

Commissario:



Contraente:



Progettista:



Project & Construction Management & Quality Assurance: Rina Consulting SpA



### VIADOTTO POLCEVERA

**EMISSIONE PER ENTI**

### PROGETTO ESECUTIVO di 1° LIVELLO

### RELAZIONE DI VALIDAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE, A CURA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA, DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

Contraente	Project & Construction Management & Quality Assurance	Direttore Lavori
Data: _____	Data: _____	Data: _____

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA/DISCIPLINA	PROGR	REV
N G 1 2	0 0	E	6 9	R H	G E 0 0 0 1	C 0 2	A

PROGETTAZIONE								IL PROGETTISTA
Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	
A	Emissione Esecutiva di 1° Livello	S. Castellaro <i>S. Castellaro</i>	25/02/2019	E. Poggi <i>E. Poggi</i>	25/02/2019	A. Perego <i>A. Perego</i>	25/02/2019	F. Marchese ITALFERR S.p.A. - SEZIONE TERRE E BONIFICHE Dat. Geologo Francesco Marchese UD GEODISA - GESTIONE TERRE E BONIFICHE Ordine Geologi n. 179 ES <i>F. Marchese</i> Data 25/02/2019
B								
C								



## Contratto di Consulenza Commissionata

tra

### **Alma Mater Studiorum Università di Bologna**

sede legale: Via Zamboni 33- 40126 Bologna  
C.F. 80007010376, P.I. 01131710376

attraverso il

**Dipartimento di Fisica e Astronomia**  
sede in Viale Berti Pichat 6/2, 40127 Bologna  
rappresentato dal Direttore del Dipartimento  
Prof. Nicola Semprini Cesari.

### **ENSER srl**

sede legale: Viale Baccharini 29, Faenza (RA)  
C.F. 02058800398, P.I. 02058800398  
REA n. RA-167939

attraverso il

suo legale rappresentante *pro-tempore* Ing.  
Giancarlo Guadagnini, giusta provvedimento di  
nomina del 25/05/2018

## SUPERVISIONE SCIENTIFICA DELLE INDAGINI GEOFISICHE EFFETTUATE PER IL NUOVO VIADOTTO SUL FIUME POLCEVERA A GENOVA

### RELAZIONE CONCLUSIVA

A cura di:  
Responsabile Scientifico della Consulenza  
Prof.ssa Geol. Silvia Castellaro  
[silvia.castellaro@unibo.it](mailto:silvia.castellaro@unibo.it)

Bologna, 25 febbraio 2019



## Sommario

Premessa.....	3
Acquisizione dati geofisici.....	5
Interpretazione dati geofisici.....	6
Modello geologico-geofisico di riferimento.....	10
Conclusioni .....	11



## Premessa

La società ENSER srl, con sede legale in Viale Baccarini 29, Faenza (RA), committente della presente relazione, opera nel campo della geologia e dell'ingegneria civile. ENSER srl, su incarico di ITALFERR spa, svolge attività di supporto di geologia e geotecnica nell'ambito della progettazione del nuovo Viadotto sul fiume Polcevera a Genova.

ENSER srl ha affidato all'Alma Mater Studiorum Università di Bologna (la quale opera *ratione materiae* ai fini dell'esecuzione dell'attività in oggetto attraverso il Dipartimento di Fisica e Astronomia) l'attività di consulenza che consiste nel controllo dei risultati emergenti dalle indagini geofisiche (downhole, sismica a rifrazione, HVSr, MASW, Re.Mi.™, geoelettrica) previste da ITALFERR spa per la realizzazione del nuovo Viadotto sul fiume Polcevera a Genova. Il D.P.R. n. 382 del 11.07.1980, art. 66, come modificato dalla L. n. 370 del 19.10.1999, art.4, co. 5, nonché il R.D. n. 1592 del 31.08.1933, art. 49, consente alle Università, compatibilmente con la loro funzione scientifica e didattica, l'esecuzione di attività di ricerca e consulenza, di analisi, controlli, tarature, prove ed esperienze stabilite mediante contratti o convenzioni di diritto privato.

L'attività entro la convenzione in oggetto si è svolta dapprima in corso d'opera, esaminando i risultati preliminari delle indagini geofisiche ottenuti da ENSER srl stessa e dalla società GEOINVEST srl, con sede legale in via della Conciliazione 45 (PC), portando alla richiesta di alcune integrazioni di indagini.

L'attività è poi consistita nella discussione dei risultati preliminari con tutte le parti interessate, al fine di elaborare un modello unico del sottosuolo.

