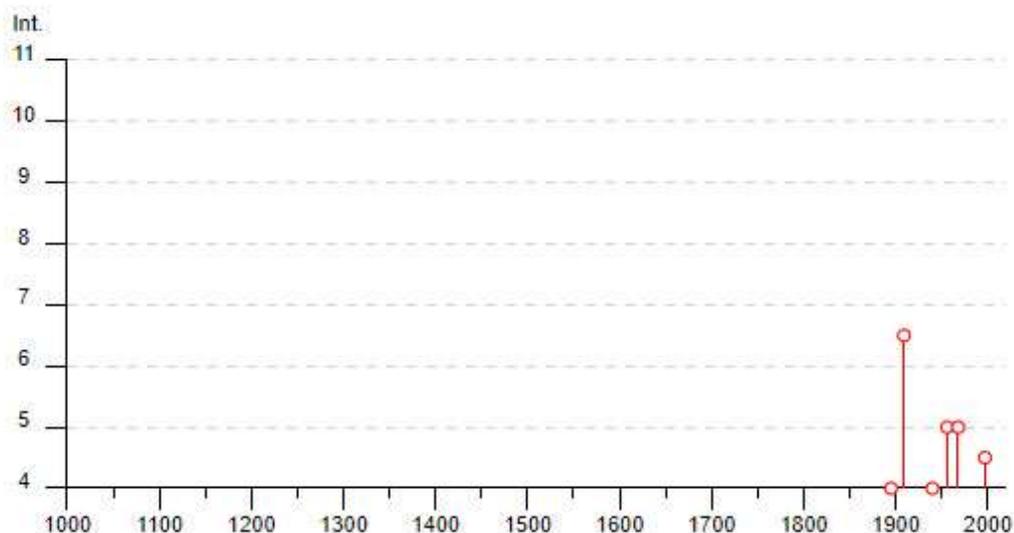


Figura 13: Diagramma dei terremoti storici di massima intensità – Comune di Sovicille.

5.4 CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA D'INDAGINE

Come è noto, un terremoto può trasmettere sia sollecitazioni dinamiche con fenomeni di amplificazione locale, che dare luogo a fenomeni di instabilità dinamica con cedimenti, liquefazione e frane. Pertanto in fase di progettazione di opere in zone sismiche, è necessario partire dall'ipotesi di un "terremoto di progetto", basato sulla conoscenza della sismicità della zona.

In base all'emanazione dei criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale tramite l'OPCM 3274/03, in seguito aggiornata con l'OPCM 3519 del 28 aprile 2006 "Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale", si evidenzia che i Comuni di Monticiano, Murlo e Sovicille in riferimento alla Classificazione sismica dei comuni italiani aggiornata nel 2015 dal Dipartimento della Protezione Civile, ricade in una zona identificata come "zona 3" (vedi Tabella 4).

Tabella 4: Estratto da "Classificazione sismica dei comuni italiani – 2015 - Dipartimento della Protezione Civile".

Regione	Provincia	Cod_Istat	Denominazione	Zona sismica 2014
Toscana	Siena	09052018	Monticiano	3
Toscana	Siena	09052019	Murlo	3
Toscana	Siena	09052034	Sovicille	3

5.5 PERICOLOSITÀ SISMICA DELL'AREA D'INDAGINE

Si evidenzia che le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. del 14/01/2008 successivamente aggiornate con DM 01/2018), hanno superato il concetto della classificazione del territorio nelle quattro zone sismiche e propongono una nuova zonazione fondata su un reticolo di punti di riferimento con intervalli di a_g pari a 0.025 g, costruito per l'intero territorio nazionale. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g e dei principali “parametri spettrali” riferiti all'accelerazione orizzontale e verticale su suoli rigidi e pianeggianti, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica (fattore di amplificazione massima F_0 e periodo d'inizio del tratto dello spettro a velocità costante T^*_C). Il reticolo di riferimento ed i dati di pericolosità sismica vengono forniti dall'INGV e pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/>, attraverso le coordinate geografiche del sito (Figura 14).

