

PROVINCIA DI MANTOVA COMUNE DI SUZZARA

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO DI RESTAURO, RIFUNZIONALIZZAZIONE E MIGLIORAMENTO SISMICO DEL TEATRO GUIDO UBICATO IN VIALE ZONTA

COMMITTENZA:



COMUNE DI SUZZARA

Piazza Castello, 1 – 46029 (MN)

RELAZIONE
SULLA MODELLAZIONE SISMICA E SULLA
CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA AI FINI SISMICI
ai sensi D.M. 17 Gennaio 2018 – Circolare 21 Gennaio 2019, n.° 7 C.S.LL.PP
- D.P.R. 5 Giugno 2001, n. 328

IL GEOLOGO

DANIELE DE TOGNI



IL GEOLOGO

FRANCESCO GABRIELLI



Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

INDICE

1	PREMESSA.....	2
2	RIFERIMENTI NORMATIVI	3
3	STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA UTILIZZATA	4
3.1	Premessa	4
3.2	Misura a stazione singola del microtremore sismico	5
3.3	Indagine geofisica MASW	8
3.4	Indagine sismica RE.MI.....	10
4	INTERPRETAZIONE DELLE MISURE ESEGUITE.....	11
4.1	Interpretazione indagine HVSr al suolo.....	11
4.2	Interpretazione prove MASW	13
4.3	Interpretazione combinata delle misure sismiche HVSr, MASW e REMI.....	14
5	RISPOSTA SISMICA LOCALE E STABILITA' DEL SITO	18
5.1.	Definizione delle V_{S30} e della "categoria di sottosuolo"	18
5.2.	Amplificazione topografica.....	18
5.3.	Microzonazione sismica.....	19
5.4.	Analisi di secondo livello ai sensi della D.G.R. n. IX/2016 del 30.11.2011	20
5.5.	Verifica monodimensionale dell'amplificazione locale (Analisi di III° livello).....	23
5.5.1	Premessa.....	23
5.5.2	Elaborazione del modello sismico.....	24
5.5.3	Definizione dell'azione sismica al bedrock.....	26
5.5.4	Elaborazione degli effetti di amplificazione.....	32
5.6.	Amplificazione stratigrafica allo SLV e allo SLD	44
6	VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	44
7	CEDIMENTI POST SISMICI	49
8	CONCLUSIONI	54

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 1
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

1 PREMESSA

La presente relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base del sito, viene redatta a supporto del progetto dei lavori di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN).

Il Teatro Guido è ubicato nel centro capoluogo lungo Viale Zonta ed è attualmente inagibile.

Lo studio è stato condotto nel rispetto delle normative vigenti in materia, D.M. 17.01.2018, e relativa Circolare applicativa del 21 Gennaio 2019 n.° 7 del C.S.LL.PP.

Per l'analisi degli effetti sismici, comprensivi della valutazione dell'amplificazione locale mediante la definizione del fattore di amplificazione F.A., si è fatto riferimento ai criteri decritti nell'Allegato 5 alla D.G.R. n. IX/2616 del 30/11/2011, *"Aggiornamento dei criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione all'art. 57, comma 1, della L.R. 11 marzo 2005, n. 12 approvati con D.G.R. 22/12/2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con D.G.R. 28 maggio 2008 n. 8/7374"*.

Per le procedure di riferimento finalizzate alla valutazione della possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione si è fatto riferimento agli indirizzi regionali per la microzonazione sismica di cui alla Deliberazione di Assemblea Legislativa n. 630/2019 (ad integrazione ed aggiornamento del D.A.L. 112/2007, <http://ambiente.regione.emiliaromagna.it/geologia/temi/sismica>), derivate dalla pubblicazione a cura dell'Associazione Geotecnica Italiana "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee Guida" (AGI 2005, <http://www.associazionegeotecnica.it/pubblicazioni/aspetti-geotecnici-della-progettazione-zona-sismica>).

La relazione si articola nel seguente modo:

- descrizione del programma delle indagini e delle prove geofisiche eseguite;
- definizione della categoria sismica del sottosuolo mediante la definizione delle V_{Seq} ;
- caratterizzazione della pericolosità sismica di base del sito oggetto dell'intervento mediante un'analisi di III° livello per la definizione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica;
- stabilità nei confronti della liquefazione;
- stima dell'entità dei cedimenti post-sismici.

La relazione va in completamento a quella specialistica relativa alla modellazione geologica e alla modellazione geotecnica a cui si rimanda per ogni approfondimento.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 2
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

La realizzazione del presente studio è stata eseguita in ottemperanza alle indicazioni fornite dalla normativa vigente con particolare riferimento alle seguenti norme:

DECRETO MINISTERIALE 18 GENNAIO 2018

Aggiornamento delle “*Norme Tecniche per le Costruzioni*”.

CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI

“*Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale*”.

DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE 30 NOVEMBRE 2011 – N. IX/2616 (Regione Lombardia)

Aggiornamento dei “Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio, in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12”, approvati con d.g.r. 22 dicembre 2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con d.g.r. 28 maggio 2008, n. 8/737

DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE DEL 30 MARZO 2016 N. 5001 (Regione Lombardia)

“Approvazione delle linee di indirizzo e coordinamento per l’esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica”

DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE DEL 11 LUGLIO 2014 N. X/2129 (Regione Lombardia)

“Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia (l.r. 1/2000, art. 3, c. 108, lett. d)”

ASSEMBLEA LEGISLATIVA DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA D.A.L. N. 112/2007

Approvazione dell’atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell’**art. 16 comma 1 della LR 20/2000** “disciplina generale sulla tutela ed uso del territorio”, in merito a “indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica”

D.G.R. EMILIA ROMAGNA N°. 2193 DEL 12/2015

art. 16 della l.r. n.20 del 24/3/2000. approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla deliberazione dell'assemblea legislativa 2 maggio 2007, n. 112.

