



**COMUNE DI  
MACUGNAGA**



PROVINCIA DEL VCO



REGIONE PIEMONTE

**D.M. 14/01/2008**

*"NORME TECNICHE SULLE COSTRUZIONI"*

**CIRCOLARE 2 febbraio 2009 n°617 C.S.LL.PP.**

*"ISTRUZIONI PER L'APPLICAZIONE DELLE NUOVE NORME TECNICHE SULLE COSTRUZIONI"*

**D.P.R. N. 207/2010**

**Studio Geologico EPIFANI dr. FULVIO**

Via XX Settembre 73 - 28041 Arona (NO)

Tel 0322/241531 - fax 0322/48422

e-mail: [fulvio.epifani@tin.it](mailto:fulvio.epifani@tin.it)

dott. geol. fulvio epifani

**LAVORI DI RIFACIMENTO  
PONTE CARRABILE  
SUL TORRENTE QUARAZZA  
IN LOCALITÀ FORNARELLI**

**- PROGETTO ESECUTIVO -**

Codice lavoro

File

Relazione.doc

Scala

Emissione

Novembre 2011

**RELAZIONE GEOLOGICA**

Committente: Amministrazione comunale

revisione

oggetto

data

1

2

3

## SOMMARIO

1	PREMESSA.....	3
	1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	3
2	INQUADRAMENTO DELL'AREA .....	4
	2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO .....	4
	2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	4
	2.3 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO .....	5
	2.4 INQUADRAMENTO GEOIDROLOGICO .....	6
	2.5 INQUADRAMENTO LITOTECNICO .....	7
	2.6 CARTA DELLE VALANGHE.....	8
	2.7 CARTA DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLE AMPLIFICAZIONI SISMICHE .....	10
3	ANALISI IDROGEOLOGICA.....	13
	3.1 DETERMINAZIONE DELLA PORTATA DI PIENA .....	13
	3.1.1 CURVA DI PROBABILITÀ PLUVIOMETRICA.....	13
	3.2 VALUTAZIONE DELLE PORTATE DI MASSIMA PIENA.....	14
	3.3 VERIFICA DELLA SEZIONE DI DEFLUSSO .....	16
4	ANALISI SISMICA .....	19
	4.1 GENERALITÀ SULLE ONDE SISMICHE .....	19
	4.1.1 ONDE DI CORPO.....	19
	4.1.2 ONDE SUPERFICIALI.....	20
	4.2 IL METODO MASW.....	21
	4.2.1 MODALITÀ DI ESECUZIONE, STRUMENTAZIONE E SQUADRA .....	22
	4.2.2 ELABORAZIONE DEI DATI .....	23
	4.3 CARATTERISTICHE INDAGINE ESEGUITA E COMMENTO DEI RISULTATI.....	25
	4.4 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO .....	26
5	CARATTERIZZAZIONE SISMICA .....	28
6	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	32
7	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	33



## 1 PREMESSA

L'Amministrazione Comunale intende procedere ai lavori di rifacimento del ponte carrabile in loc. Fornarelli, lungo il Torrente Quarazza, immissario destro del Torrente Anza, che vada a sostituire quello esistente ormai vetusto e ammalato, così da migliorare e mettere in sicurezza il transito veicolare.

Il territorio in esame è stato accuratamente investigato dallo scrivente al fine di verificare la compatibilità dell'opera con l'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dei luoghi.

### 1.1 *NORMATIVA DI RIFERIMENTO*

La presente indagine viene svolta in ottemperanza alle prescrizioni della normativa vigente, in particolare:

- D.M. 14.01.2008 "NORME TECNICHE SULLE COSTRUZIONI"
- 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";
- Linee guida NTC 08 – Gruppo Interregionale ORDINE DEI GEOLOGI, Luglio 2010
- D.P.R. n.207/2010

## 2 INQUADRAMENTO DELL'AREA

### 2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il ponte oggetto della presente indagine è ubicato in Comune di Macugnaga (VB) in località Fornarelli sul Torrente Quarazza, immissario in destra idrografica del T. Anza.

Secondo la cartografia ufficiale, l'intervento è inserito nella Sezione n° 071040 "Macugnaga" delle Carte Tecniche Regionali a scala 1:10.000, e nel FG. 30 IV NO MACUGNAGA delle I.G.M..

Le coordinate U.T.M. sono 32TMR219901.

### 2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Dal punto di vista geologico, la zona in analisi rientra nel Foglio n° 15 "Domodossola" della Carta Geologica d'Italia scala 1:100.000.

Il substrato lapideo è rappresentato in zona dai litotipi appartenenti alla Falda del Monte Rosa (Unità Pennidiche superiori), mentre relativamente ai depositi continentali quaternari, si osservano estese coperture di sedimenti di ambiente glaciale, sia in facies di till di ablazione sia di alloggiamento, e subordinatamente fluvio-glaciale e fluviale.

In riferimento alla carta geologica allegata, è possibile osservare come, nell'area interessata dal progetto, affiorino le seguenti unità:

#### **SUBSTRATO**

- Graniti e gneiss granitici a grana grossa prevalente, struttura scistosa, massiccia e tabulare; gneiss occhiadini con struttura a flaser grossolana.
- Ortogneiss tabulari e massicci talora granatiferi.

#### **DEPOSITI QUATERNARI**

I depositi superficiali sono costituiti da:

- *alluvioni recenti*: sono distribuite lungo tutto il corso del Torrente Anza. Si tratta di depositi prevalentemente ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi;
- *depositi fluvio-glaciali*: costituiscono buona parte del fondovalle del Torrente Anza. Da un punto di vista granulometrico prevalgono le ghiaie sabbiose a pezzatura medio-piccola, con stratificazione incrociata ed intercalazioni sabbioso-siltose;
- *depositi di versante*: sono distribuiti alla base delle pareti rocciose, sia verso il fondovalle che alle quote più elevate, e sono costituiti da materiale a pezzatura anche grossolana; in alcuni casi è presente materiale più fine (sabbia limo) che funge da legante;
- *depositi detritici ed eluvio-colluviali*: diffusi su gran parte del territorio, costituiscono i prodotti di disfacimento in loco del substrato roccioso (depositi eluviali) che possono subire un limitato trasporto sia gravitativo sia idrico lungo superfici anche lievemente inclinate;
- *depositi glaciali*: si tratta di depositi caratterizzati dall'intensa eterogeneità granulometrica in quanto costituiti da sabbia fine, limo e blocchi di diversa natura petrografica;
- *conoidi di detrito*: si tratta di depositi grossolani incoerenti, generalmente non stabilizzati,

ubicati in prossimità delle zone più acclivi e caratterizzati dalla quasi totale assenza di materiale fine;

- *conoidi alluvionali*: sono ubicate allo sbocco dei rii affluenti nel T. Anza. Si tratta spesso di conoidi antiche riattivate con gli eventi alluvionali maggiori o comunque riattivabili anche in futuro in relazione alle condizioni del corso d'acqua a monte.
- *depositi di frana*: derivanti, nel caso specifico, da fenomeni di crollo in roccia. Costituiti da un accumulo disorganizzato di materiale sciolto a granulometria variabile dalla ghiaia ai massi. Non presentano organizzazione interna, ma un graduale aumento delle dimensioni dei blocchi dall'apice alla base del deposito. Sono presenti alla base di pareti rocciose a elevata pendenza e presentano un'inclinazione variabile tra 20° e 40°.

L'area d'intervento è impostata sui depositi fluvioglaciali ghiaioso-sabbiosi e ciottolosi con copertura pedogenetica poco evoluta.

### 2.3 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Dal punto di vista geomorfologico nell'area in esame possono essere riconosciute forme dovute a diversi tipi di processi:

1. *FORME DI VERSANTE DOVUTE ALLA GRAVITÀ*: si dividono in forme di denudazione e forme di accumulo, attive o riattivabili e quiescenti.

I dissesti gravitativi possono essere classificati prevalentemente nel gruppo delle frane di crollo/ribaltamento, seguendo la nomenclatura internazionale di uso corrente (Varnes, 1996).

Si individuano generalmente nicchie di frane di crollo o scarpate di denudazione in roccia, diffuse ampiamente su tutti i versanti del territorio comunale. Di dimensioni variabili, sono generalmente connesse a fasce cataclastiche di lineamenti tettonici e danno luogo a forme particolarmente evidenti.

Tra le forme di accumulo sono da segnalare, in quanto diffusi su gran parte del territorio, i depositi detritici ed eluvio-colluviali, suddivisi in attivi e stabilizzati con copertura vegetale e sottili coltri pedogenetiche.

Ad essi si aggiungono i corpi di frana di crollo, ove chiaramente riconoscibili, ed i cono di detrito. In carta sono stati inoltre riportati i massi, individuati al piede delle pareti rocciose, chiaramente riconducibili a crolli isolati.

2. *FORME FLUVIALI, FLUVIOGLACIALI E DI VERSANTE*: si distinguono in forme di erosione e forme di accumulo, subordinatamente in forme attive e non attive.