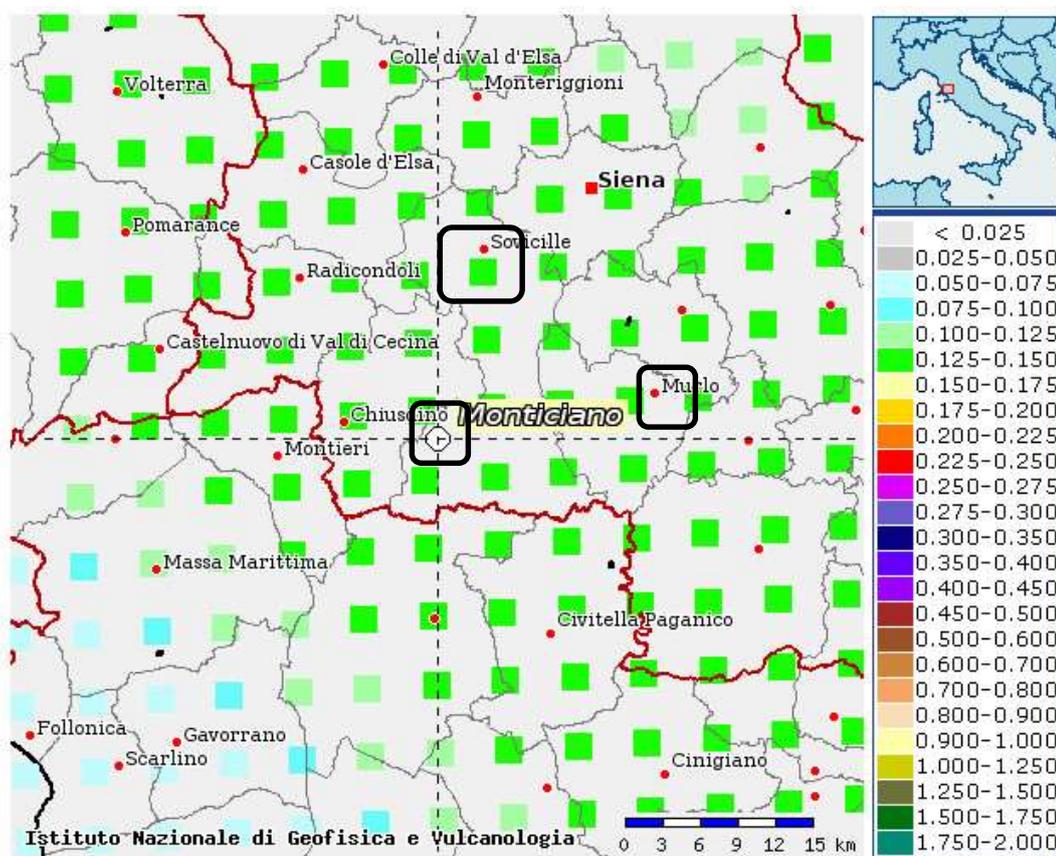


Figura 14: Mappa interattiva di pericolosità sismica dei comuni di Monticiano, Murlo e Sovicille (fonte INGV).

Prendendo in considerazione la “Mappa interattiva della pericolosità sismica” del territorio nazionale, edita dall'INGV, si evince, per i territori comunali di **Monticiano, Murlo e Sovicille**, una probabilità pari al 10% di raggiungimento o superamento di un'accelerazione di picco compresa tra **0.125 e 0.150** (g) su terreno rigido nell'intervallo temporale di 50 anni (Figura 15).

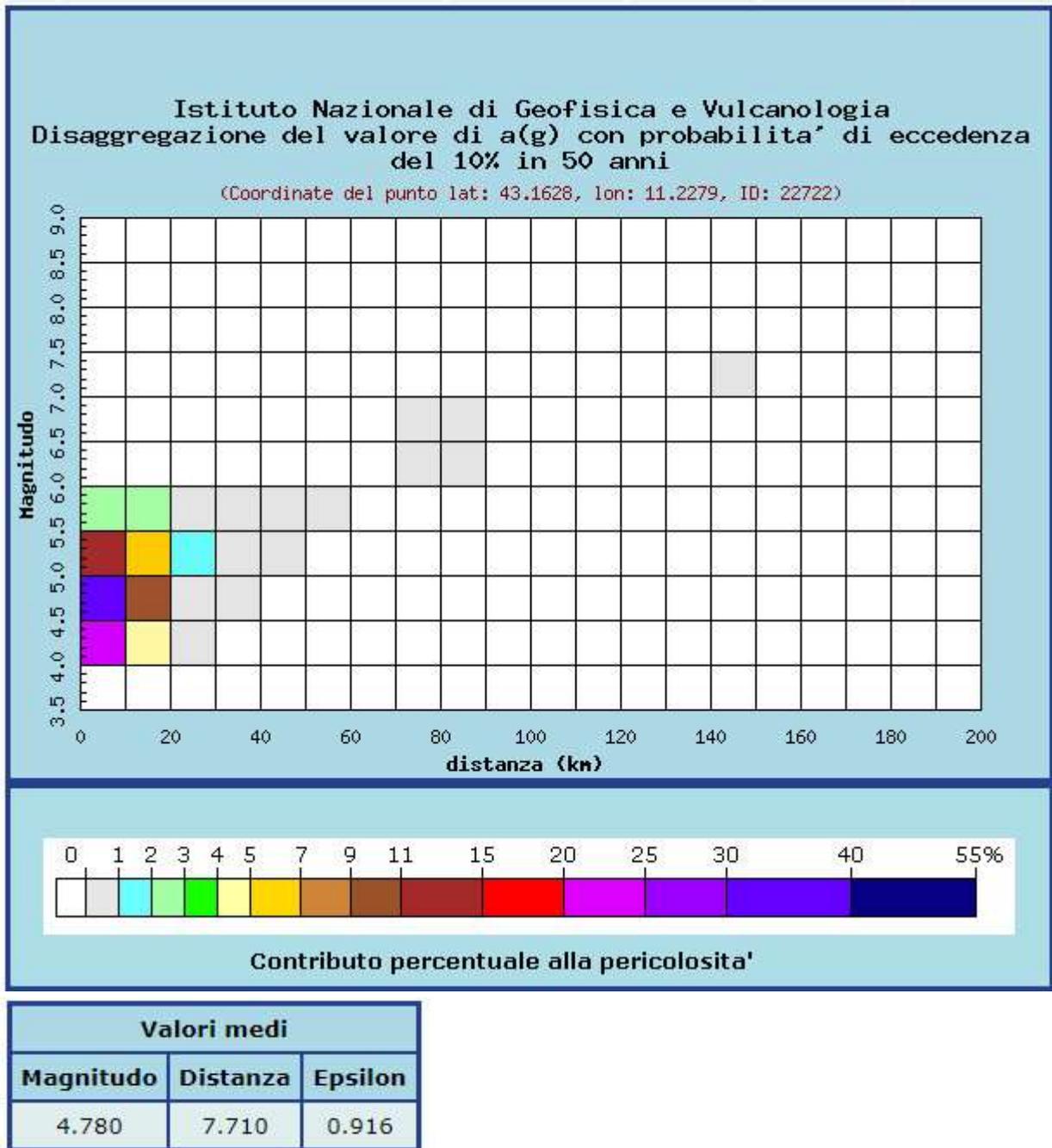


Figura 15: Grafico inerente alla Disaggregazione del valore di a_g riferito al comune di Monticiano.