D.A.L. EMILIA ROMAGNA N°. 630 DEL 29/04/2019

Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, l.r. n. 24/2017).

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 3
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

D.P.R. 5 GIUGNO 2001, N. 328

Articolo 41 – Attività professionali

“punto c) le indagini geognostiche e l'esplorazione del sottosuolo anche con metodi geofisici; le indagini e consulenze geologiche ai fini della relazione geologica per le opere di ingegneria civile mediante la costruzione del modello geologico-tecnico; la programmazione e progettazione degli interventi geologici e la direzione dei lavori relativi, finalizzati alla redazione della relazione geologica...;”.

3 STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA UTILIZZATA

3.1 Premessa

Ai fini del presente studio sono state eseguite le seguenti indagini geofisiche;

- per la definizione della pericolosità sismica di base del sito, ai sensi del § 3.2 N.T.C. e § C3.2 della Circolare, sono state eseguite due indagini geofisiche basate sulla misura del rumore sismico (microtremore) del sottosuolo (**HSVR1 e HSVR2**), mediante l'utilizzo di strumentazione tromografica portatile, finalizzata alla stima delle frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo e dell'amplificazione sismica del sito mediante il rapporto HVSr;
- per la definizione della V_{S30} o V_{seq} è stata eseguita **un'indagine geofisica MASW**, basata sull'analisi della propagazione delle onde superficiali, ed in particolare delle onde di Rayleigh
- Un ulteriore indagine di **sismica passiva** con registrazione dei microterremori, con metodologia **REMI** sempre finalizzata alla definizione della V_{S30} o V_{seq} ; nell'indagine vengono misurati rumori ambientali dovuti a sorgenti naturali e/o artificiali; l'acquisizione prevede disposizioni multi-geofoniche come per il metodo MASW e l'utilizzo di un sismografo multicanale

L'associazione di un'indagine MASW con un'indagine RE.MI. è ottimale per la valutazione delle V_{S30} o V_{seq} rispetto all'esecuzione della sola indagine Masw; a parità di stendimento, infatti, l'indagine RE.MI. riesce a definire con maggiore precisione le velocità Vs ad una profondità maggiore (con frequenze più basse), in particolare tra i 15/20m ed i 35/40m, profondità alla quale le Indagini MASW sono meno precise.

Al fine di definire lo schema litostratigrafico del primo sottosuolo ed eseguire le valutazioni sul rischio potenziale di liquefazione è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche articolata in n° 02 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU1 e CPTU2); le prove sono state estese sino ai 20,0m da p.c.; si ritiene che per i tipi di terreno indagati e per il tipo di intervento in progetto il numero di prove e la profondità siano sufficienti ai fini del concetto di “volume significativo”;

I relativi dettagli delle prove geofisiche sono riportati in allegato, in cui è anche riportata la planimetria con l'ubicazione dei punti di indagine. Di seguito viene descritta la metodologia impiegata per la realizzazione

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 4
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

delle prove geofisiche; per ciò che riguarda le prove penetrometriche si rimanda alla relativa relazione geologica.

3.2 Misura a stazione singola del microtremore sismico

La metodologia di misura e confronto H/V concretizzata per la prima volta da Nakamura Y. (1989): *A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface. QR of RTRI, Vol. 30, pp. 25-33*, si basa sulla acquisizione dei microtremori ambientali, ovvero movimenti micrometrici della crosta terrestre a livello locale, entro frequenze dell'ordine di 0,1 – 1 Hz; 1 - 20 Hz, eccitate in maniera diffusa dall'attività antropica o ambientale locale nella gamma di frequenze tra 1 e 20 Hz. Queste vibrazioni indotte, costituiscono un rumore diffuso che permette di focalizzare con precisione superfici che determinano contrasti di impedenza sismica con notevole precisione, tali contrasti modificano anche le velocità delle onde sismiche di taglio (V_s) e inducono il terreno soprastante alla risonanza con la frequenza di oscillazione evidenziata dalla indagine.

Il rumore sismico diffuso, non puntuale e sufficientemente lontano, agisce come sorgente di eccitazione, più o meno come la luce bianca diffusa dalla nebbia illumina gli oggetti più vicini all'osservatore, eccitando le lunghezze d'onda tipiche di ciascun oggetto e permettendo un' percezione chiara degli oggetti vicini anche nella nebbia stessa che di per se nasconde tutto ovvero mascherando (tagliando) le informazioni lontane.

Come si misura il microtremore ambientale

L'apparecchio mediante 3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione, uno diretto NS, uno diretto E-W ed uno diretto allo zenith, acquisisce 3 modi di vibrazione diversi che possono venire poi confrontati e ricostruiti in una curva che esprime la differenza dei movimenti orizzontali rispetto ai movimenti verticali espressa come amplificazione.

Le misure acquisite sono poi campionate in una finestra temporale (time window), meglio specificata in seguito nei tabulati di output del programma Grilla; su queste finestre viene effettuata una trasformazione di Fourier (FFT) in modo da ottenere una rappresentazione grafica con asse x in Hertz (Hz) ed in asse y in una fattore di amplificazione delle misure orizzontali rispetto a quelle verticali.