Tra le prime sono state riconosciute numerose forme legate a morfogenesi lungo versante, strettamente controllate dall'assetto tettonico, litologico e fisiografico locale. Direttamente connesse alla tettonica si segnalano le vallecole a "V", che dissecano profondamente i versanti lungo andamenti rettilinei ed ortogonali alla valle principale, diffuse pressoché ovunque. Collegati all'azione di degradazione superficiale sono le superfici interessate da ruscellamento

sia concentrato che diffuso, quest'ultimo ben sviluppato soprattutto nelle aree caratterizzate da depositi glaciali di recente deposizione.

Tra le forme fluviali sono state riconosciute le scarpate di erosione fluviale e le tracce di paleoalveo, determinate dalla dinamica fluviale del torrente Anza.

Tra le forme di accumulo sono compresi i sedimenti relativi a facies di canale e di barra longitudinale dell'alveo attivo del T. Anza, quelli riferibili a deposizione in facies fluvioglaciale (così definibile in relazione alla morfologia, alla facies dei sedimenti che la costituiscono e agli effetti degli eventi alluvionali avvenuti in passato) e i conoidi alluvionali.

Per quanto riguarda i conoidi di deiezione, questi sono diffusamente presenti alla confluenza delle valli secondarie con quella principale.

3. *FORME ED ELEMENTI DELL'IDROGRAFIA*: nella tavola sono stati perimetrati i principali alvei attivi e i bacini (glacio)lacustri.
4. *FORME GLACIALI*: le forme di erosione comprendono le scarpate che delimitano i pianori, in posizione di spalla glaciale, le creste e gli orli di circo e le soglie di valli sospese, mentre quelle di accumulo comprendono i sedimenti in facies di ablazione o di alloggiamento e i cordoni morenici.

#### 2.4 *INQUADRAMENTO GEOIDROLOGICO*

In base alle caratteristiche litologiche e tessiturali dei depositi presenti, sono stati distinti cinque complessi litologici aventi comportamento geoidrologico omogeneo.

Nel primo complesso sono stati inclusi tutti i depositi fluviali e fluvioglaciali ghiaioso-sabbiosi e ciottolosi e i conoidi di deiezione, olocenici e attuali, caratterizzati da una permeabilità variabile da buona ad elevata in relazione alla composizione granulometrica, con valori compresi tra  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  m/sec.

Nel secondo complesso sono stati inclusi i depositi detritici attivi e gli accumuli gravitativi in genere, caratterizzati da matrice scarsa o assente: i valori permeabilità possono essere compresi tra  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  m/sec.

Nel terzo complesso sono compresi i depositi detritici stabilizzati ed eluvio-colluviali, con matrice variabile ma generalmente scarsa, caratterizzati in genere da una permeabilità da buona a bassa, con valori compresi tra  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  m/sec.

Il quarto complesso è costituito dai depositi glaciali a tessitura eterogenea, con permeabilità da buona a bassa, anche in relazione all'età e alla facies deposizionale, e valori compresi tra  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  m/sec.

Il quinto complesso, infine, comprende le litologie del substrato con permeabilità da nulla a medio-bassa, laddove i litotipi presentano alti coefficienti di fratturazione.

In carta è riportato inoltre il reticolato idrografico, sia naturale che artificiale, oltre agli attraversamenti dei corsi d'acqua realizzati con manufatti scatolari o tubolari di sezione ridotta e ai tratti di alveo coperti. Sono inoltre riportate le fasce di rispetto delle captazioni idropotabili comunali, ai sensi del D.P.G.R. n.15R/06 e del D. Lgs. 152/06, rappresentate da sorgenti.

L'area in esame è impostata su depositi appartenenti al primo complesso.

## 2.5 INQUADRAMENTO LITOTECNICO

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche dei terreni, nella porzione di territorio analizzata si riconoscono i seguenti grandi gruppi:

### 1. *Depositi alluvionali*

In questa unità sono stati riuniti i depositi olocenici di fondovalle, relativi all'attività alluvionale del torrente Anza e dei suoi principali affluenti, i depositi di contatto glaciale ed i conoidi di deiezione di minor dimensione, caratterizzati da una granulometria prevalentemente medio-grossolana e basso grado di addensamento. A questi depositi può essere attribuita la seguente parametrizzazione geotecnica: angolo di attrito di picco pari a circa  $33^\circ \div 49^\circ$ , angolo di attrito interno a volume costante compreso tra  $30^\circ$  e  $35^\circ$ , coesione nulla e peso di volume di  $1,8 \text{ t/m}^3$ .

Per le categorie di suolo di fondazione, in relazione all'azione sismica di progetto da adottare, i suddetti sedimenti ricadono nella classe D "depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati" con valori di  $V_{s30} < 180 \text{ m/s}$  e di  $N_{SPT} < 15$ .

### 2. *Depositi fluvioglaciali*

Sono sedimenti costituiti da ghiaie e sabbie con ciottoli, con matrice sabbiosa variabile, relativi alle zone di fondovalle terrazzate ed ai maggiori conoidi di deiezione. A questi depositi può essere attribuita la seguente parametrizzazione geotecnica: angolo di attrito di picco pari a circa  $34^\circ \div 49^\circ$ , angolo di attrito interno a volume costante compreso tra  $32^\circ$  e  $36^\circ$ , coesione nulla e peso di volume di  $1,9 \text{ t/m}^3$ .

Per le categorie di suolo di fondazione, in relazione all'azione sismica di progetto da adottare, i suddetti sedimenti ricadono nella classe C "depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate con spessore di diverse decine di metri" con valori di  $180 < V_{s30} < 360 \text{ m/s}$  e di  $15 < N_{SPT} < 50$ .

### 3. *Depositi glaciali antichi*

Sono till di ablazione e di alloggiamento con matrice fine conglobante elementi litoidi di pezzatura eterogenea: i parametri dell'angolo di attrito interno di picco variano da  $28^\circ$  a  $35^\circ$ , angolo di attrito interno a volume costante compreso tra  $25^\circ$  e  $35^\circ$ , una coesione nulla ed un peso di volume pari a  $1,9 \text{ t/m}^3$ .

Per le categorie di suolo di fondazione, in relazione all'azione sismica di progetto da adottare, i suddetti sedimenti ricadono nella classe C "depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate con spessore di diverse decine di metri" con valori di  $180 < V_{s30} < 360 \text{ m/s}$  e di  $15 < N_{SPT} < 50$ .

### 4. *Depositi colluviali e detritici stabilizzati*

Si tratta di materiale a granulometria eterogenea, al quale è possibile attribuire un valore di angolo di attrito di picco molto variabile ( $32^\circ \div 38^\circ$ ) in relazione alla quantità di matrice fine presente, angolo di attrito interno a volume costante compreso tra  $30^\circ$  e  $35^\circ$ , coesione nulla, anche se è possibile sia presente una coesione apparente legata alle tensioni di capillarità nelle porzioni fini,



ed un peso di volume pari a  $1,9 \text{ t/m}^3$ . Va ricordato che gli spessori possono subire sostanziali variazioni da luogo a luogo, con riduzioni anche sensibili fino a rappresentare solo sottili coltri giacenti sopra il substrato.

Per le categorie di suolo di fondazione, in relazione all'azione sismica di progetto da adottare, i suddetti sedimenti ricadono nella classe D "depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati" con valori di  $V_{s30} < 180 \text{ m/s}$  e di  $N_{SPT} < 15$ .

#### 5. *Depositi detritici attivi ed accumuli di frana di crollo*

Si tratta di materiale a granulometria grossolana, al quale è possibile attribuire un valore di angolo di attrito di picco tra  $35^\circ \div 49^\circ$ , angolo di attrito interno a volume costante compreso tra  $32^\circ$  e  $38^\circ$ , coesione nulla ed un peso di volume pari a  $1,9 \text{ t/m}^3$ . Va ricordato che gli spessori possono subire sostanziali variazioni da luogo a luogo, con riduzioni anche sensibili fino a rappresentare solo sottili coltri giacenti sopra il substrato.

Per le categorie di suolo di fondazione, in relazione all'azione sismica di progetto da adottare, i suddetti sedimenti ricadono nella classe D "depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati" con valori di  $V_{s30} < 180 \text{ m/s}$  e di  $N_{SPT} < 15$ .

#### 6. *Substrato lapideo massivo*


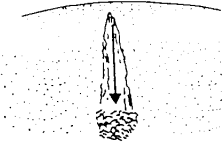
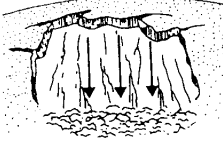
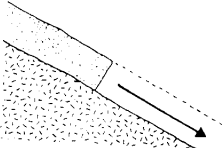
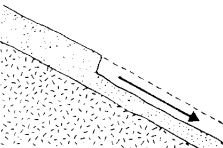

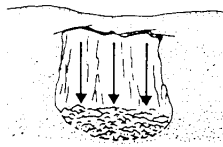
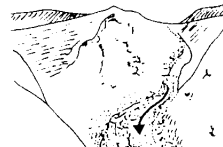
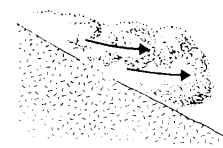
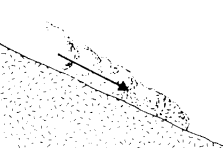
Al substrato lapideo prevalentemente massivo sono stati genericamente assegnati valori di parametrizzazione geotecnica che devono essere considerati solo come puramente indicativi, essendo le caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi fortemente influenzate dalle condizioni delle fratture che li dislocano. Genericamente si possono attribuire i seguenti valori: angolo di attrito  $25^\circ\text{-}35^\circ$ ,  $C = 5\text{-}30 \text{ t/m}^2$ , peso di volume  $2,5 \text{ t/m}^3$ .