Dal grafico riportato in Figura 13, relativo al territorio del comune di Monticiano (ritenuto rappresentativo per il lotto in esame), si può concludere che per SLV risultano:

- Eventi sismici aventi Magnitudo (M_w) comprese tra 4.0 e 6.0;
- Distanze epicentrali degli eventi comprese tra 0 e 30 km.

5.6 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

La nuova normativa sismica italiana O.P.C.M. n. 3274/2003 e successive modifiche ed integrazioni, la normativa tecnica europea (Eurocodici EC 7 e EC 8) e le più avanzate normative internazionali, attribuiscono la giusta importanza alla caratterizzazione sismica del terreno su cui dovranno essere realizzate opere di qualunque natura (edifici residenziali e industriali, opere di sostegno e di stabilizzazione di versanti, rilevati stradali, opere infrastrutturali, argini, dighe e opere idrauliche, gallerie, ponti e opere strutturali di grandi dimensioni).

La caratterizzazione del terreno dal punto di vista sismico in particolare e dinamico in generale, richiede come elemento indispensabile la conoscenza del profilo di velocità delle onde di taglio V_s degli strati di terreno presenti nel sito, fino alla profondità di almeno 30 m dal piano campagna, secondo quanto richiesto dalle sopracitate normative. Il profilo delle onde di taglio V_s nei primi 30 m di profondità risulta necessario per:

- valutare l'azione sismica di progetto al livello delle fondazioni di qualunque struttura;
- valutare il rischio di liquefazione del terreno in sito;
- valutare rischi di instabilità dei pendii e/o delle opere di sostegno;
- valutare i cedimenti dei rilevati stradali, delle opere di sostegno, delle fondazioni degli edifici

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio V_s è possibile determinare una velocità equivalente rappresentativa del sito in esame, che consente di classificare il sito secondo la nuova normativa sismica italiana o secondo la normativa europea Eurocodice 8.

Il calcolo della V_s equivalente viene eseguito utilizzando la seguente formula:

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

dove:

- h_i spessore dell' i -esimo strato
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato
- N numero di strati
- H profondità del substrato definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_s non inferiori a 800 m/sec

La classificazione si effettua sulla base dei valori della velocità equivalente V_s di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità o entro profondità inferiori nel caso si sia in presenza di un substrato sismico ($V_s > 800$ m/sec) a profondità inferiori di 30 m. Per le fondazioni superficiali tale profondità è riferita al piano d'imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni la profondità è riferita al piano d'imposta della fondazione.

Secondo le NTC 2018, entrate in vigore il 22 marzo 2018, il sottosuolo è classificato in 5 categorie (A, B, C, D ed E) come illustrato nella tabella seguente (Tab. 3.2.II delle NTC 2018).

Tabella 5: Classificazione del tipo di suolo secondo le NTC2018 (Tab. 3.2.II delle NTC2018).

Classificazione del tipo di suolo secondo le Nuove NORME tecniche sulle costruzioni NTC 17/01/2018		
Suolo	Descrizione geotecnica	V _{Seq} (m/s)
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori ad 800 m/sec eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessori massimo pari a 3 m	>800
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi fra 360 e 800 m/sec.	360÷800
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalenti compresi fra 180 e 360 m/sec	180÷360
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, 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 fra 100 e 180 m/sec	100÷180
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C e D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.	

Nei casi in cui le condizioni di sottosuolo non siano classificabili nelle categorie A, B, C, D ed E, la normativa prevede di predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale.

Nell'ambito della campagna d'indagine svolta nel 2019 per il Progetto Esecutivo sono state effettuate lungo il tracciato n° 6 verticali *Down-Hole* e n. 9 prospezioni *Masw*. Nelle tabelle che seguono (Tabella 6 e Tabella 7) si riassumono i risultati delle suddette prospezioni con le relative classificazioni sismiche valutate in base alle NTC 2008 e 2018 e alla OPC 3274/2003.

Tabella 6: Categorie di suolo di fondazione da prove *Down-Hole*.

SONDAGGIO	CAMPAGNA	PROFONDITA'	V _{S30} o V _{Seq} in caso di substrato sismico entro 30 m	CATEGORIA SUOLO
SG01-DH	2019	50	455 V _{S30}	B
SG05-DH	2019	45	649 V _{S30}	B
SG08-DH	2019	45	358 V _{S30}	C
SG09-DH	2019	45	402 V _{S30}	B
SG10-DH	2019	45	386 V _{S30}	B
SG11-DH	2019	45	356 V _{S30}	C

Tabella 7: Categorie di suolo di fondazione da Prospezioni *Masw*.

PROSPEZIONE	CAMPAGNA	LUNGHEZZA	V_{S30} o V_{Seq} in caso di substrato sismico entro 30m	CATEGORIA SUOLO
MASW1	2019	46	339 V_{S30}	C
MASW2	2019	46	339 V_{S30}	C
MASW3	2019	46	531 V_{S30}	B
MASW4	2019	46	466 V_{S30}	B
MASW5	2019	46	462 V_{Seq} Substrato sismico a 13,3 m	B
MASW6	2019	46	450 V_{Seq} Substrato sismico a 23,4 m	B
MASW7	2019	46	276 V_{Seq} Substrato sismico a 22,9 m	E
MASW8	2019	46	545 V_{Seq} Substrato sismico a 13,5 m	B
MASW9	2019	46	445 V_{Seq} Substrato sismico a 24,7 m	B

I valori ottenuti dalle prove *Down-Hole* e *Masw* risultano in generale congruenti con altre indagini sismiche (a rifrazione in onde S) eseguite nella campagna di indagine 2019 e di cui si stimano i valori medi di V_S e la relativa categoria di suolo di fondazione (Tabella 8).