Utilizzo dei dati ottenuti con la tecnica dei microtremori

Dalla precedente operazione, si ottiene, se presente, la frequenza fondamentale del sito, corrispondente al massimo picco osservabile. Più il picco è alto (“ampio” nel linguaggio sismologico) maggiore sarà l'amplificazione di quella frequenza e di quelle immediatamente superiori.

Nel caso si intenda valutare frequenze al di sotto di 1Hz (che sono comunque generalmente estranee al normale utilizzo di ingegneria sismica) è bene ricordare che normalmente si debbono eseguire registrazioni con tempi intorno ai 30' (Sesame, 2004) e con vaste perturbazioni meteo regionali in atto (*Castellaro com*

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 5
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

pers); tuttavia, molte volte, le evidenze di tali frequenze possono comparire ugualmente, anche in occasione di campagne con tempi di acquisizione anche più ridotti.

Utilizzazione dei picchi ai fini della verifica di manufatti.

Ogni picco osservato nel grafico corrisponde ad una frequenza fondamentale del sito, generalmente ne è presente uno solo, ma più contrasti di impedenza a profondità sensibilmente diverse ne generano altrettanti.

Il Progettista Strutturale deve controllare che la risonanza detta altrimenti modo di vibrare fondamentale, dell'edificio sia a frequenza distinta da quella del sito e, comunque, lontana dal picco, in quanto possono generarsi fenomeni di doppia risonanza sottosuolo-struttura.

Descrizione del passaggio dalla curva H/V alla stima delle Vs

Mediante la sovrapposizione di una curva teorica alla curva acquisita dallo strumento, Castellaro e Mulargia (2009) hanno dimostrato che si può determinare con una precisione confrontabile con quella di altri metodi, la velocità media (armonica) delle onde sismiche fino ad almeno 30-50m.

La sovrapposizione, secondo Castellaro, **è possibile ed univoca solo se la curva è agganciata ad una discontinuità sismica la cui profondità è nota con altri metodi** (indagine sismiche o geologico geotecniche quali indagini in sito DPSH o CPT o pozzetti esplorativi attestanti su geo materiali compatti). Ovvero gli spettri H/V in presenza di un picco di risonanza ben individuato e nota la profondità del riflettore che dà la risonanza, è inoltre possibile ottenere una stima di massima della velocità media delle onde di taglio delle coperture. Infine possono costituire un valido ausilio nell'interpretazione e validazione dei risultati ottenuti con altre prove.

La curva viene modellata tramite le equazioni del **modello 1-D di sottosuolo** nella formulazione Thomson-Haskell-Dunkin (trattato in Ben-Menahem & Singh, 1981, Seismic waves and sources) con un codice di calcolo proprietario "Grilla" Micromed.

Il processo del software è iterativo ed attraverso piccole modifiche di profondità e velocità si riesce a "fittare" ovvero modellare la curva teorica in modo da seguire la curva acquisita in campagna ottenendo le velocità e gli spessori degli strati successivi.

Per poter svolgere questa operazione, l'operatore deve attribuire ad ogni strato un peso di volume, ed un modulo di Poisson (entrambi questi valori possono essere assunti di ragionevole massima, la valutazione della Vs30 che ne deriva è robusta e poco sensibile ad eventuali errori locali. Tali Vs non possono essere comunque usate per scopi diversi dall'ottenere Vseq, in quanto approssimate.

Le onde sismiche valutate dallo strumento sono le onde sismiche superficiali⁸, prodotte dall'interferenza costruttiva di onde P ed S che si propagano negli strati superficiali.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 6
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

L'acquisizione dei dati in campagna è durata circa 20 minuti. Il tipo di stratigrafia che le tecniche di sismica passiva possono restituire si basa sul concetto di contrasto di impedenza, qualora esista. Il contrasto di impedenza permette di individuare uno strato (sismostrato).

La **frequenza fondamentale di risonanza (fr)** è legata allo spessore e alla velocità delle onde di taglio Vs del primo strato dalla seguente relazione:

$$fr = V_{s1} / 4 h_1$$

V_{s1} = velocità delle onde S del primo strato;

h_1 = spessore primo strato.

Nakamura (1989) ha inoltre dimostrato che i massimi dei rapporti spettrali H/V consentono di individuare correttamente la frequenza e quindi il periodo fondamentale di risonanza per le onde S.

Negli ultimi anni un progetto europeo denominato SESAME (Site Effects Assessment using Ambient Excitations) si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola e array.

Esso ha anche fornito dei criteri per valutare la bontà delle curve HVSR e la significatività dei picchi H/V eventualmente trovati. La registrazione è avvenuta impostando i seguenti parametri strumentali:

- Frequenza di campionamento 128 Hz;
- Durata 30 minuti;
- Orientamento strumento nord-sud.

Le misure reali su modelli 1D locali composti da alternanze di diverse litologie producono curve H/V con relativi picchi e valli. Assumendo un appropriato modello per il campo delle onde e del mezzo, il metodo utilizzato (tramite il software Grilla®) propone una curva teorica H/V (in colore blu) che può essere adattata a quella sperimentalmente raccolta (incolore rosso) per derivarne un modello di sottosuolo in termini di velocità delle onde di superficie (a loro volta usate come stimatori della velocità delle onde di taglio).

Poiché una stessa curva H/V può essere riprodotta ugualmente bene da un numero infinito di modelli di sottosuolo, è indispensabile che il *fit* (tramite modellazione) tra curva sperimentale e curva teorica sia ottenuto a partire da un vincolo stratigrafico noto a priori.