### *Il tracciato in esame attraversa prevalentemente terreni appartenenti al litotipo 2.*

#### 2.6 *CARTA DELLE VALANGHE*

Con il termine di valanga (o slavina) si intende "lo scivolamento lungo un pendio di una certa quantità di neve".

Di una valanga possono essere distinte: la zona di rottura (o distacco), la zona di scorrimento e la zona di deposito (o accumulo). La classificazione più diffusa dei tipi di valanghe è quella proposta dalla Commissione Internazionale Neve e Ghiaccio (De Quervain et alii, 1973):

<h2 style="text-align: center;">CLASSIFICAZIONE DELLE VALANGHE</h2> <p style="text-align: center;">da ( Commissione Internazionale Neve e Ghiaccio, De Quervain et alii, 1973 )</p>		
CRITERIO	CARATTERISTICHE E NOMENCLATURA	
ZONA DI DISTACCO 	da un punto (puntiforme)  <b>A1- di neve a debole coesione (sciolta, incoerente)</b>	da un'area estesa (lineare)  <b>A2- a lastroni (di neve coerente)</b>
	all' interno del manto nevoso  <b>B1- di superficie</b>	al suolo  <b>B4- di fondo</b>
	<b>C1- di neve asciutta</b>	<b>C2- di neve bagnata</b>
ZONA DI SCORRIMENTO 	pendio aperto  <b>D1- di versante (non delimitata)</b>	canalone  <b>D2- di canalone (incanalata)</b>
	nell' aria  <b>E1- di neve polverosa (nubiforme)</b>	a contatto del suolo  <b>E2- radente</b>

Nella carta realizzata sono state distinte:

- le zone di distacco (in colore blu): sono state individuate in relazione alle evidenze morfologiche, a quelle ricavate dalle foto aeree ed ai dati contenuti nelle schede del lavoro del cap. Renato Testa (luglio 1981);
- le zone di scorrimento (indicate con le frecce): generalmente lo scorrimento di queste valanghe, dopo un tratto iniziale piuttosto ampio, tende ad incanalarsi all'interno di canali fortemente incisi;
- le zone di accumulo: sulla scorta della relazione redatta dal cap. Cresta, aggiornata con i nuovi dati raccolti, sono state distinte, per ciascuna valanga, le aree a maggiore e minore pericolosità (con le relative caratteristiche di energia a tempo di ritorno) e le aree interessate dal “soffio”.

*Infine va evidenziato che l'intervento non si trova in un settore interessato da fenomeni valanghivi.*

## 2.7 CARTA DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLE AMPLIFICAZIONI SISMICHE

L'osservazione di numerosi sismi avvenuti nel passato in territori urbanizzati, ha messo in luce l'esistenza di grandi irregolarità nella distribuzione delle intensità di un sisma e dei conseguenti effetti indotti sulle aree edificate.

Queste irregolarità spaziali, talora anche notevoli su brevissime distanze (centinaia di metri), devono quindi essere attribuite alla presenza di condizioni locali favorevoli o sfavorevoli di un sito, le quali influiscono direttamente sulle sollecitazioni indotte sugli edifici esistenti.

Sino ad alcuni decenni fa, la ricerca sugli aspetti sismici di un territorio era limitata solo alla definizione del terremoto di riferimento, come pericolosità sismica, ed alla individuazione delle caratteristiche costruttive sismo-resistenti di una sovrastruttura, sia esso edificio che opera infrastrutturale.

In realtà è stato osservato che le condizioni geologiche, geomorfologiche, fisiografiche e idrogeologiche di un territorio contribuiscono in modo talora determinante a produrre effetti diversi, sia in senso positivo che negativo, in caso di evento sismico: risulta pertanto indispensabile valutare la pericolosità sismica di un'area partendo da questi effetti, comunemente conosciuti come “effetti locali” o “risposta sismica locale”. Lo scopo prefisso risulta la definizione, quanto più precisa possibile, dell'azione sismica di progetto, da adottare per procedere ad una progettazione in sicurezza, a partire dalle mappe di accelerazione massima al suolo, definite per l'intero territorio nazionale.

Gli effetti locali possono essere suddivisi in:

- effetti di instabilità – processi di instabilità, indotti da un sisma a carico dei terreni presenti in un sito, che comprendono ad esempio:
  1. i movimenti franosi, per i quali il terremoto costituisce un fattore di innesco (aumento

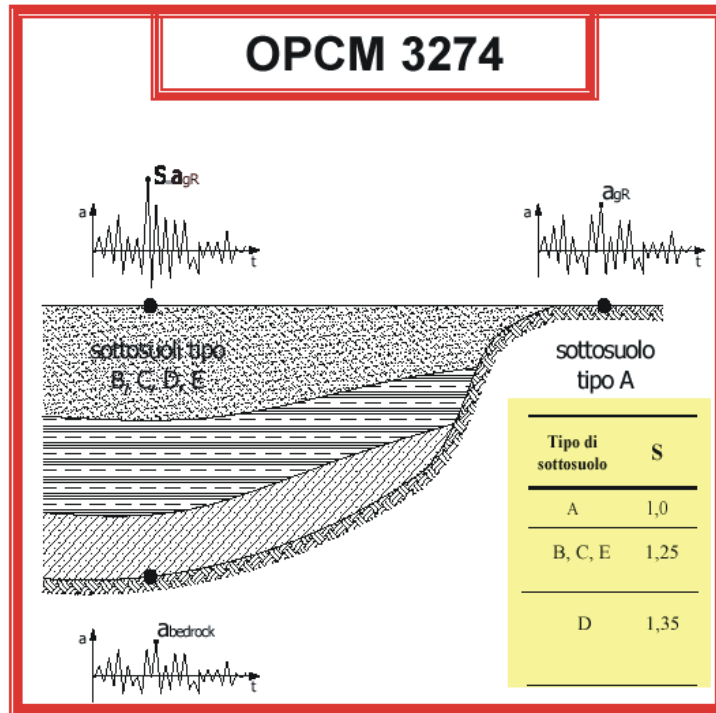
- dell'accelerazione al suolo o incremento delle pressioni interstiziali);
2. riattivazione di faglie sismogenetiche o di contatti stratigrafici, con movimenti differenziali del terreno;
  3. liquefazione o eccessivo addensamento dei terreni sottostanti una fondazione, con deformazioni permanenti del suolo;
- effetti di sito – interazione delle onde sismiche con le condizioni locali stratigrafiche e/o topografiche di un sito, le quali possono modificare le caratteristiche del moto sismico in superficie rispetto ai movimenti attesi sulla roccia, e comprendono ad esempio:
    1. effetti stratigrafici, con riflessioni multiple, rifrazioni e trasformazione di onde di volume in onde superficiali, legate all'eterogeneità dei terreni;
    2. effetti topografici, come si possono manifestare alla sommità di creste o al bordo vallivo, con contatto tra terreni meccanicamente molto diversi, dove possono occorrere concentrazioni di energia ed effetti ping-pong, con esaltazione dello scuotimento superficiale.

Sulla base delle analisi geologiche condotte, il territorio in esame è stato suddiviso in diverse aree, in relazione agli effetti locali prevedibili.

Sono stati pertanto indicati i settori interessati da movimenti franosi o da instabilità dei pendii e comunque tutte le zone genericamente soggette ad instabilità di versante. Sempre nell'ambito degli effetti di instabilità, sono stati individuati i settori di territorio caratterizzati da terreni sciolti o con mediocri/scadenti caratteristiche geotecniche, suscettibili di addensamenti sotto l'azione sismica, quali i paleovalvei e i depositi alluvionali sciolti.

Per quanto riguarda gli effetti di sito topografici, sono state riportate le zone di cresta ed i cordoni morenici, suscettibili di fenomeni di concentrazione di energia, e le zone di contatto tra litotipi con caratteristiche meccaniche molto diverse (contatti substrato/riempimenti quaternari), al bordo tra fondovalle e versanti.

Relativamente agli effetti stratigrafici, sono state riportate le categorie di suolo di fondazione, già illustrate nella carta litotecnica, alle quali è stato associato il corrispondente valore di  $S$ , che corrisponde al fattore che tiene conto del profilo stratigrafico nell'equazione per la definizione dello spettro elastico, moltiplicativo del valore di accelerazione massima al suolo  $a_{max}$  (pari per il territorio considerato a 0,15g), secondo lo schema di seguito riportato.