Tabella 8: Categorie di suolo di fondazione stimate da valori di VS in sismiche a rifrazione.

SISMICA A RIFRAZIONE	CAMPAGNA	LUNGHEZZA	Valori di V_S in funzione della profondità di investigazione	CATEGORIA SUOLO
LS01	2019	110	380÷600 V_S (su 30 m)	B
LS02	2019	110	380÷540 V_S (su 30 m)	B
LS05	2019	46	220÷480 V_S (su 20 m)	C
LS06	2019	46	200÷460 V_S (su 15 m)	C
LS07	2019	110	360÷480 V_S (su 30 m)	B
LS08	2019	46	360÷500 V_S (su 15m)	B
LS09	2019	110	600÷800 V_S (su 30m) (con $V_S > 800$ a 20 m)	B
LS10	2019	110	600÷750 V_S (su 30m)	B

Per il dettaglio delle sopraelencate indagini geofisiche utilizzate per la classificazione sismica del sito e dei suoli si rimanda all’elaborato (T00GE00GEORE12-A Indagini geognostiche 2019 – Indagini geofisiche) ed alla carta sismica (T00GE00GETCS01/02-A) in cui sono posizionate le indagini geofisiche eseguite e le categorie sismiche relative.

Sulla base delle indagini eseguite e delle caratteristiche litologiche dei terreni, è stata effettuata una suddivisione del tracciato in sottotratti caratterizzati dalla medesima categoria di suolo sismica, come indicato nella tabella seguente; nella tabella sono indicate anche le prove sismiche eseguite in corrispondenza di ogni sottotratto.

Tabella 9: Categorie di suolo lungo il tracciato.

da prg	a prg	Categoria suolo	Prove sismiche eseguite in ogni tratto
41580	41950	B	LS1-LS2
			SG01 – DH
41950	42860	C	MASW1
			MASW2
42860	43310	B	MASW3
43310	43460	C	LS5-LS6
43460	46780	B	LS7-LS8
			MASW4
			MASW5
			MASW6
			SG05-DH
			MASW09
46780	47250	C	SG08-DH
47250	48420	E	MASW07
48420	50800	B	SG09-DH
			MASW8
			LS9-LS10
50800	50900	B	SG10-DH
50900	53859	C	SG011-DH

Per quanto riguarda le condizioni topografiche, la normativa prevede che per situazioni complesse debbano essere predisposte specifiche analisi di risposta sismica locale mentre, per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione (Tabella 10).

Tabella 10: Condizioni topografiche (Tab 3.2.III NTC 2018).

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 $i > 30^\circ$

Le sopra esposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

La morfologia del territorio in cui ricadono le opere è tale per cui è possibile considerare una categoria topografica media T1-T2 da verificare però in corrispondenza delle singole opere di progetto.

In funzione della categoria topografica ed utilizzando le tabelle del NTC 2018 si può valutare il coefficiente di amplificazione topografica S_T (Tabella 11).

Tabella 11: Condizioni topografiche (Tab 3.2.V NTC 2018).

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

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

5.7 DEFINIZIONE DELLE AZIONI SISMICHE DI PROGETTO

Con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), di cui al D.M. 14 gennaio 2008, successivamente aggiornate nel 2018, l'azione sismica di progetto, in base alla quale valutare il rispetto dei diversi stati limite nelle verifiche strutturali e geotecniche, è definita a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito ove ricadono le opere. Quest'ultima è espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido e superficie topografica orizzontale (categoria di sottosuolo A, ammassi rocciosi o terreni molto rigidi con $V_{s,eq} > 800\text{m/s}$), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in

accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} , nel periodo di riferimento V_R .

La stima dei parametri spettrali necessari per la definizione dell'azione sismica di progetto viene effettuata calcolandoli direttamente per il sito in esame, utilizzando le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento riportato nell'Allegato B delle NTC 2018. La pericolosità sismica di un sito è descritta dalla probabilità che, in un fissato lasso di tempo, in tale sito si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato. Il suddetto lasso di tempo è denominato “periodo di riferimento” V_R , mentre la probabilità è denominata “probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento” P_{VR} .

Il periodo di riferimento V_R si ricava, per ciascun tipo di opera, moltiplicando la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

V_N = vita nominale della costruzione;

C_U = coefficiente d'uso dipendente dalla classe d'uso dell'opera.

La vita nominale V_N di un'opera è intesa come il numero di anni in cui la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata.

Nel caso in oggetto per le opere d'arte principali è stata assunta **$V_N = 100$ anni** (opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale) mentre per i rilevati è stata assunta **$V_N = 50$ anni**.

Con riferimento alle conseguenze di un'interruzione di operatività o di un eventuale collasso, in presenza di azioni sismiche, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. La classe d'uso viene stabilita sulla base della tipologia di viabilità.

Per le opere in progetto è stata assunta **classe d'uso IV**, corrispondente a 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 DM 5/11/2001, 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 ed a impianti di produzione di energia elettrica. A questa classe d'uso viene assegnato **$C_U = 2.0$** .