Tipicamente questo consiste nella spessore dello strato più superficiale, noto dalle indagini dirette svolte (pozzetto espl. o prova in sito), cui si associa una caratteristica della curva H/V acquisita, generalmente un picco.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 7
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Il fit delle misure di tremore a fini stratigrafici, quando realizzabile, sfrutta la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli 'sintetici', cioè con quelli calcolati relativamente al campo d'onde completo di un modello 3D.

L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini (per le basi teoriche si veda ad es. Aki, 1964; Ben-Menahem e Singh, 1981; Arai e Tokimatsu, 2004, Castellaro e Mulargia, 2009).

Operativamente ad ogni picco presente sul grafico corrisponde un letto di uno strato.

Nella stratigrafia di un sito eventualmente si deve aggiungere uno strato che sarà più lento solo nel caso particolare che il valore H/V scenda sotto 1 per lunghi tratti di grafico (Castellaro e Mulargia, 2008).

3.3 Indagine geofisica MASW

Il metodo geofisico utilizzato in questa sede per la caratterizzazione della categoria di sottosuolo in base al valore delle Vs è la sismica a rifrazione attiva elaborata mediante metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves): essa permette di modellizzare il sottosuolo mediante l'analisi delle onde di Rayleigh (Park et alii, 1999).

Il metodo consente di stimare la velocità delle onde di taglio (Vs) dei terreni a partire dalla velocità delle onde di superficie (Rayleigh nel caso del presente studio).

La velocità delle onde di taglio è legata al modulo di rigidezza a taglio del mezzo (terreno) mediante la relazione:

$$V_s = (G/\rho)^{1/2}$$

dove:

- ρ = densità del mezzo;
- G = modulo di rigidezza a taglio del mezzo.

Poiché la densità dei suoli varia relativamente poco con la profondità (almeno nelle prime decine di metri), dalla formula si evince che i valori di Vs sono i primi indicatori della rigidità di un terreno.

Le onde Rayleigh sono onde di superficie e sono generate dall'interazione tra onde di pressione (P) e le onde di taglio verticali (Sv) ogni qualvolta esiste una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo.

In presenza di un semispazio omogeneo la loro velocità non presenta dipendenza dalla frequenza (no dispersione). Alla superficie libera hanno moto ellittico retrogrado che si inverte ad una profondità di $\lambda/2\pi$. L'ampiezza dello spostamento decresce con legge esponenziale; per questo diviene rapidamente trascurabile con la profondità.

La propagazione di queste onde non è influenzata dalle caratteristiche del mezzo al di sotto di una profondità pari a λ . Esse possono essere viste come la sovrapposizione di due componenti separate: una longitudinale e

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 8
--	--	--------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

l'altra trasversale, che si propagano lungo la superficie con la stessa velocità ma con differente attenuazione con la profondità.

Il vantaggio di utilizzare il metodo MASW sta nel fatto che non è limitato dalla presenza di inversioni di velocità in profondità; ha una buona risoluzione e poi perché la propagazione delle onde Rayleigh è funzione soprattutto delle Vs (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito). Esso è particolarmente indicato per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

La dispersione è la deformazione di un treno d'onda dovuta ad una variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza.

Per la onde Rayleigh questa deformazione non si manifesta all'interno di un semispazio omogeneo ed isotropo ma solo quando questi presenta una stratificazione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda λ (quindi frequenza) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di circa $\lambda/2$. Tale velocità delle onde di Rayleigh (V_r) è pari a circa il 90% delle onde di taglio Vs.

Per le indagini è stato utilizzato un tromografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., nella versione Engineering, combinato con un trigger wireless equipaggiato di puntale, con frequenza propria di 4,5 Hz. Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, EW e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione delle vibrazioni del terreno (ampiezze d'onda inferiori a 10 μ m), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz.

In seguito ad una registrazione di un determinato tempo t, tale segnale digitalizzato viene elaborato tramite un software dedicato, Grilla, il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i grafici relativi.

L'abbinamento tra Tromino Engy e il trigger wireless consente di effettuare stendimenti sismici senza limitazioni di estensione.

La presenza di un unico geofono, detto starter in quanto registra i primi arrivi delle onde sismiche, impone il suo spostamento continuo secondo le posizioni dello schema prestabilito.

Lo stendimento ha avuto una lunghezza di 60m con il primo geofono a distanza di 2,0 m dal Tromino mentre l'interdistanza tra le altre posizioni del geofono era di 4,0 metri; l'energizzazione, ottenuta tramite un salto effettuato dall'operatore, è avvenuta a 1,0 m di distanza dallo starter lungo l'asse geofono-Tromino.

Da tale stendimento viene elaborato un sismogramma definito "virtuale" in quanto non deriva dalla registrazione simultanea di più geofoni, ma i segnali di ogni energizzazione vengono composti in un unico sismogramma tramite software dedicati.

L'elaborazione del segnale registrato si compone dei seguenti passaggi:

1. picking dei primi arrivi sulla traccia di registrazione del geofono;
2. ricostruzione del sismogramma delle tracce registrate dal sismografo (Tromino) tramite software Grilla;

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 9
--	--	--------

<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

3. selezione per ogni traccia delle finestre temporali contenenti onde superficiali di Rayleigh;
4. calcolo della curva di dispersione sperimentale tramite software dedicato.

La curva di dispersione fornisce con una scala cromatica l'intensità della risonanza delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate).