La definizione dettagliata della categoria di suolo di fondazione, con particolare attenzione all'individuazione di settori di pendio instabile o di terreni suscettibili di fenomeni di liquefazione o di eccessivo addensamento in caso di sisma, concorrerà a ricostruire il modello di riferimento per la descrizione del moto sismico del sito corrispondente allo spettro di risposta elastico. Per strutture di particolare importanza, realizzate sopra o nelle adiacenze di pendii con inclinazione  $> 15^\circ$  e altezza superiore a 30 m, dovrà inoltre essere adottato un coefficiente di amplificazione topografica da definire con studi specifici o, in assenza di questi, sulla base delle indicazioni della normativa di riferimento (cfr. all. 2 all'O.P.C.M. 3274/03).

Relativamente alle costruzioni su pendii, le indagini da effettuarsi in fase esecutiva dovranno necessariamente e adeguatamente essere estese al di fuori dell'area edificatoria, allo scopo di acquisire tutti gli elementi che concorrono a definire la stabilità dell'insieme opera-pendio in presenza di azione sismica.

In funzione di quanto detto è stata effettuata un'indagine sismica puntuale per valutare l'effettiva parametrizzazione locale.

### 3 ANALISI IDROGEOLOGICA

È stata sviluppata l'analisi del bacino idrografico relativo alla sezione di chiusura in corrispondenza del ponte da risistemare, in modo da valutare le portate affluenti e verificare la congruità dell'opera prevista. Viene fatto riferimento all'indagine svolta dal Dott. Ing. Chieu nel marzo 2011, che ha, in base alla normativa vigente, sviluppato i calcoli relativi alle portate massime affluenti.

Con i dati ottenuti è stata poi sviluppata la verifica idraulica del nuovo manufatto.

Il bacino in esame presenta una superficie pari a 26,20 km<sup>2</sup>: la perimetrazione è evidenziata nella tav. 8 "Bacino idrografico" in scala 1: 25.000.

#### 3.1 DETERMINAZIONE DELLA PORTATA DI PIENA

##### 3.1.1 Curva di probabilità pluviometrica

In assenza di misure di portata sufficienti per un'analisi statistica diretta della frequenza e intensità delle piene, si procede a una stima indiretta in base alle osservazioni pluviometriche relative al bacino idrografico sotteso e all'impiego di modelli afflussi-deflussi.

L'analisi quantitativa degli afflussi dovuti a piogge intense, per un determinato tempo di ritorno, è basata sulla determinazione della *curva di probabilità pluviometrica* ( $h_t$ ), ovvero della relazione che correla l'altezza di precipitazione alla sua durata, per un assegnato tempo di ritorno, mediante l'espressione:

$$h_t = a \cdot t^n$$

in cui

$h_t$  rappresenta appunto il massimo valore annuale di precipitazione di durata  $t$  che può essere eguagliato o superato mediamente una volta ogni  $T$  anni,

$T$  è il "Tempo di ritorno",

$a$  = altezza di pioggia critica della durata di 1 ora in mm

$n$  = valore costante caratteristico della stazione di riferimento o del bacino in esame

I parametri  $a$  e  $n$ , caratteristici della curva e funzioni del tempo di ritorno sono stati ricavati dal Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) del Bacino del Fiume Po, di cui alla D.G.R. n. 45-6656, del 15/07/2002.

Considerando che il corso d'acqua in esame è collocato all'interno del riquadro BI56, i parametri per i tempi di ritorno  $T_r$  200 anni sono:

$$a = 43,12$$

$$n = 0,582$$

In generale i parametri  $a$  ed  $n$  variano, in particolare:

- il valore  $a$  aumenta con l'incremento del tempo di ritorno;
- il valore  $n$  diminuisce con il crescere del tempo di ritorno.

La curva di probabilità pluviometrica per il tempo di ritorno  $T_r$  considerato è riportata nella tabella seguente:

TEMPO RITORNO $T_r$ (anni)	Curva di possibilità climatica
200	$h = 43,12 \cdot t^{0,528}$

È stato considerato il tempo di ritorno massimo, così che una volta verificata la situazione peggiore, risultano verificate anche tutte le condizioni intermedie.

### 3.2 VALUTAZIONE DELLE PORTATE DI MASSIMA PIENA

Le procedure adottabili per la stima delle portate di piena di un qualsiasi corso d'acqua si differenziano in funzione della disponibilità di serie storiche di dati idrologici significativi.

La situazione più favorevole si ha quando nella sezione di interesse sono disponibili valori di portata misurati per un periodo di osservazione sufficientemente lungo; poiché tale situazione si verifica raramente, a causa del modesto numero di stazioni di misura esistenti e del ridotto periodo di osservazione disponibile per alcune di esse, nella maggior parte dei casi si è nelle condizioni di dover stimare i valori delle portate di piena con metodi indiretti.

In tal caso le procedure a cui far riferimento sono le seguenti:

- impiego di modelli di regionalizzazione del dato idrometrico, costruiti tramite l'analisi statistica dei dati idrologici disponibili relativi a una porzione di territorio "regione idrologica", omogenea rispetto ai fenomeni di piena;
- analisi statistica delle osservazioni pluviometriche relative al bacino idrografico sotteso alla sezione di studio e impiego di modelli afflussi-deflussi per la trasformazione in portate.

Nel caso in esame si è fatto ricorso alla procedura indicata nella seconda categoria, in particolare all'applicazione del cosiddetto metodo razionale.

La formula di questo metodo risulta:

$$Q_{max} = \phi \cdot \varepsilon \cdot \frac{h(t_c)}{t_c} \cdot S, \text{ espresso in m}^3/\text{s}$$

dove:

- $Q_{max}$  = portata al colmo ( $\text{m}^3/\text{sec}$ );
- $\phi$  = coefficiente di corrivazione;
- $\varepsilon$  = coefficiente di afflusso (-);
- $h$  = intensità di pioggia ( $\text{mm}/\text{ora}$ );
- $S$  = area del bacino ( $\text{km}^2$ ).

Al prodotto  $\phi \times \varepsilon$  è stato assegnato un valore in prima approssimazione pari a 0,70 (suoli rocciosi o impermeabili). Nel calcolo sono state trasformate le unità (mm, km e ore) in metri e secondi.

Per tempo di corrivazione s'intende il tempo necessario affinché le acque di afflusso meteorico raggiungano la sezione di chiusura del bacino, rispetto alla quale viene eseguito il calcolo della portata di massima piena, partendo dai punti più lontani del bacino; una definizione forse migliore è che esso rappresenta l'intervallo di tempo dall'inizio della precipitazione, oltre al quale tutto il bacino contribuisce al deflusso nella sezione terminale.

Questo parametro è una costante per ogni bacino, in quanto funzione esclusivamente della morfologia, delle litologie affioranti e della copertura vegetale.

Un'indicazione sommaria dell'ordine di grandezza di  $t_c$  può essere ottenuto dividendo la lunghezza totale dell'asta principale per un fattore compreso fra 1 e 2:

$$t_c(\text{sec}) = L/(1 \text{ o } 2)$$

dove la lunghezza  $L$  viene espressa in metri.

Metodi di calcolo più precisi sono quelli proposti da Pezzoli e F.A.O., le cui formule risolutive forniscono il tempo di corrivazione in ore.

Per quanto riguarda il tempo di corrivazione, per il bacino in esame viene calcolato, in via approssimativa, con la formula di Giandotti valida per bacini di dimensioni superiori a 10 km<sup>2</sup>:

$$t_c(h) = (4 \cdot \sqrt{S} + 1,5 \cdot L) / (0,8 \cdot \sqrt{H_1})$$

dove:

- $S$  = area del bacino (km<sup>2</sup>);
- $L$  = lunghezza dell'asta = 5,70 km
- $H_1$  = altezza media del bacino rispetto alla sezione di calcolo

L'altezza media del bacino sulla sezione di calcolo risulta:

$$H_1 = H - M_{\min}$$

dove:

$$H = 0,5 \times (0,9 \times H_{\max} + H_{\min})$$

$H_{\max}$  = altezza massima del bacino imbrifero

$H_{\min}$  = altezza minima del bacino imbrifero

$$H = 0,5 \times (0,9 \times 3498,30 + 1183,50) = 2165,99 \text{ m s.l.m.}$$

$$H_1 = 2165,99 - 1183,50 = 982,49 \text{ m}$$

$$t_c(h) = (4 \cdot \sqrt{26,20} + 1,5 \cdot 5,70) / (0,8 \cdot \sqrt{982,49}) = 1,16 \text{ ore}$$

Il tempo di corrivazione  $t_c$  calcolato attraverso la formula di Giandotti è risultato pari a 1,16 ore.