Sulla base dei valori di V_N e di C_U sopra definiti ne consegue che il Periodo di Riferimento V_R risulta pari a:

$$\text{per } V_N = 50 \text{ anni} \quad \Rightarrow \quad V_R = V_N \cdot C_U = 50 \times 2 = 100 \text{ anni};$$

$$\text{per } V_N = 100 \text{ anni} \quad \Rightarrow \quad V_R = V_N \cdot C_U = 100 \times 2 = 200 \text{ anni}.$$

A partire dal periodo di riferimento V_R , e dalla probabilità P di superamento nel periodo di riferimento $V_R=f(P_{VR})$ associata allo stato limite di salvaguardia della vita (**SLV**), pari al 10%, è possibile calcolare, seguendo le istruzioni in allegato alle NTC 2018, il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R come:

per $V_N = 50$ anni $\Rightarrow T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR}) = 949$ anni;

per $V_N = 100$ anni $\Rightarrow T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR}) = 1898$ anni.

Avendo definito il periodo di ritorno, la forma dello spettro di risposta dipende dai seguenti parametri definiti per un sito rigido, con superficie topografica orizzontale:

- **a_g** : accelerazione orizzontale massima al sito;
- **F_0** : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- **T_c^*** : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nelle tabelle nell'allegato B del testo delle NTC 2018, i suddetti valori vengono forniti, in funzione delle coordinate geografiche, per una griglia di punti prefissati sul territorio: i valori per luoghi geografici situati in punti intermedi della griglia si ottengono per interpolazione sui quattro punti adiacenti.

Nello specifico, per l'area in esame si è fissato come riferimento indicativo un punto baricentrico del tracciato con coordinate geografiche:

N: 43.17015 E: 11.28267

L'interpolazione dei valori di griglia ha fornito i seguenti valori per le grandezze caratteristiche del sisma di progetto per le verifiche SLV, al variare della vita nominale V_N :

V_N [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]
50	0.174	2.526	0.283
100	0.210	2.563	0.289

Si precisa fin da subito che considerando le coordinate specifiche delle diverse opere lungo il tracciato in oggetto, i valori sopra indicati risultano praticamente identici.

La risposta sismica locale è ulteriormente condizionata dalle caratteristiche stratigrafiche e topografiche specifiche del sito; in quest'ottica la normativa prevede l'introduzione del fattore di sito S definito come:

$$S = S_S \cdot S_T$$

dove:

S_S : coefficiente di amplificazione stratigrafica, funzione della categoria di suolo;

S_T : coefficiente di amplificazione topografica, dipendente dall'andamento della superficie topografica.

Per quanto riguarda il coefficiente topografico S_T , si è assunta la categoria topografica T1 (zone pianeggianti, cfr. Tabella 10) a cui corrisponde un coefficiente $S_T=1$.

Alla luce dei risultati delle indagini specifiche, per gran parte del tracciato può essere assunta la categoria di sottosuolo B; tuttavia, localmente si riscontrano le categorie C ed E. Per maggiori dettagli si rimanda alla Carta Sismica (Elaborati T00-GE00-GET-CS01÷02).

La tabella seguente riepiloga le grandezze necessarie per la definizione dell'azione sismica per le verifiche delle opere lungo il tracciato, in condizioni SLV.

Tabella 12: Riepilogo grandezze necessarie per la definizione dell'azione sismica.

Stato limite	Vita Nominale V_N	Classe d'uso	CU	ag/g	Cat. terreno	S_T	F_0	S_S	a_{max}/g
	[anni]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
SLV	50	IV	2	0.174	B	1.0	2.526	1.200	0.209
SLV	50	IV	2	0.174	C	1.0	2.526	1.436	0.250
SLV	50	IV	2	0.174	E	1.0	2.526	1.517	0.264
SLV	100	IV	2	0.210	B	1.0	2.563	1.185	0.209
SLV	100	IV	2	0.210	C	1.0	2.563	1.377	0.289
SLV	100	IV	2	0.210	E	1.0	2.563	1.408	0.296

Si riportano di seguito gli spettri di progetto valutati per opere con $V_N = 50$ anni e $V_N = 100$ anni, con riferimento alle condizioni di SLV.

SPETTRI DI PROGETTO

Vengono riportati di seguito gli spettri di risposta ed i relativi parametri sismici ottenuti considerando tutti gli aspetti descritti nei precedenti paragrafi.

➤ **$V_N = 50$ anni, Categoria di sottosuolo B e categoria topografica T1**

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

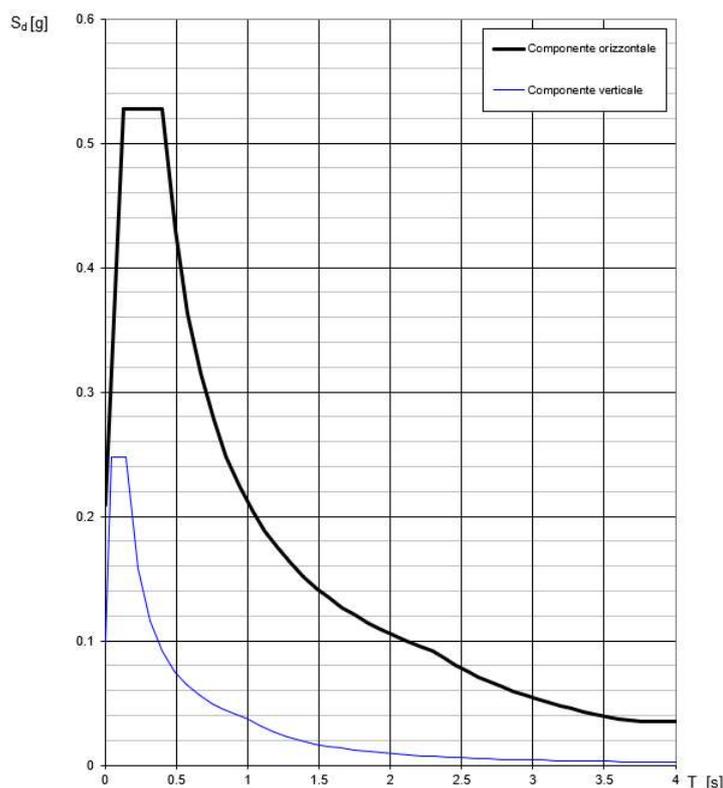


Figura 16: Tratti con categoria di sottosuolo B - spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontale e verticale allo SLV (per $V_N = 50$).