3.4 Indagine sismica RE.MI.

La tecnica di analisi del sottosuolo mediante l'uso di microtremori (Refraction Microtremor) prende origine dagli studi e dalle sperimentazioni condotte da J. Louie presso la Nevada University e fornisce una caratterizzazione semplificata di volumi relativamente ampi del sottosuolo in profili verticali 1D sino alla profondità di 100 metri.

ReMi può caratterizzare un orizzonte meno veloce che è sottostante ad uno più veloce (velocity reversal) che rappresenta una condizione non distinguibile con il metodo tradizionale della sismica a rifrazione.

In situazioni dove un terreno più "competente" è sovrapposto a una zona più debole legata a subsidenza o al collasso di materiali più deboli sottostanti o a spazi vuoti, ReMi ha la capacità di individuare la velocità delle onde S dell'orizzonte debole sottostante.

La fonte di energia delle onde di superficie per il ReMi può essere il rumore ambientale o i semplici passi per stendimenti che indagano profondità limitate o rumore di veicoli per lunghezze maggiori. I profili ReMi si eseguono con successo in aree urbane con attività considerevole, usando il rumore ambientale come fonte di energia. Per indagini presso autostrade, il passaggio dei veicoli può servire da sorgente di energia.

Le velocità delle onde S (onde di taglio), il tipico parametro misurato dei materiali geologici, sono una funzione dei moduli dei vari materiali nel profilo del sottosuolo.

Le basi della teoria sono le stesse dell'analisi spettrale delle onde di superficie (SASW) e della multi analisi delle onde di superficie (MASW).

I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh da quelli superiori e dall'aliasing spaziale. C'è in questo caso la necessità di soddisfare la condizione di "omnidirezionalità" delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni; le scelte dei parametri di acquisizione influenzano molto il risultato finale.

Infatti, normalmente si accetta l'approssimazione secondo cui la massima profondità di indagine MASW per la quale calcolare il valore VS, può essere paragonato alla metà della lunghezza d'onda λ_{max} misurata dai ricevitori (Park et al., 1999), quest'ultima in generale è considerata circa pari alla lunghezza L dello stendimento.

Nel caso REMI è necessario rilevare un numero di microtremori elevato, ciò sarà ottenibile semplicemente allungando i tempi di registrazione del segnale rispetto ai metodi attivi.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 10
--	--	---------

<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

Strumentazione adottata

L'analisi delle onde superficiali è stata effettuata utilizzando un sistema sismico digitale multicanale (SoilSpy Rosina) di concezione totalmente nuova progettato e realizzato appositamente per eseguire indagini di prospezione sismica convenzionali (rifrazione, riflessione) e non convenzionali (Re.Mi. - M.A.S.W. - S.A.S.W. – SPAC - ESAC).

Il SoilSpy Rosina (fig. 1) è composto da un cavo di trasmissione digitale dati lungo il quale sono disposti i moduli di amplificazione/digitalizzazione collegati ai sensori (comunemente geofoni).

Il sistema si connette ad un PC portatile per l'impostazione dei parametri di acquisizione, per il salvataggio dei dati e la loro pre-analisi.

La prospezione ReMi è stata eseguita con uno stendimento geofonico di 60 m, disposto sul terreno secondo un array lineare da 16 geofoni con interasse pari a 4m. La differenza di quota tra il geofono trigger (T1) ed il geofono 15 è pari a 0 m.

La lunghezza e geometria dello stendimento sono state condizionate da questioni logistiche. Per ottenere una buona risoluzione in termini di frequenza sono stati utilizzati geofoni da 4.5 Hz (tipo Geospace). Nell'esecuzione della prova MASW attiva è stato utilizzato come sistema di energizzazione una mazza di 8 Kg battente su piattello metallico; quando la battuta sulla superficie della piastra non risultava netta o veniva colpita due volte erroneamente, la prova veniva ripetuta.

Per aumentare il rapporto segnale/rumore si è proceduto alla somma di più energizzazioni (processo di stacking).

La sorgente è stata posta ad una distanza di 1 m dal primo geofono utilizzato come Trigger.

Nell'esecuzione della prova ReMi si è proceduto ad una registrazione in continuo (in modalità passiva ovviamente) di durata 5 minuti, poichè il SoilSpy Rosina non pone nessun limite di durata della registrazione, ossia non bisogna scendere a compromessi tra frequenza di campionamento, numero di canali e durata della registrazione.

4 INTERPRETAZIONE DELLE MISURE ESEGUITE

4.1 Interpretazione indagine HVSR al suolo

L'interpretazione dei dati ottenuti dal rilievo del rumore sismico consente sia di correlare il valore di picco dello spettro di risposta HVSR con la profondità del substrato litoide inteso come bedrock sismico sia di individuare una corrispondenza tra i valori di frequenza relativi alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 11
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del moto fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si può ricavare il valore della frequenza caratteristica del sito.