L'altezza di precipitazione  $h$  corrispondente alla durata  $t_c$  è stata calcolata con la formula che esprime la curva di probabilità pluviometrica, precedentemente espressa, ovvero  $h = a \cdot t_c^n$  mm, dove

$a$  = parametro della curva per  $T_r = 200$  (ricavato dal PAI, di cui alla D.G.R. N. 456656)

$n$  = parametro della curva per  $T_r = 200$  (ricavato dal PAI, di cui alla D.G.R. N. 456656)



così che la determinazione dell'afflusso ( $h$ ) risulta:

$$h=43,14 \times 1,16^{0,582}$$

per cui la portata di piena  $Q_{max}$  corrispondente al suddetto tempo di corrivazione e alla relativa altezza critica di pioggia calcolata risulta essere:

$$Q_{max} = 0,70 \cdot \frac{0,047}{4176} \cdot 26200000 = 206,4 \text{ mc/s}$$

I risultati ottenuti possono così riassumersi:

TEMPO DI RITORNO (anni)	$h$ nel $t_c$ (mm)	$Q$ (m <sup>3</sup> /sec)
200	43,14	<b>206,4</b>

Non è stato considerato il trasporto solido, in quanto la presenza della diga funge da bacino di raccolta dell'eventuale materiale trasportato in alveo. Viene invece considerato cautelativamente il tratto compreso tra l'opera della diga e il ponte incrementando cautelativamente la portata liquida di un valore pari al 10% della portata massima calcolata sul Tr 200 anni.

TEMPO DI RITORNO (anni)	$h$ nel $t_c$ (mm)	$Q_{liquida}$ (m <sup>3</sup> /sec)	$Q_{solida}$ (m <sup>3</sup> /sec)	$Q_{co,pliviva}$ (m <sup>3</sup> /sec)
200	43,14	<b>206,4</b>	<b>10%<math>Q_{liquida}</math></b>	<b>227,04 <math>\approx</math> 230</b>

Il nuovo valore di portata complessiva cautelativamente risulta quindi essere  **$Q \approx 230 \text{ mc/s}$** .

### 3.3 VERIFICA DELLA SEZIONE DI DEFLUSSO

Per la verifica della sezione di deflusso lungo l'alveo in corrispondenza della nuova geometria del ponte, è stato utilizzato il programma di calcolo PIENA della ProgramGeo di Brescia.

La portata che defluisce per una determinata sezione d'alveo è fornita dalla relazione:

$$Q(\text{mc/sec}) = A \cdot v_m$$

dove:

- $A$  (mq) = area della sezione trasversale dell'alveo;
- $v_m$  (m/sec) = velocità media della corrente.

Assumendo il criterio del moto uniforme, cioè immaginando che la linea piezometrica abbia la stessa inclinazione dell'alveo nella direzione della corrente, la velocità media della corrente può essere espressa dalla relazione (secondo Gaickler-Strickler):

$$v_m = k_s \cdot R_h^{2/3} \cdot (i/100)^{1/2} \quad \text{dove:}$$

- $K_s$  (m<sup>1/3</sup>s<sup>-1</sup>) = coefficiente di resistenza di Strickler;

- $R_h$  (m) = raggio idraulico dato dal rapporto  $A/P$  con  $P$  perimetro bagnato;
- $i$  (%) = pendenza dell'alveo nel tratto considerato.

Valutata la velocità della corrente, noto il valore dell'area della sezione del corso d'acqua, si può calcolare la portata smaltibile.

I valori del coefficiente  $k_s$  si ricavano direttamente dalla consultazione di apposite tabelle dove a seconda della tipologia del fondo alveo (in pietrame, con sezioni regolari, ecc.) sono indicati i relativi indici.

La pendenza del torrente in esame è stata quantificata in uno 4,2%.

Per quanto concerne il coefficiente di Strickler si è assunto un  $k_s = 25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ , pur essendo a luce rettangolare con superfici in cls.

Le dimensioni della sezione del ponte sono luce 21,40 m e altezza 3,5 m.

La portata massima di piena con Tr 200 anni è pari a 230 mc/s.

Come risulta dai calcoli effettuati, confermati dall'esperienza diretta, la sezione di deflusso risulta verificata allo smaltimento delle portate ottenute per tempi di ritorno analizzati (200 anni).

TEMPO DI RITORNO (anni)	$V$ (m/s)	$h$ (m)
200	6,52	<b>-1,89</b>

Nella pagina seguente viene proposto schema con la sezione e l'altezza dell'acqua.

Come ultima verifica si è provveduto a verificare che il franco idraulico ottenuto rispettasse la seguente relazione, ossia:

$$f = 0,5 \cdot (v^2/2g)$$

in cui  $(v^2/2g)$  rappresenta il *carico cinetico* medio, dove:

- $v$  = velocità massima della sezione media espressa in m/sec;
- $g$  = accelerazione di gravità pari a 9,81 m/sec<sup>2</sup>.

$$f = 0,5 \cdot (6,52^2 / 2 \cdot 9,81) = \mathbf{1,08 \text{ m}}$$

Inserendo la velocità calcolata della corrente di deflusso pari a 6,52 m/sec, il *carico cinetico* medio è risultato pari a 2,16 m, mentre  $f$  è risultato uguale a **1,08 m**.

In considerazione del fatto che il franco minimo non deve essere inferiore a 0,5 volte il carico cinetico della corrente, ossia i 1,08 m ottenuti, se ne deduce che le condizioni sono rigorosamente rispettate.

Verifica di sezione d'alveo in condizione di moto uniforme

Verifica di sezione d'alveo in condizione di moto uniforme

Scheda 1 Scheda 2

Committente: Amm.ne Com.le Località: Fornarelli Sigla: Certificato n. Data:

Descrizione: rifacimento ponte esistente Note:

X (m)	Y (m)	Ks(m <sup>-1</sup> /s)
0	0	25
0	-3,55	25
21,4	-3,55	25
21,4	0	25

Inclinazione alveo (%):

Ks=coef. di Kutter,  Ks=coef. di Strickler,  Altezza imposta

Tempo = tempo di ritorno:

Tempo(anni)	Portata(m <sup>3</sup> /s)	Velocità(m/s)	Altezza(m)
200	230	6,52	-1,89

rifacimento ponte esistente

Grafico Portata - Altezza idrometrica

Disegna sez.
Calcola
Duplica scheda
Elimina scheda
Annulla dati

## 4 ANALISI SISMICA

È stata sviluppata l'analisi sismica dell'area d'intervento in prossimità del ponte da risistemare, così da identificare la categoria di sottosuolo specifica puntuale, così come definita al paragrafo 3.2.2. del Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 "Norme tecniche per le costruzioni".

Nel D.M. citato viene specificato che tale valutazione viene effettuata " ... *in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s,30}$  di propagazione delle onde di taglio (definita successivamente) entro i primi 30 m di profondità. Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali ...*", correlando la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ).

La definizione dei valori della  $V_{s30}$  viene effettuata utilizzando una serie di acquisizioni MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva) attraverso uno stendimento sismico di 12 geofoni. La classificazione dei terreni è stata quindi svolta sulla base del valore della  $V_{s30}$  (il valore medio ponderato della  $V_s$  nei primi 30 m di profondità).

L'indagine è stata svolta in area subpianeggiante non pavimentata ubicata in prossimità dell'area di intervento.

Si precisa infine che il comune di Macugnaga è individuato in Zona sismica 3 nell'elenco della zonizzazione sismica dei comuni italiani.

### 4.1 GENERALITÀ SULLE ONDE SISMICHE

La prospezione sismica consiste in una serie di misure, condotte in superficie, sulla variazione nello spazio della proprietà fisica dei terreni denominata "elasticità".

Tale metodo non sfrutta campi di forze naturali ma richiede l'immissione artificiale nel terreno di una certa quantità di energia, la cui intensità, così come la distanza fra sorgente di energia e apparecchi di misura, può essere regolata al fine di rispondere al meglio ai quesiti posti dall'indagine.

Tale energia genera nel terreno delle onde sismiche che si dividono in due grandi categorie:

- onde di corpo (o di volume): onde P (Primarie) e onde S (Secondarie)
- onde superficiali (onde di Rayleigh e onde di Love)

Tra le onde generate, per più di due terzi vengono trasmesse nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata *velocità di fase*) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga: questa proprietà si chiama *dispersione*.

#### 4.1.1 Onde di corpo

Le **Onde P** sono delle onde di corpo di compressione (o longitudinali) e corrispondono a compressioni e rarefazioni del mezzo in cui viaggiano: al loro passaggio le particelle di terreno infatti oscillano in avanti e indietro nella stessa direzione di propagazione dell'onda.

Sono le onde più veloci generate da un sisma, quindi sono le prime avvertite, da cui il nome di Onda P (Primaria).

La velocità dell'onda può essere ricavata dall'equazione:

$$V_P = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

con :

- $k$  che rappresenta il modulo di incompressibilità;
- $\mu$  è il modulo di rigidità;
- $\rho$  la densità del materiale attraversato dall'onda.

Le **Onde S** sono onde di corpo che oscillano perpendicolarmente rispetto alla direzione di propagazione. Possono essere immaginate come le onde che si propagano su una corda che viene fatta oscillare. Un'importante caratteristica di queste onde è che non possono propagarsi in mezzi fluidi:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

con:

- $\mu$  che rappresenta il modulo di taglio del materiale;
- $\rho$  la densità.