L'attività si conclude nella presente relazione di validazione della qualità dei dati acquisiti, delle relative interpretazioni e del modello geologico-geofisico di riferimento per le successive fasi di progettazione dell'opera e delle sue fondazioni.

In Tabella 1 sono elencati gli elaborati consultati ai fini della redazione della presente relazione.



Codifica elaborato	Descrizione elaborato	Scala
NG12 00 E 69 F7 GE 0001 C01 A	Profilo geologico Tav.1	1:1000/200
NG12 00 E 69 F7 GE 0001 C02 A	Profilo geologico Tav.2	1:1000/200
NG12 00 E 69 F7 GE 0002 C01 A	Profilo idrogeologico Tav.1	1:1000/200
NG12 00 E 69 F7 GE 0002 C02 A	Profilo idrogeologico tav. Tav.2	1:1000/200
NG12 00 E 69 G7 GE 0001 C01 A	Carta geologica/geomorfologica Tav.1	1:1000
NG12 00 E 69 G7 GE 0001 C02 A	Carta geologica/geomorfologica tav. Tav.2	1:1000
NG12 00 E 69 G7 GE 0002 C01 A	Carta idrogeologica e dei punti d'acqua Tav.1	1:1000
NG12 00 E 69 G7 GE 0002 C02 A	Carta idrogeologica e dei punti d'acqua Tav.2	1:1000
NG12 00 E 69 P7 GE 0001 C01 A	Carta con ubicazione delle indagini Tav.1	1:1000
NG12 00 E 69 P7 GE 0001 C02 A	Carta con ubicazione delle indagini Tav.2	1:1000
NG12 00 E 69 P7 GE 0001 C03 A	Carta ubicazione indagini geofisiche	1:1000
NG12 00 E 69 P7 GE 0001 C04 A	Indagini geofisiche – Tomografia geoelettrica – Sezioni L1, L2 e L5	1:1000
NG12 00 E 69 P7 GE 0001 C05 A	Indagini geofisiche – Tomografia geoelettrica – Sezioni L3 e L4	1:1000
NG12 00 E 69 P8 GE 0001 C01 A	Indagini geofisiche – Sismica a rifrazione con elaborazione tomografica – P1, P2, P3, P4, P5	1:500
NG12 00 E 69 RG GE 0001 C01 A	Relazione geologica	-
NG12 00 E 69 RH GE 0001 C01 A	Modellazione 3D del tetto del substrato roccioso	-
NG12 00 E 69 SG GE 0000 C01 A	Report indagini geognostiche e prove in sito 1/2	-
NG12 00 E 69 SG GE 0000 C02 A	Report indagini geognostiche e prove in sito 2/2	-
NG12 00 E 69 SH GE 0001 C01 A	Relazione indagini geofisiche	-
NG12 00 E 69 WZ GE 0001 C01 A	Sezioni geologiche trasversali di dettaglio	1:1000/200
NG12 00 E 69 WZ GE 0002 C01 A	Sezioni idrogeologiche trasversali di dettaglio	1:1000/200

Tabella 1. Elenco degli elaborati consultati ai fini della presente relazione.



## Acquisizione dati geofisici

Tra il 28 dicembre 2018 ed il 21 gennaio 2019, nell'area interessata dalla costruzione del nuovo viadotto sul fiume Polcevera presso Genova, sono state effettuate le seguenti prove geofisiche:

- a) condotte da ENSER srl
  - 41 prove sismiche passive a stazione singola (H/V), di cui due effettuate sulle fondazioni delle pile del viadotto esistente e le restanti, rispettivamente 16 a nord e 23 a sud dell'opera, per la mappatura del bedrock sismico,
- b) condotte da GEOINVEST srl
  - 20 prove sismiche passive a stazione singola (H/V) lungo l'asse del previsto viadotto ed, in particolare, una per ciascuna pila prevista,
  - 17 prove sismiche attive (MASW) e passive (Re.Mi.™) a onde di superficie, in asse all'opera in progetto,
  - 5 stendimenti sismici a rifrazione in onde P ed S, in corrispondenza della spalla del viadotto autostradale in prossimità della costruenda pila 18,
  - 7 prove sismiche down-hole in onde P ed S,
  - 5 stendimenti tomografici elettrici in configurazione Schlumberger, di cui due longitudinali e tre trasversali alla valle del Polcevera.

Durante la fase di acquisizione, i dati via via raccolti sono stati elaborati anche dalla scrivente in modo speditivo ed analizzati allo scopo di valutarne la qualità e di suggerire rifacimenti o infittimenti delle indagini.