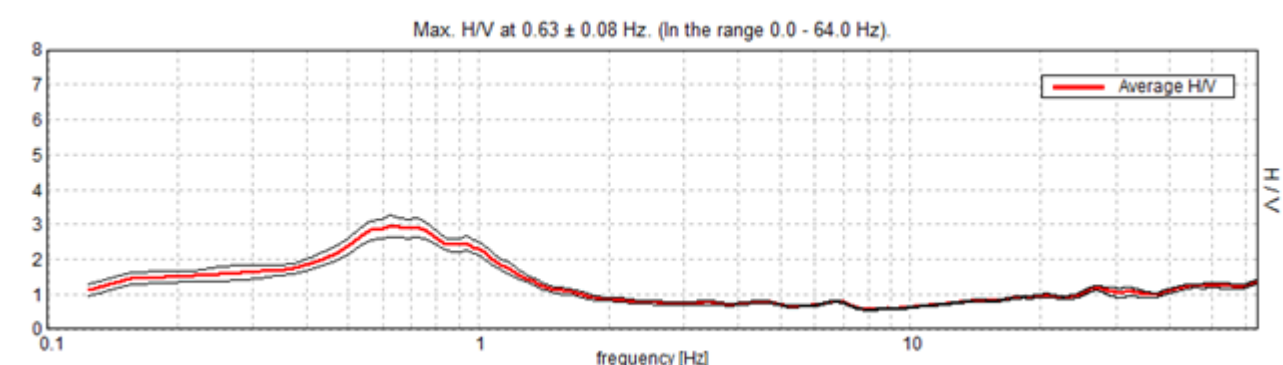
Sapendo che ad ogni picco di frequenza corrisponde una profondità (metri) dell'orizzonte che genera il contrasto di impedenza si è potuto estrapolare una stratigrafia geofisica del sottosuolo.

L'ampio range di frequenze acquisite dallo strumento utilizzato (0.1 ÷ 128 Hz) non ha evidenziato contrasti di impedenza attribuibili alla presenza di rifrattori sismici.

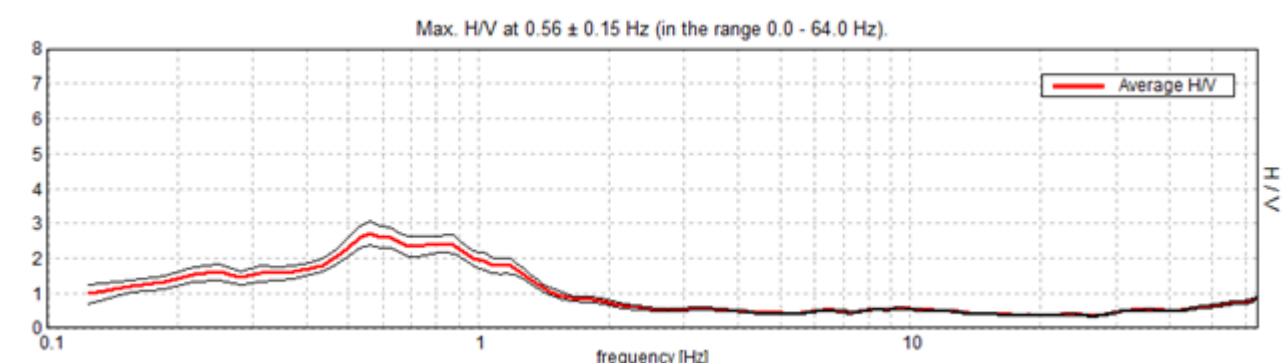
Il fit della curva H/V ha permesso di ricostruire in modo approssimato il profilo di Vs fino alla profondità di circa 140 metri (HSVR1), corrispondente all'ultimo riflettore individuato dal picco a 0,80 Hz (HSVR1) che rappresenta la frequenza fondamentale del terreno.

La frequenza caratteristica di risonanza di sito è compresa tra **0,60 e 0,80 Hz** (Periodo 1,25 e 1,66 sec) nella prova HSVR 1 e compresa tra **0,70 e 0,90 Hz** (Periodo 1,42 e 1,11 sec) nella prova HSVR 2, con valori del rapporto H/V pari a circa 3.0 (impedenza medio-bassa); tali valori sono quelli di interesse ingegneristico – strutturale come range di possibili valori di vibrazione del terreno in caso di evento sismico di magnitudo rilevante.

HSVR 1



HSVR 2



Risultati delle analisi di rumore sismico relative a una corretta misura H/V. In alto sono riportati i valori del rapporto spettrale H/V in funzione della frequenza con il relativo intervallo di confidenza al 95%. Sono anche indicati i valori delle frequenze corrispondenti ai

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 12
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

massimi della funzione H/V. La curva sperimentale di colore rosso rappresenta l'andamento sismico registrato in campagna, l'area in verde l'individuazione della frequenza di sito

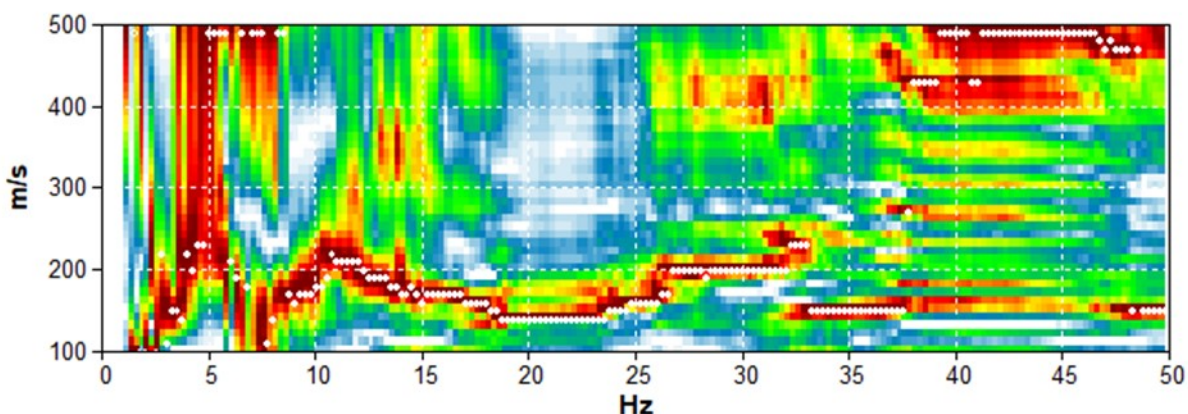
E' oramai consolidata, l'ipotesi che le costruzioni subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale dei terreni investiti da un'onda sismica e quella naturale della struttura.