Dal confronto delle due relazioni sopra citate, è possibile osservare come la velocità delle onde S è necessariamente inferiore alla velocità delle onde P (in quanto manca il termine  $K$ ) e raggiungono una velocità che si aggira solitamente intorno al 60-70% della velocità delle onde P. Per questo motivo giungono sempre dopo le Onde P (da cui onde S come Secondarie).

#### 4.1.2 Onde superficiali

Le **onde superficiali** (o **onde di superficie**) vengono a crearsi a causa dell'intersezione delle onde di corpo con la superficie. Queste onde vengono trasmesse lungo la superficie e decadono esponenzialmente con la profondità (è questo il motivo per cui si dicono superficiali). Queste onde vengono generate facilmente nelle situazioni in cui la sorgente sismica è poco profonda. È da sottolineare che in caso di terremoto, dalla sorgente sismica vengono generate solo Onde P e Onde S, in quanto queste sono le *onde di corpo*, cioè le onde che si propagano all'interno della terra mentre non vengono generate direttamente le onde superficiali.

La velocità delle onde di superficie è inferiore alla velocità delle onde di corpo, per cui il loro arrivo è successivo all'arrivo delle Onde P e S, al contrario l'ampiezza di queste onde è notevolmente maggiore di quella delle onde di corpo.

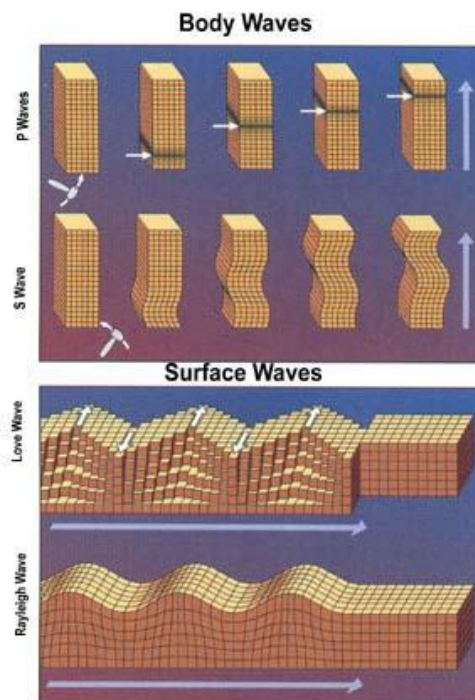
Le **Onde di Rayleigh** vengono generate quando un'onda S, che incide sulla superficie libera, viene in parte riflessa, determinando un'ulteriore onda che si propaga sulla superficie stessa.

Queste onde esistono sia in semispazi omogenei (in questo caso la sua velocità è circa 0,92 volte la velocità delle onde S) che disomogenei (in cui risulta essere un'onda dispersa, cioè la sua velocità dipende dalla frequenza). Per meglio visualizzarle possono essere immaginate come molto simili a quelle che si creano gettando un sasso nello stagno, provocando quindi uno scuotimento o un sussulto del terreno. Il loro moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda.

Le **Onde di Love** sono anch'esse generate dalla riflessione delle Onde S sulla superficie libera del terreno, ma vengono generate solo nei mezzi in cui la velocità delle Onde S aumenta con la profondità (quindi siamo in presenza di un mezzo disomogeneo) e quindi sono sempre *onde disperse*. Le Onde di Love fanno vibrare il terreno sul piano orizzontale lungo la direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

La velocità delle onde di Love è maggiore di quella delle onde S negli strati più superficiali della crosta, ma minore della stessa negli strati più bassi.

Nella figura sotto riportata, è illustrato il movimento dei diversi tipi di onde di corpo e di superficie.



#### 4.2 IL METODO MASW

Nonostante le onde superficiali siano considerate *rumore* per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), ottenuto dall'analisi delle onde di Rayleigh e di Love, è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive

delle onde superficiali.

L'intero processo comprende tre step successivi:

1. l'acquisizione delle onde superficiali (ground roll),
2. la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza)
3. l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs.

#### 4.2.1 Modalità di esecuzione, strumentazione e squadra

Per ottenere un profilo Vs è necessario produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore.

La base sismica è costituita da uno stendimento formato da un cavo multipolare al quale sono collegati 12 geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz), che vengono infissi nel terreno con un intervallo variabile tra 2 e 5 metri.

Attraverso tali geofoni (ricevitori) vengono rilevati gli impulsi sismici generati artificialmente da una sorgente di energia (mazza, fucile sismico, ecc.); gli impulsi sismici vengono poi trasformati in impulsi elettrici dal sismografo registratore che ha la possibilità di ampliarli e decodificarli.

Il punto di energizzazione "P" è ubicato all'estremità dello stendimento, ad una distanza (offset) variabile dall'ultimo geofono; il tempo "zero", corrispondente all'attimo dell'energizzazione, viene inviato al sismografo registratore da un geofono starter, collegato via cavo.

Per ogni punto di energizzazione è stata effettuata una registrazione dei tempi di arrivo ai geofoni degli impulsi generati per una finestra di ricezione di 2000 millisecondi (2,0 sec) sufficiente a captare tutti gli arrivi d'onda e le relative attenuazioni.

La strumentazione utilizzata è stata la seguente:

- sismografo PASI 16S24U 24 canali;
- notebook Enface per la registrazione dei dati;
- geofoni PASI ad asse orizzontale da 4,5 Hz;
- cavi sismici multipolari con 24 prese intervallate di 5 metri;
- massa battente
- geofono starter, munito di "switch" per l'invio via cavo del "time break" al sismografo;
- cavi di prolunga e collegamento.

La squadra geofisica è stata composta da:

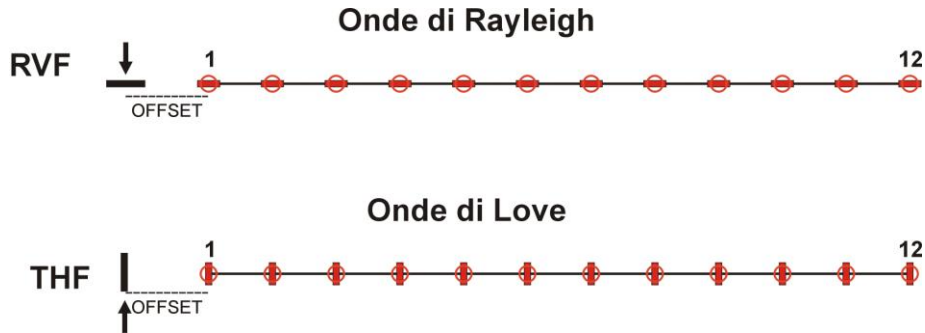
- geologo-geofisico responsabile dell'unità operativa;
- tecnico operatore.

Per una completezza di dati che consenta una migliore modellizzazione del sottosuolo, vengono effettuate molteplici acquisizioni per l'ottenimento sia delle onde di Rayleigh sia di quelle di Love.

Come illustrato negli schemi sottostanti, per la registrazione delle diverse tipologie di onde si ha una diversa direzione di energizzazione e un diverso posizionamento dei geofoni.

Onde di Rayleigh: l'energizzazione avviene perpendicolarmente alla superficie del terreno e l'asse dei geofoni viene disposto parallelamente all'asse dello stendimento.

Onde di Love: l'energizzazione avviene parallelamente alla superficie del terreno (colpendo la piastra ortogonalmente all'asse dello stendimento) e l'asse dei geofoni viene disposto perpendicolarmente all'asse dello stendimento.



Per ciascuna tipologia (RVF e THF) vengono fatte diverse energizzazioni con offset pari a 0,5-1-1,5 volte la distanza intergeofonica (ad es.: se la distanza intergeofonica è pari a 4 m, gli offset sono pari a 2-4-6 m).

#### 4.2.2 Elaborazione dei dati

Per ricavare la curva di dispersione, sono state utilizzate nel tempo una molteplicità di tecniche diverse, ciascuna delle quali con propri vantaggi e svantaggi.

Nello specifico per le analisi dei dati acquisiti viene utilizzato il software *winMASW 4.1.1 Pro*, prodotto dalla Società Eliosoft.

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente utilizzando la curva di dispersione misurata come riferimento.

Per ottenere il profilo verticale Vs dalla curva di dispersione è necessario conoscere i valori approssimati del rapporto di Poisson e della densità; tali valori vengono solitamente stimati avvalendosi delle misure prese in loco o valutando le tipologie dei materiali (stratigrafie di pozzi limitrofi).

Quando si generano onde piane della modalità fondamentale delle onde di Reyleigh, vengono anche generate una molteplicità di tipi diversi di onde: fra queste si annoverano le onde di corpo, le onde superficiali non piane e, infine, le onde riverberate (back scattered), generate dalle disomogeneità superficiali, dal rumore ambientale e da quello imputabile alle attività umane.

Le onde di corpo sono in vario modo riconoscibili in un sismogramma multicanale: le onde di corpo dirette viaggiano, come la definizione delle stesse, direttamente dalla sorgente ai ricevitori (geofoni), mentre quelle rifratte e riflesse sono il risultato dell'interazione fra le onde e l'impedenza acustica (il contrasto di velocità) fra le superfici di discontinuità.