Le prove H/V hanno mostrato chiari picchi di origine stratigrafica, immediatamente riconducibili al bedrock sismico ed a frequenze variabili, in linea con quanto atteso dalla geologia nota per il sito e dalle evidenze che via via emergevano dai sondaggi. In particolare, le prove hanno mostrato picchi a frequenze sempre minori mano a mano che il bedrock sismico si approfondiva lungo i transetti indagati. In prossimità delle pile 8-12 (numerazione secondo il nuovo viadotto), alcune prove H/V mostravano un picco di origine artefattuale attorno ad 1.7 Hz. Tale occorrenza ha richiesto una analisi più attenta e si è potuto osservare che l'artefatto si presentava non solo lungo l'asse del viadotto ma anche nelle misure a nord e sud di esso. Al fine di escludere che si trattasse del risentimento sul terreno di uno modo di vibrare del viadotto Morandi relitto, sono state effettuate due misure anche sulle fondazioni dello stesso, nei punti più prossimi al disturbo osservato, trovando così che i modi di vibrare del viadotto relitto sono diversi (seppure sempre nella banda 1-2 Hz) dagli artefatti identificati in alcune prove H/V.



Le frequenze proprie del viadotto Morandi relitto sono individuabili facilmente per le loro caratteristiche spettrali diagnostiche<sup>1</sup> e si è riconosciuto che i disturbi riscontrati in alcune misure H/V sono artefatti di altra origine (macchine di cantiere presenti nel sito, fabbriche in prossimità o simili). Questo ha permesso di distinguere le due nature dei picchi e di interpretare separatamente quelli di chiara origine stratigrafica.

È da notare come i professionisti incaricati di GEOINVEST srl abbiano rilevato le stesse difficoltà (legate a disturbi antropici) anche nelle prove MASW effettuate nella stessa zona.

A questo stadio, in corso d'opera, è stato richiesto il rifacimento solo di una misura H/V, risultata particolarmente rumorosa.

Alla scrivente sono stati forniti tutti i dati originali delle acquisizioni definitive in formato digitale. È stata così possibile la rianalisi in modo indipendente dei dati e della loro qualità, che è risultata in tutti i casi accettabile.

### Interpretazione dati geofisici

L'interpretazione dei dati geofisici è stata discussa nell'occasione di due riunioni tenutesi a Bologna, presso le sedi dell'Università (rispettivamente del dipartimento di Fisica e di Biologia, Geologia ed Ambiente), in data 16 gennaio e 25 gennaio 2019, e di una terza riunione tenutasi a Bologna, presso gli uffici di ENSER srl, in data 13 febbraio 2019.

La prima riunione è avvenuta con soli rappresentanti di ENSER srl. La seconda riunione è avvenuta con esponenti di ENSER srl, GEOINVEST srl e ITALFERR spa. La terza riunione è avvenuta in presenza di esponenti di ENSER srl e ITALFERR spa.

In queste occasioni sono stati analizzati e discussi tutti i risultati preliminari. In particolare:

- a) GEOINVEST srl ha illustrato:
  - a. le **prove sismiche down-hole**, spinte fino a 50-60 m di profondità, a seconda dei siti, mostrando in particolare il picking dei primi arrivi effettuato, i modelli di velocità delle onde sismiche P ed S ottenuti ed le loro relazioni sotto forma di moduli di Poisson.

---

<sup>1</sup> Si veda ad esempio, per le caratteristiche diagnostiche delle risonanze delle strutture: Castellaro S. e Mulargia F. (2010), How far from a building starts the tremor free-field? The case of three most famous Italian towers and of a modern building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2080-2094 e per le caratteristiche diagnostiche delle risonanze dei terreni: Castellaro S. (2016), The complementarity of H/V and dispersion curves, *Geophysics*, 81, T323-T338.



Si è osservato che i primi arrivi delle onde P ed S nelle prove down-hole sono praticamente sempre nitidi nelle prove effettuate. Questo comporta delle buone stime dei tempi di propagazione delle onde sismiche nei mezzi attraversati e quindi dei profili di velocità delle onde sismiche affetti da bassa incertezza. I risultati ottenuti dalle prove down-hole sono da considerarsi di qualità molto buona.

L'esecutore delle prove (GEOINVEST srl) ritiene che tale qualità sia imputabile anche al metodo accurato di lavoro della ditta che ha eseguito i fori e che li ha allestiti, con incamiciatura e iniezione di miscele cementanti, secondo gli standard esecutivi per l'esecuzione delle prove sismiche in foro.