Il bedrock sismico non è stato individuato fino alla massima profondità investigata. La qualità del segnale acquisito in base al progetto SESAME (Linee Guida 2005) è stato giudicato affidabile in quanto per l'affidabilità della curva HVSR i primi tre parametri sono positivi mentre per avere un chiaro e pulito segnale del picco massimo devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi.

4.2 Interpretazione prove MASW

Al fine di determinare il profilo verticale delle onde di taglio e definire la categoria sismica del sottosuolo sulla base del valore VS_{30} , è stata eseguita una indagine geofisica mediante il metodo MASW attivo, consiste nello stendimento sismico. Sullo spettro di velocità viene eseguito un "picking" della curva di dispersione (soprassegno con pallini bianchi) individuando un insieme di punti che appartengono ad un certo modo (in questo caso al modo fondamentale) di propagazione dell'onda superficiale di Rayleigh e di Love.

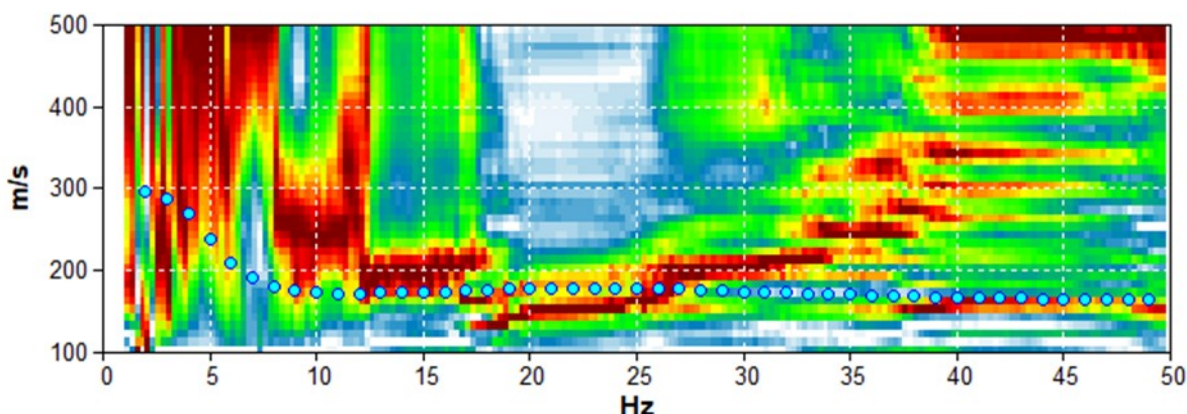
La curva di dispersione ottenuta fornisce con una scala cromatica l'intensità della risonanza delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate). A questo punto è possibile procedere con l'interpretazione della misura.



Spettro di velocità di fase tratto dalla prova MASW e relativo picking

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 13
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



Curva di dispersione del sito e fit per la costruzione del modello sintetico

Il grafico risultante dalla misura consente lo studio e l'elaborazione dei dati relativi al primo modo di vibrare del terreno, individuato come la curva definita dai colori caldi con velocità e frequenza minore.

Nei grafici è possibile riconoscere gran parte della curva di dispersione fondamentale, con tratti ben visibili compresi tra 1 e 50 Hz, frequenza alla quale la curva tende a Vs infinite, indicando il limite strumentale della misura.

Dai grafici è possibile ricostruire la successione sismo-stratigrafica, individuando i cambi di pendenza della curva di dispersione del modo fondamentale, tra cui quello principale è posizionato intorno ai 5 Hz e, pertanto, entro i 15 metri di profondità.

4.3 Interpretazione combinata delle misure sismiche HSVR, MASW e REMI

Per ovviare alla limitata profondità di indagine della prova MASW si è proceduto con l'interpretazione della misura tomografica effettuata nello stesso ambito, utilizzando come vincolo il modello creato a partire dallo stendimento. L'elaborazione della misura, mediante ricostruzione della curva sintetica H/V, è riuscita a riprodurre con buona approssimazione la curva HVSr registrata, fornendo il profilo sismico del sito.

La ricostruzione del modello di inversione evidenzia una crescita di velocità di propagazione delle onde sismiche correlabile ad un aumento della rigidità del sottosuolo.

Il modello di inversione derivato dall'indagine dei microtremiti H/V per la **Prova HSVR1** è presentato di seguito (Tabella 1):

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 14
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Tabella 1: Modello di Inversione prova **HSVR1**

Profondità (bottom layer) [m]	Spessore sismostrati [m]	Vs [m/s]	Interpretazione stratigrafica
0.20	0.20	80	Copertura pedogenizzata
11.00	10.80	160	Copertura soffice
39.00	28.00	240	Copertura moderatamente rigida
94.00	55.00	360	Copertura mediamente rigida
119.00	25.00	440	Copertura mediamente rigida
206.00	87.00	500	Copertura mediamente rigida
inf.	inf.	590	Copertura rigida

La ricostruzione dei profili sismo-stratigrafici ha evidenziato la presenza di materiali soffici nei primi 11 metri di profondità, caratterizzati da una velocità di propagazione delle onde S inferiore ai 200m/s, mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità del sottosuolo diventa gradualmente elevato, con valori di Vs di circa 590m/s a 205metri di profondità.