Tabella 13: Tratti con categoria di sottosuolo B – Vita Nominale $V_N = 50$ - Valori di riferimento per lo spettro di risposta.

PARAMETRI	SLV
a_g (g)	0.174
F_0	2.526
S_S	1.200
S_T	1.000
T_B (s)	0.133
T_C (s)	0.400
T_D (s)	2.296
η	1.000

➤ **$V_N = 50$ anni, Categoria di sottosuolo C e categoria topografica T1**

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

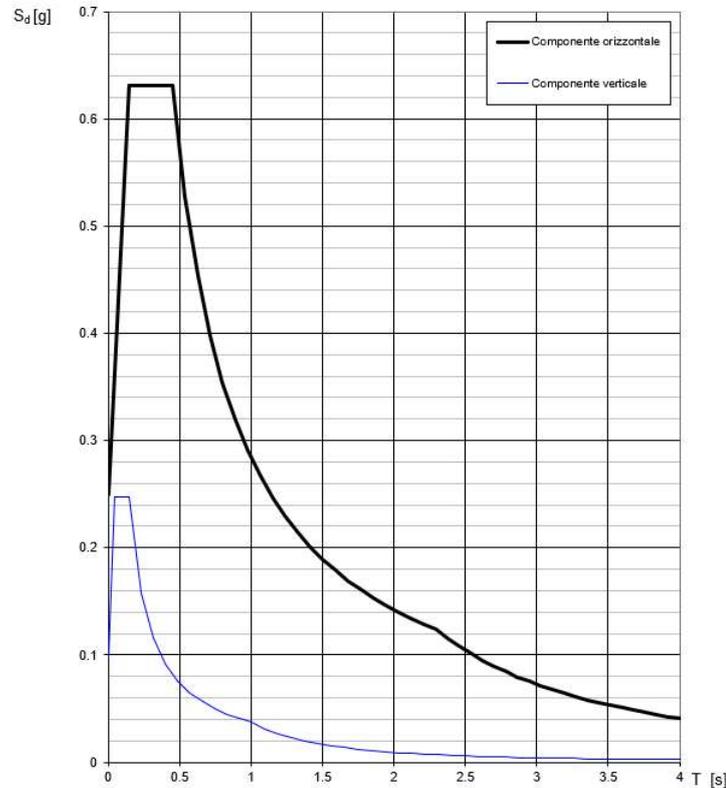


Figura 17: Tratti con categoria di sottosuolo C - spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontale e verticale allo SLV (per $V_N = 50$).

Tabella 14: Tratti con categoria di sottosuolo C – Vita Nominale $V_N = 50$ - Valori di riferimento per lo spettro di risposta.

PARAMETRI	SLV
a_g (g)	0.174
F_0	2.526
S_S	1.436
S_T	1.000
T_B (s)	0.150
T_C (s)	0.450
T_D (s)	2.296
η	1.000

➤ $V_N = 50$ anni, Categoria di sottosuolo E e categoria topografica T1

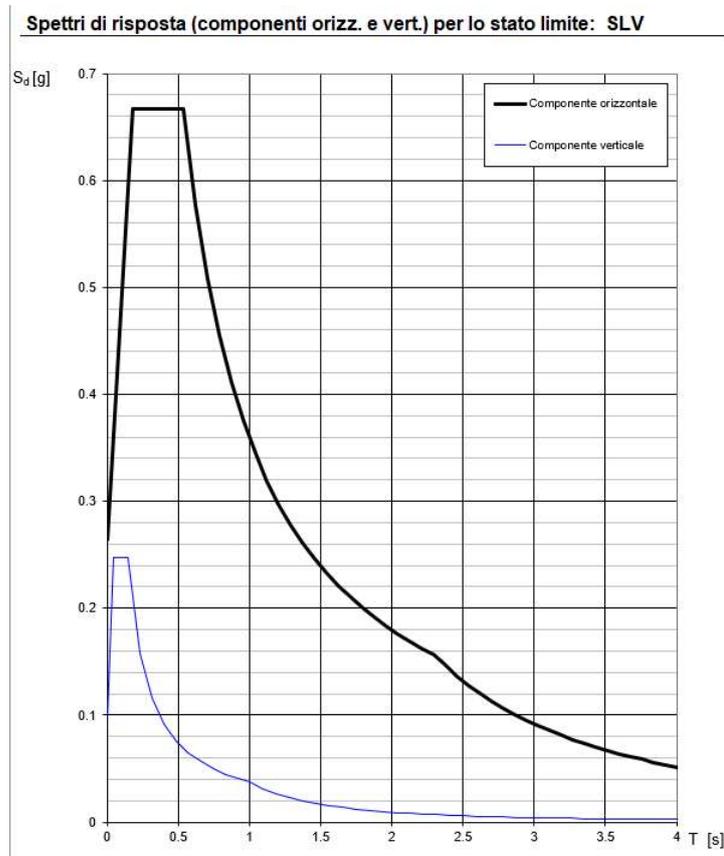


Figura 18: Tratti con categoria di sottosuolo E - spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontale e verticale allo SLV (per $V_N = 50$).

Tabella 15: Tratti con categoria di sottosuolo E – Vita Nominale $V_N = 50$ - Valori di riferimento per lo spettro di risposta.