- b. le **linee elettriche tomografiche**, eseguite in configurazione Schlumberger. Nelle sezioni L5 e L1, condotte parallelamente all'asse del viadotto, con distanza interelettroda di 10 e 5 m rispettivamente, si osserva nel primo tratto (in prossimità dei sondaggi IFPM3, IFPM 4, IFPM 5) un'estesa area a bassa resistività imputabile alla presenza di un canale interrato.

In tutte le linee si osserva inoltre, sostanzialmente, un primo strato di diversi metri di spessore a resistività maggiore, seguito da un brusco passaggio ad un livello a resistività molto bassa. Più sotto, a diverse decine di metri di profondità, appare un terzo livello a resistività crescente. La geometria di queste discontinuità è molto varia sotto i tratti indagati ma non è quasi mai immediatamente riconducibile alla geometria del bedrock ricostruita sulla base dei sondaggi diretti e delle prove sismiche dirette ed indirette, né nell'ipotesi di considerare il bedrock ad alta resistività, né nell'ipotesi di considerarlo a bassa resistività.

Le difficoltà materiali lamentate dagli operatori professionisti stessi nel dispiegamento degli stendimenti, lunghi oltre 1 km per le linee L3, L4, L5, e le interferenze di cantiere sono state tali per cui l'interpretazione dei risultati può essere falsata. Durante l'acquisizione delle misure, infatti, lungo lo stendimento operavano diversi altri soggetti (demolitori, periti, forze dell'ordine) le cui attività possono a vario modo aver interferito con la qualità dei dati acquisiti. È stato inoltre assodato che sotto i tratti indagati passano innumerevoli condutture, anche di ampio diametro, di vario tipo.

Pertanto, stanti le difficoltà interpretative delle linee geoelettriche, si suggerisce di non fare riferimento ad esse nella ricostruzione del modello geologico-geofisico del sottosuolo.





c. le **prove sismiche a onde di superficie**. Per ciascuna delle 18 pile previste per il nuovo viadotto è stato fornito un profilo della velocità delle onde sismiche di taglio basato sull'interpretazione congiunta delle prove a stazione singola (H/V) e delle prove multicanale attive e passive (MASW e Re.Mi.<sup>TM</sup>). Tra queste, le prove MASW permettono di ottenere un modello di velocità delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) a bassa profondità (tipicamente poche decine di metri) mentre l'uso combinato di Re.Mi.<sup>TM</sup> ed H/V è utile per raggiungere maggiori profondità di indagine. Nei siti in esame, essendo la velocità dei terreni superficiali medio-alta, le prove MASW forniscono informazioni fino a qualche decina di metri di profondità.

Poiché le prove passive Re.Mi.<sup>TM</sup> non sono sempre prive di ambiguità interpretative, la loro interpretazione è stata vincolata sfruttando anche le prove dirette (sondaggi) e le prove down-hole.

Per ciascun sito di misura sono state analizzate diverse curve di dispersione ottenute dal metodo attivo, energizzando sia in testa che in coda agli stendimenti, più volte. Sono state poi analizzate diverse curve di dispersione, ottenute da diverse finestre temporali delle prove passive. La curva di dispersione finale, sulla quale si è basata l'inversione ed il modello di velocità dei terreni, è ottenuta dall'interpretazione congiunta di tutti i risultati appena descritti.

Il modello di velocità delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) risultante dagli algoritmi di inversione automatici presentava un numero di strati eccessivo rispetto alla sensibilità reale del metodo. La sensibilità del metodo è legata alle lunghezze d'onda 'esploranti' e risulta in una incertezza dell'ordine di qualche metro, già alla profondità di poche decine di metri. Questo è un limite connaturato a questo tipo di prove geofisiche, non è un difetto di esecuzione o interpretazione delle prove. Si è pertanto raccomandato che l'interpretazione di sintesi finale fosse effettuata accorpendo le piccole fluttuazione di  $V_s$  tra strati successivi in soli 2 o 3 macrostrati, per ogni verticale investigata, in modo da fornire ai progettisti un dato compatibile con la sensibilità fisica del metodo.

d. le **prove sismiche a onde di volume P ed S**. In prossimità ed a monte della pila 18 si è deciso di effettuare 5 tomografie sismiche a rifrazione in onde P ed S, stante l'impossibilità di realizzare un sondaggio in questa sede. Tali tomografie non hanno presentato particolari problemi esecutivi né interpretativi. Nelle sezioni denominate P3 e P4 si osserva un aumento degli spessori della coltre verso monte, imputabile ad una



possibile area di ritombamento risalente all'epoca di costruzione del viadotto precedente.

b) ENSER srl ha presentato:

- a. Il **modello 3D** illustrante la profondità del bedrock sismico nell'area in esame. Tale modello è stato ottenuto integrando i risultati delle prove geofisiche di buona qualità e dei dati di sondaggio.