Le onde che si propagano a breve distanza dalla sorgente sono sempre onde superficiali, che, in prossimità della sorgente, seguono un complesso comportamento non lineare e non possono essere trattate come onde piane.



Le onde superficiali riverberate (back scattered) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali, quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative a ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno.

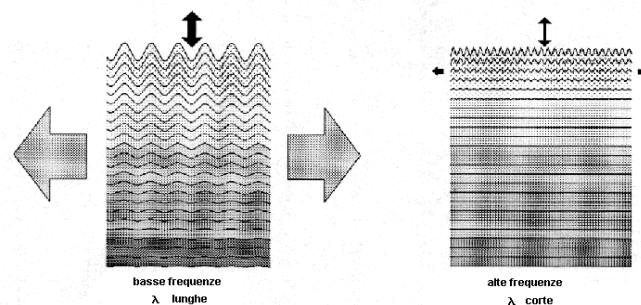
La scomposizione di un campo di onde registrate in un formato a frequenza variabile consente l'identificazione della maggior parte del rumore analizzando la fase e la frequenza dipendentemente dalla distanza dalla sorgente. La scomposizione può essere quindi utilizzata in associazione con la registrazione multicanale per minimizzare il rumore durante l'acquisizione.

La scelta dei parametri di elaborazione, così come del miglior intervallo di frequenza per il calcolo della velocità di fase, può essere fatto con maggior accuratezza utilizzando dei sismogrammi multicanale. Una volta scomposto il sismogramma, una opportuna misura di coerenza applicata nel tempo e nel dominio della frequenza può essere utilizzata per calcolare la velocità di fase rispetto alla frequenza.

La velocità di fase e la frequenza sono le due variabili (x, y) il cui legame costituisce la curva di dispersione. È anche possibile determinare l'accuratezza del calcolo della curva di dispersione analizzando la pendenza lineare di ciascuna componente di frequenza delle onde superficiali in un singolo sismogramma. In questo caso la metodologia MASW permette la miglior registrazione e separazione ad ampia banda ed elevati rapporti Segnale/Disturbo (S/N). Un buon rapporto S/N assicura accuratezza nel calcolo della curva di dispersione, mentre l'ampiezza di banda migliora la risoluzione e la possibile profondità di indagine del profilo Vs di inversione.

Le onde di superficie sono facilmente generate da una sorgente sismica quale, ad esempio, una massa battente. La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a riflessione (CMP). Questa similitudine permette di ottenere, con la procedura MASW, delle sezioni superficiali di velocità che possono essere utilizzate per accurate correzioni statiche dei profili a riflessione.

L'illustrazione proposta di seguito evidenzia le proprietà di dispersione delle onde di superficie.



Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori) sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda

corte) hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

#### 4.3 CARATTERISTICHE INDAGINE ESEGUITA E COMMENTO DEI RISULTATI

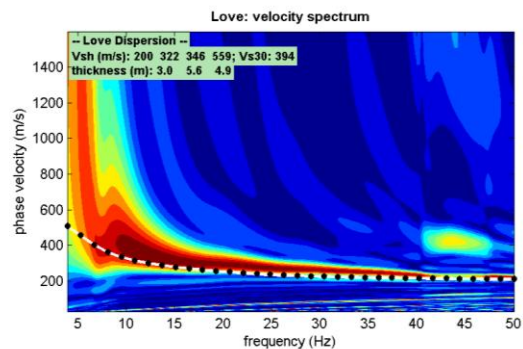
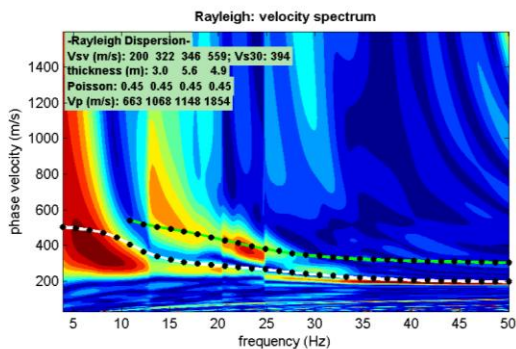
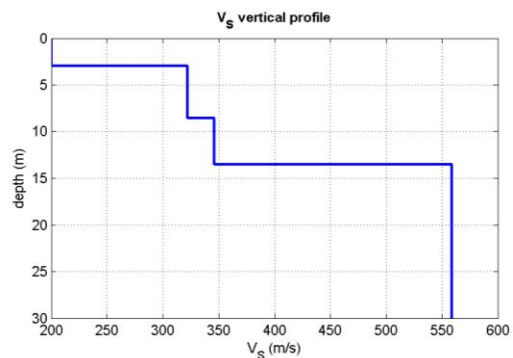
L'area in esame è costituita, com'è possibile osservare dalla stratigrafia allegata, da una successione di depositi incoerenti a granulometria medio grossolana (sabbie, ghiaie e ciottoli) in facies fluvioglaciale.

L'indagine è stata realizzata mediante uno stendimento di 12 geofoni, con distanza intergeofonica pari a 4 m, per una lunghezza complessiva di 44 m. Le acquisizioni, sia di tipo RVF che di tipo ZHF, sono state effettuate con offset 2-4-6 m ed energizzazione mediante l'utilizzo di una massa battente di peso pari a 8 kg.

Per l'elaborazione dei dati si è innanzitutto proceduto all'analisi congiunta delle onde di Love e di Rayleigh.

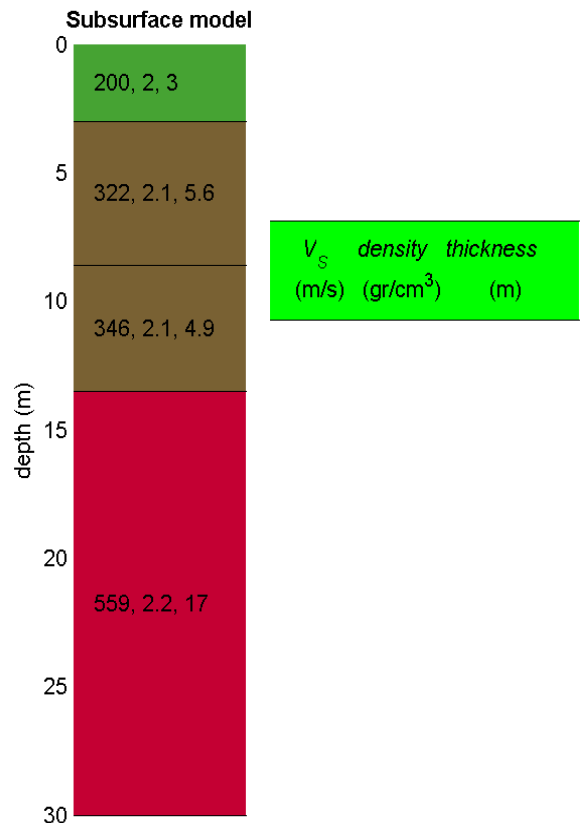
Nella figura seguente vengono riportate sia le curve di dispersione *piccate* relative alle onde di Love e a quelle di Rayleigh sia il grafico con l'andamento delle velocità.

Di ogni frequenza presente nell'onda viene valutata la velocità e quindi viene ricavata la curva di dispersione (velocità-frequenza). Una procedura iterativa, per mezzo del software WinMasw, consente di ricavare il modello di velocità delle onde S del terreno.



Nella sottostante tabella, vengono riassunti i valori della velocità e del modulo di taglio per ciascuno strato, come schematizzato nella figura a lato.

Spessore (m)	VS (m/s)	Modulo di taglio (MPa)
3	200	78
5,6	322	215
4,9	346	250
<i>semi-spazio</i>	559	689



La  $V_{s30}$  viene definita dalla formula:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove:

$h_i$  = spessore dello strato individuato con specifica velocità  $V_s$

$V_i$  = velocità  $V_s$  dello strato  $h_i$

Per il caso in esame è stato determinato un valore di  $V_{s30}$  pari a **394 m/sec**.

#### 4.4 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

Il Decreto Ministeriale 14.01.2008 definisce cinque categorie di sottosuolo in funzione del valore di  $V_{s30}$ .

Di seguito viene proposta la tabella di riferimento della categoria dei terreni con indicati litologia e caratteristiche di  $V_{s30}$ ,  $N_{spt}$  e  $C_u$  per i differenti raggruppamenti.

CAT.	DESCRIZIONE	$V_{s30}$ (m/s)	$N_{spt}$	$C_u$ (kPa)
<b>A</b>	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore max pari a 3m	>800		
<b>B</b>	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	360÷800	>50	>250
<b>C</b>	Depositi di sabbie o ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri	180-360	15-50	70-250
<b>D</b>	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti	<180	<15	<70
<b>E</b>	Profili di terreni costituiti da strati superficiali alluvionali, con spessore compreso tra 5 e 20m, giacenti su un substrato di materiale più rigido avente $V_{s30}>800$ m/s	<360	<50	<250

A seguito dell'indagine eseguita è stato ottenuto un valore complessivo medio di  $V_{s30}$  pari a **394 m/s** : è così possibile attribuire questi terreni alla categoria dei suoli di fondazione di tipo "B" (*Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità*).