PARAMETRI	SLV
a_g (g)	0.174
F_0	2.526
S_S	1.517
S_T	1.000
T_B (s)	0.180
T_C (s)	0.539
T_D (s)	2.296
η	1.000

➤ $V_N = 100$ anni, Categoria di sottosuolo B e categoria topografica T1

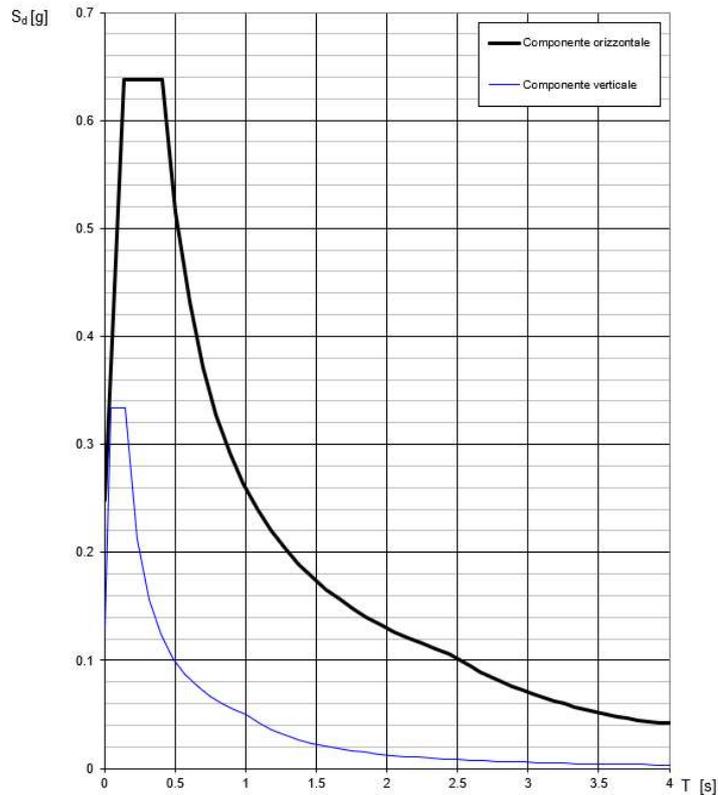


Figura 19: Tratti con categoria di sottosuolo B - spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontale e verticale allo SLV (per $V_N = 100$).

Tabella 16: Tratti con categoria di sottosuolo B – Vita Nominale $V_N = 100$ - Valori di riferimento per lo spettro di risposta.

PARAMETRI	SLV
a_g (g)	0.210
F_0	2.563
S_s	1.185
S_T	1.000
T_B (s)	0.136
T_C (s)	0.407
T_D (s)	2.441
η	1.000

➤ $V_N = 100$ anni, **Categoria di sottosuolo C e categoria topografica T1**

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

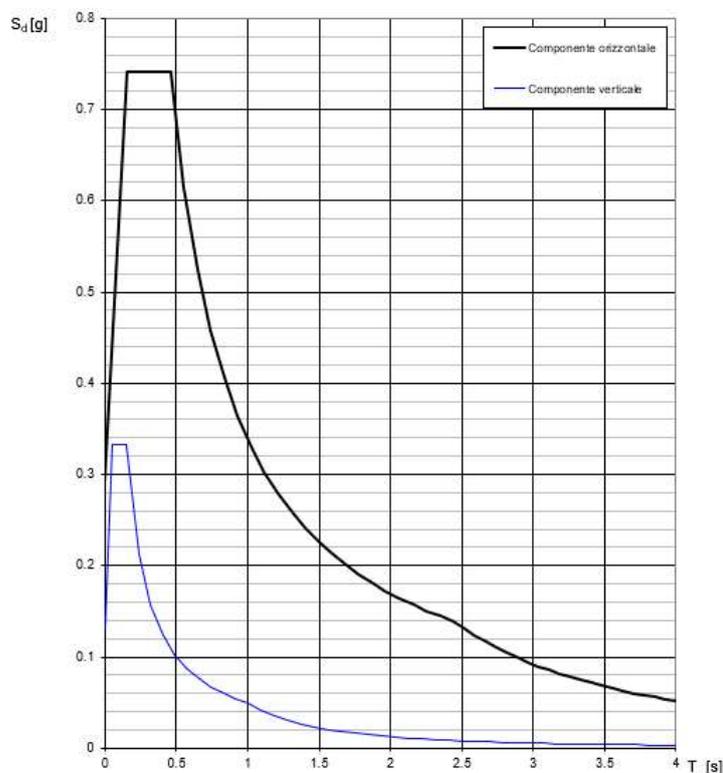


Figura 20: Tratti con categoria di sottosuolo C - spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontale e verticale allo SLV (per $V_N = 100$).

Tabella 17: Tratti con categoria di sottosuolo C – Vita Nominale $V_N = 100$ - Valori di riferimento per lo spettro di risposta.