In particolare, nella prima fase la profondità del bedrock è stata ricostruita a partire dalle frequenze di risonanza, dopo aver ottenuto una stima dei valori medi di  $V_s$  delle coperture. Tale stima è stata ottenuta associando le profondità del bedrock  $h$ , nei punti in cui erano note dai sondaggi, alle frequenze di risonanza  $f$  delle coperture indicate dalle prove H/V negli stessi punti, secondo la nota espressione semplificata  $V_s = 4fh$ . I valori medi di  $V_s$  delle coperture così ottenuti sono stati applicati anche alle zone in cui non erano presenti i sondaggi ma solo le curve H/V, ottenendo così una stima della profondità del bedrock anche in questi siti. Il confronto con i dati diretti provenienti dai sondaggi eseguiti successivamente ha confermato le stime di profondità effettuate con pochissimi metri di scarto. Il valore medio di  $V_s$  nelle coperture può ritenersi quindi una stima adeguata per tutta l'area in esame.

In un secondo momento, una volta che si sono resi disponibili i risultati delle prove geofisiche condotte da GEOINVEST srl, il modello della profondità del bedrock è stato completato e raffinato, i vincoli forniti da tutti i sondaggi di nuova esecuzione e dalle successive prove geofisiche.

In estrema sintesi, tutti i dati concorrono a mostrare che dalla pila 2 alla pila 16 del costruendo viadotto, si trova un potente materasso alluvionale, con spessori mediamente compresi tra i 28 e 44 m.



### Modello geologico-geofisico di riferimento

Tutti i dati raccolti, sia di natura geotecnica/geomeccanica che geofisica, ad eccezione delle linee di tomografia elettrica (che sono state ritenute non sufficientemente affidabili per via delle difficoltà esecutive e delle interferenze di cantiere) sono stati impiegati da parte di ENSER srl per creare un modello geologico-geofisico del terreno 3D, con particolare interesse, nel caso dei dati geofisici, alla determinazione della profondità del bedrock sismico.

A livello di interpolazione spaziale dei dati, per produrre il modello 3D in forma numerica è stato raccomandato di usare le funzioni di contourizzazione matematicamente più semplici al fine di evitare il più possibile artefatti legati al 'rendering grafico'.

È stato infine raccomandato di fornire, per il successivo studio di risposta sismica locale, un modello semplificato del sottosuolo, che raggruppasse le piccole fluttuazioni di velocità dei sismostrati in un unico strato o due sopra il bedrock.



## Conclusioni

Tra il 28 dicembre 2018 e il 21 gennaio 2019 sono state effettuate le indagini geofisiche descritte nelle pagine precedenti, aventi per obiettivo la mappatura del bedrock e la caratterizzazione dinamica delle coperture nella valle del fiume Polcevera, in asse al previsto nuovo viadotto autostradale della città di Genova.

Per quanto riguarda la prospezione sismica, diretta ed indiretta, al netto delle limitazioni fisiche caratteristiche delle tecniche di prospezione sismica e di alcune locali difficoltà legate ad artefatti da sorgenti esterne, i dati ottenuti in campagna sono stati di qualità buona o molto buona.

Per quanto riguarda la prospezione elettrica, le immagini tomografiche ottenute non sono apparse del tutto coerenti con le evidenze da sondaggio e da prove sismiche, in merito alla profondità attesa per il bedrock. In superficie, esse suggeriscono andamenti complessi, probabilmente figli di varie interferenze locali. Si è suggerito pertanto di non tenere conto delle tomografie elettriche in fase di elaborazione del modello geologico-geofisico del sottosuolo.

Il bedrock appare invece ben riconoscibile in tutte le prove sismiche, e particolarmente nelle prove H/V. La ricostruzione della sua profondità nel volume presentato negli elaborati finali di ENSER srl è da ritenersi credibile, entro le incertezze proprie dei metodi geofisici. La sua mappatura è resa ancor più convincente dall'uso integrato di tutte le informazioni a disposizione, sia relative a sondaggi pregressi che di nuova esecuzione, nonché all'interpretazione congiunta di tutti i dati provenienti dalle prove geofisiche di tipo sismico di nuova esecuzione.

Bologna, 25 febbraio 2019

Il responsabile scientifico,  
prof.ssa geol. Silvia Castellaro