## 5 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Nell'indagine effettuata in prossimità dell'area d'intervento è stata eseguita un'indagine sismica con il metodo MASW da cui sono scaturiti i seguenti dati:

- velocità  $V_s$  media nei primi 30m di profondità ( $V_{s30}$ ) è pari a 394 m/s;
- categoria di suolo di fondazione di tipo “B”, ovvero “Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità” caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 360m/s e 800m/s.

Si è proceduto con l'individuazione della posizione dell'area al fine della definizione degli spettri di risposta rappresentativi delle componenti orizzontali e verticali delle azioni sismiche di progetto per il sito specifico.

La definizione di questi spettri, relativi ad uno specifico Stato Limite, è articolata in tre fasi:

- Fase 1 – individuazione della pericolosità del sito, sulla base dei risultati del progetto S1-INGV
- Fase 2 – scelta della strategia di progettazione
- Fase 3 – determinazione dell'azione di progetto

### FASI 1 E 2

Si è innanzitutto proceduto all'individuazione geografica del sito: le variabili che devono essere introdotte sono la classe d'uso dell'opera e la vita nominale dello stesso.

Nel caso in esame, la struttura è stata ascritta alla classe II, ovvero “*costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. ... Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in classe d'uso III o IV, ...*” (cfr. punto 2.4.2. del D.M. 14 gennaio 2008 “*Norme tecniche per le costruzioni*”) ed è stata considerata cautelativamente una vita nominale pari a 100 anni. Per Vita Nominale di un'opera strutturale si intende il “*numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo alla quale è destinata*” (cfr. punto 2.4.1 del D.M. 14 gennaio 2008) e a questo valore si deve fare riferimento in sede progettuale nel dimensionare le strutture e i particolari costruttivi, nella scelta dei materiali delle varie applicazioni e delle misure protettive per garantire il mantenimento della resistenza e della funzionalità.

Le azioni sismiche vengono valutate in relazione a un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava moltiplicando la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ . Tale parametro riveste notevole importanza in quanto è utilizzato per valutare, fissata la probabilità di superamento  $P_{VR}$  corrispondente allo stato limite considerato, il tempo di ritorno ( $T_R$ ) dell'azione sismica cui fare riferimento per la verifica.

Il valore del coefficiente d'uso  $C_U$  è definito, al variare della classe d'uso, secondo quanto riportato nella sottostante tabella.

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C <sub>U</sub>	0,7	1,0	1,5	2,0

Nel caso in esame si ottiene:

$$V_R = 100 \cdot 1 = 100 \text{ anni}$$

In ogni caso se  $V_R \leq 35$  anni si pone  $V_R = 35$  anni.

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione, che costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastica in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ .

Ai fini della normativa vigente, le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido 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.

Gli “stati limite” sono definiti di seguito:

- Stato limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni e interruzioni d’uso significativi.

- Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell’interruzione d’uso di parte delle apparecchiature.

- Stato Limite di Salvaguardia (SLV): a seguito del terremoto, la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali e impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali. La costruzione conserva invece una parte della sua 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 danni rotture e crolli dei componenti non strutturali e impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali

e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Si ricorda che SLO e SLD appartengono agli “stati limite di esercizio”, mentre SLV e SLC fanno parte degli “stati limite ultimi”.

Nella tabella seguente si riportano, per ogni stato limite, i dati ottenuti dai calcoli effettuati:

STATO LIMITE	Prob	Tr	A <sub>g</sub>	F <sub>o</sub>	T <sub>c</sub> *
	[%]	[anni]	[g]	-	[s]
Operatività (SLO)	81	60	0,037	2,488	0,218
Danno (SLD)	63	101	0,046	2,475	0,244
Salvaguardia vita (SLV)	10	949	0,100	2,599	0,308
Prevenzione collasso (SLC)	5	1950	0,123	2,651	0,322
Periodo di riferimento per l' azione sismica	100				

### FASE 3

Come condizione di riferimento è stato scelto lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV). In funzione delle condizioni al contorno sopra descritte, sono stati ottenuti i seguenti parametri caratteristici:

PARAMETRI	VALORI
a <sub>g</sub> (g)	0,123
F <sub>o</sub> (-)	2,651
T <sub>c</sub> * (s)	0,322

Per quanto concerne la categoria di sottosuolo, in base ai dati a disposizione si ritiene che lo stesso sia ascrivibile alla Categoria B (cfr. punto 3.2.2. del D.M. 14.01.2008 “*Norme tecniche per le costruzioni*”).

Per quanto riguarda la categoria topografica viene fatto invece riferimento alla tabella proposta di seguito:

CATEGORIA	CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i=15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i>15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ < i < 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

In base a quanto osservato, l'area è ascrivibile alla categoria *T1*.

I parametri correttivi determinati sono quindi i seguenti:

<b>PARAMETRI</b>	<b>VALORI</b>
Amplificazione stratigrafica (Ss)	1,20
Coeff. funzione della categoria suolo (Cc)	1,38
Amplificazione topografica (St)	1,00

Infine, dalle elaborazioni effettuate sono stati ottenuti, per condizioni di SLC, i seguenti valori di coefficiente sismico:

**COEFFICIENTE SISMICO ORIZZONTALE  $k_h = 0,035$**

**COEFFICIENTE SISMICO VERTICALE  $k_v = 0,018$**



## 6 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Per quanto concerne la parametrizzazione geotecnica dei materiali coinvolti è possibile fare riferimento ai dati in possesso dallo scirvente.

Nella carta litotecnica allegata i terreni oggetto dell'intervento venivano descritti come *Depositi fluvioglaciali e alluvionali* di fondo alveo: “sono sedimenti costituiti da ghiaie e sabbie con ciottoli, blocchi e trovanti, con matrice sabbiosa variabile, relativi alle zone di fondovalle terrazzate e ai maggiori conoidi di deiezione. A questi depositi può essere attribuita la seguente parametrizzazione geotecnica: angolo di attrito di picco pari a circa  $34^{\circ} \div 49^{\circ}$ , angolo di attrito interno a volume costante compreso tra  $32^{\circ}$  e  $36^{\circ}$ , coesione nulla e peso di volume di  $1,9 \text{ t/m}^3$ .

Per le categorie di suolo di fondazione, in relazione all'azione sismica di progetto da adottare, i suddetti sedimenti ricadono nella classe C “depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate con spessore di diverse decine di metri” con valori di  $180 < V_{s30} < 360 \text{ m/s}$  e di  $15 < N_{SPT} < 50$ .”

Le indagini sismiche svolte hanno tuttavia indicato un valore di  $V_{s30}$  di **394 m/s** che consente di attribuire il terreno alla classe “B”.

Il terreno in base ad osservazioni in sito e analisi nei medesimi depositi può essere descritto come ghiaia ciottoli e blocchi e trovanti in matrice prevalentemente sabbiosa; i parametri geotecnici di picco possono essere così indicati:

MATERIALE	$\Phi_{cv}$	c	$\gamma_n$
Ghiaia ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa	$35^{\circ}/40^{\circ}$	0 t/mq	1,9 t/mc

## 7 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In base dell'indagine svolta è possibile indicare lo stato attuale dell'area d'intervento:

- il progetto in esame costituisce un miglioramento dello stato attuale dei luoghi e così da mettere in sicurezza il transito veicolare, andando a sostituire il ponte esistente ormai ammalorato e vetusto;
- l'area d'intervento è impostata sui depositi fluvioglaciali e alluvionali ghiaioso-sabbiosi e ciottolosi con trovanti e blocchi con copertura pedogenetica poco evoluta;
- in corrispondenza del ponte e in un suo intorno significativo non sono state riscontrate evidenze di dissesto tali da costituire grossi ostacoli alla realizzazione dell'intero impianto;
- è stato approfondito l'aspetto idrogeologico, che ha permesso di indicare valori di portata liquida e solida, così da effettuare una verifica idraulica con la nuova opera: i risultati mostrano come la nuova struttura sia in grado di smaltire le portate di piena anche con Tr 200 anni, rispettando ampiamente il franco minimo richiesto dalla normativa vigente;
- è stata effettuata un'indagine sismica per la definizione dei valori della Vs30 effettuata utilizzando una serie di acquisizioni MASW: è stato ottenuto un valore di Vs30 di 940 m/s che indica un suolo di tipo B;
- l'analisi sismica permette di indicare un COEFFICIENTE SISMICO ORIZZONTALE **kh=0,035** e un COEFFICIENTE SISMICO VERTICALE **kv=0,018**;
- le caratteristiche geotecniche dei depositi superficiali interessati possono essere così indicate:

MATERIALE	$\Phi_{cv}$	c	$\gamma_n$
Ghiaia ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa	35°/40°	0 t/mq	1,9 t/mc

I valori indicati in tabella validi per depositi fluvioglaciali-alluvionali garantiscono buone capacità portanti.

Alla luce di queste osservazioni è possibile affermare che l'intervento risulta compatibile con lo status geologico, geomorfologico e idrogeologico dei luoghi senza alterarne l'equilibrio naturale.