PARAMETRI	SLV
a_g (g)	0.210
F_0	2.563
S_S	1.377
S_T	1.000
T_B (s)	0.152
T_C (s)	0.457
T_D (s)	2.441
η	1.000

➤ $V_N = 100$ anni, **Categoria di sottosuolo E e categoria topografica T1**

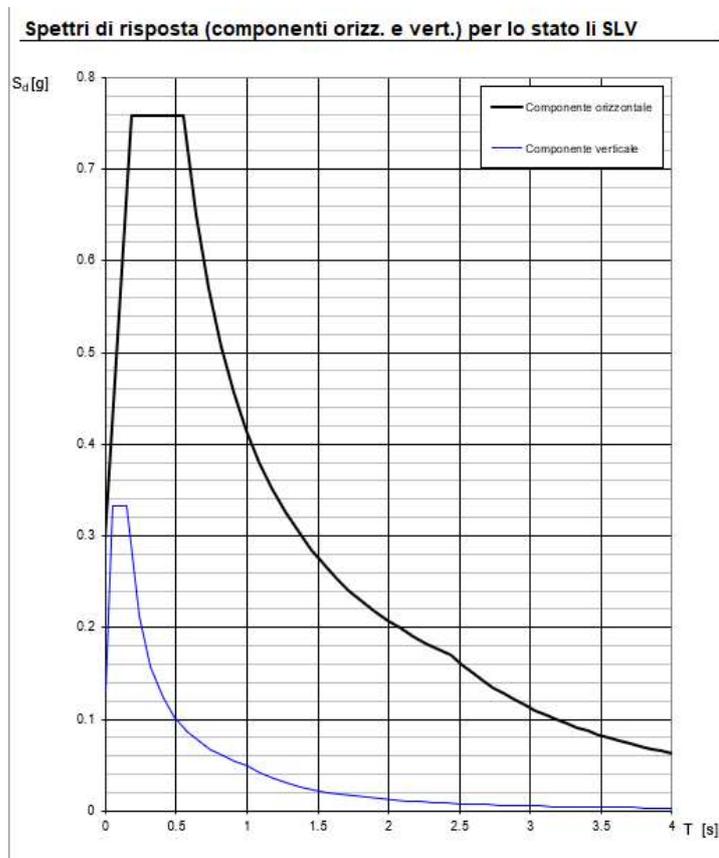


Figura 21: Tratti con categoria di sottosuolo E - spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontale e verticale allo SLV (per $V_N = 100$).

Tabella 18: Tratti con categoria di sottosuolo E – Vita Nominale $V_N = 100$ - Valori di riferimento per lo spettro di risposta.

PARAMETRI	SLV
a_g (g)	0.210
F_0	2.563
S_S	1.408
S_T	1.000
T_B (s)	0.182
T_C (s)	0.546
T_D (s)	2.441
η	1.000

5.8 ANALISI PSEUDO-STATICA

Nei metodi pseudo-statici l'azione sismica è definita mediante un'accelerazione equivalente costante nello spazio e nel tempo. Il vettore rappresentativo di tale forza ha punto di applicazione nel baricentro della massa esaminata, direzione nelle tre componenti spaziali X, Y e Z, verso in entrambi i sensi e modulo pari a:

$$F_{\text{sisma}} = W \cdot S_d(T_i)$$

con:

W : massa dell'elemento;

$S_d(T_i)$: accelerazione sismica funzione del periodo proprio di oscillazione della massa.

Per strutture che hanno periodo proprio di oscillazione pari a 0 (rigidezza k molto elevata, tipica di strutture che oscillano con il terreno) la corrispondente accelerazione $S_d(T=0)$ è proprio uguale all'accelerazione massima orizzontale attesa al sito a_{max} .

Una volta noti i parametri dello spettro di risposta, l'accelerazione massima attesa al sito a_{max} è valutabile come:

$$a_{\text{max}} = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

In base ai parametri definiti nel paragrafo precedente per ciascuna categoria di sottosuolo, con riferimento ad una vita nominale $V_N = 50$ anni (assunta per i rilevati) sul sito in esame si riscontrano le seguenti accelerazioni massime:

- $a_{\text{max}} = 0.209 \text{ g}$ nei tratti caratterizzati da categoria di suolo B ($V_N = 50$ anni);
- $a_{\text{max}} = 0.250 \text{ g}$ nei tratti caratterizzati da categoria di suolo C ($V_N = 50$ anni);
- $a_{\text{max}} = 0.264 \text{ g}$ nei tratti caratterizzati da categoria di suolo E ($V_N = 50$ anni).

5.9 STABILITÀ NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

In funzione delle caratteristiche granulometriche, stratigrafiche e idrogeologiche del sito si è ritenuto necessario procedere ad una verifica della suscettibilità alla liquefazione dei litotipi di fondazione delle nuove opere di tracciato.

Il fenomeno della liquefazione dei terreni durante i terremoti interessa in genere i depositi sabbiosi e/o sabbioso limosi sciolti a granulometria uniforme, normalmente consolidati e saturi.

Durante una sollecitazione sismica, infatti, le sollecitazioni indotte nel terreno possono determinare un aumento delle pressioni interstiziali fino ad eguagliare la pressione litostatica e la tensione di sconfinamento, annullando la resistenza al taglio e inducendo fenomeni di fluidificazione.

La probabilità che un deposito raggiunga tali condizioni dipende:

- dal grado di addensamento;
- dalla granulometria e forma dei granuli;

- dalle condizioni di drenaggio;
- dall'andamento ciclico delle sollecitazioni sismiche e loro durata;
- dall'età del deposito;
- dalla profondità della linea di falda.

Normalmente con l'aumentare della profondità aumenta anche la resistenza alla liquefazione a causa dell'aumento della resistenza allo sconfinamento.

Per quanto stabilito dal D.M. 01/18 nei confronti della liquefazione, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

- accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
- profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$, oppure $q_{c1N} > 180$.
- distribuzione granulometrica esterna ai fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione indicati dalla Normativa (NTC 2018, paragrafo 7.11.3.4.2).

Dall'analisi dei risultati delle indagini eseguite non è possibile escludere a priori il rischio di liquefazione dei terreni presenti nell'area di progetto; in ciascun tratto del tracciato stradale interessato dalla presenza di terreni sabbiosi, sono state pertanto condotte delle apposite verifiche a liquefazione, per le quali si rimanda alla Relazione geotecnica (elaborato T00-GE00-GET-RE01-A).