Il modello di inversione derivato dall'indagine dei microtrempi H/V per la **Prova HSVR2** è presentato di seguito (Tabella 2):

Tabella 2: Modello di Inversione prova **HSVR2**

Profondità (bottom layer) [m]	Spessore sismostrati [m]	Vs [m/s]	Interpretazione stratigrafica
0.20	0.20	100	Copertura pedogenizzata
10.00	9.80	150	Copertura soffice
35.00	25.00	230	Copertura moderatamente rigida
80.00	45.00	350	Copertura mediamente rigida
157.00	77.00	440	Copertura mediamente rigida
inf.	inf.	570	Copertura rigida

La ricostruzione dei profili sismo-stratigrafici ha evidenziato la presenza di materiali soffici nei primi 10 metri di profondità, caratterizzati da una velocità di propagazione delle onde S inferiore ai 200m/s, mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità del sottosuolo diventa gradualmente elevato, con valori di Vs di circa 570m/s a 160metri di profondità

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 15
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

L'elaborazione dei dati sperimentali ottenuti dall'indagine **MASW**, finalizzata alla determinazione del profilo verticale delle onde di taglio e del valore V_{S30} , ha evidenziato il seguente modello di inversione.

Tabella 3: Modello di Inversione prova **MASW**

Profondità (bottom layer) [m]	Spessore sismostrati [m]	Vs [m/s]	Interpretazione stratigrafica
1.70	1.70	250	Copertura soffice
3.10	1.40	203	Copertura soffice
7.20	4.10	155	Copertura soffice
10.30	3.10	173	Copertura soffice
17.30	7.00	229	Copertura moderatamente rigida
25.10	7.80	278	Copertura moderatamente rigida
inf.	inf.	330	Copertura mediamente rigida

La ricostruzione dei profili sismo-stratigrafici ha evidenziato la presenza di materiali soffici nei primi 10,50 metri circa di profondità, caratterizzati da una velocità di propagazione delle onde S inferiore ai 200m/s, mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità del sottosuolo diventa gradualmente elevato, con valori di Vs di circa 330m/s a 25metri di profondità.

Per ciò che riguarda l'Indagine **REMI** è stato effettuato uno stendimento di lunghezza pari a 60m con passo tra i geofoni pari a 4,0m; rispetto all'indagine Masw riesce ad investigare, a parità di stendimento, ad una profondità maggiore (a frequenze più basse); in generale si riesce a chiarire meglio la velocità alla profondità compresa tra i 15/20m ed i 35/40m, con conseguente migliore definizione delle V_{seq} , rispetto all'impiego della sola Indagine MASW:

Tabella 4: Modello di Inversione prova **REMI**

Profondità (bottom layer) [m]	Spessore sismostrati [m]	Vs [m/s]	Interpretazione stratigrafica
1.15	1.15	218	Copertura soffice
2.45	1.30	165	Copertura soffice
5.45	3.00	175	Copertura soffice
9.75	4.30	191	Copertura soffice
18.55	8.80	225	Copertura moderatamente rigida
27.95	9.40	273	Copertura moderatamente rigida
35.45	7.50	328	Copertura mediamente

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 16
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

			rigida
43.95	8.50	345	Copertura mediamente rigida
inf.	inf.	388	Copertura mediamente rigida

La ricostruzione dei profili sismo-stratigrafici ha evidenziato la presenza di materiali soffici nei primi 10,00 metri circa di profondità, caratterizzati da una velocità di propagazione delle onde S inferiore ai 200m/s, mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità del sottosuolo diventa gradualmente elevato, con valori di Vs pari a circa 388m/s a 44metri di profondità.

Per **velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio** si intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati nei primi metri di profondità **dal piano di posa della fondazione**, secondo la relazione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h(strato)}{V_s(strato)}}$$

dove N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore $h(strato)$ e dalla velocità delle onde S $V_s(strato)$. Per H si intende la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio V_{seq} è definita dal parametro V_{seq} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Non avendo riscontrato il substrato sismico entro la profondità di 30 metri, la velocità equivalente delle onde S, è stata calcolata nei primi 30 metri al di sotto del piano di imposta della fondazione, come esplicitamente richiesto dalla normativa vigente; la velocità delle onde VS a 30 metri dal piano fondazione (V_{seq}) ipotizzato rispettivamente ad 1m ed a 2 m di profondità risulta (si farà esclusivo riferimento ai valori calcolate mediante le prove MASW e REMI considerate più significative a tale scopo):

- **Analisi microtremori MASW (1m)** $V_{seq} (1.00-31.00) = 230$ m/s
- **Indagine geofisica REMI (1m)** $V_{seq} (1.00-31.00) = 229$ m/s
- **Analisi microtremori MASW (2m)** $V_{seq} (2.00-32.00) = 258$ m/s
- **Indagine geofisica REMI (2m)** $V_{seq} (2.00-32.00) = 233$ m/s

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 17
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

5 RISPOSTA SISMICA LOCALE E STABILITA' DEL SITO

5.1. Definizione delle V_{s30} e della “categoria di sottosuolo”

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di fondazione.

Da normativa (D.M. 17.01.2018), le categorie di sottosuolo di fondazione specifiche risultano:

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

Dalla ricostruzione del quadro dei profili sismostratigrafici emersi dal seguente studio, si ritiene opportuno inserire il sito in oggetto di studio nella **Categoria C** “*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 e 360 m/s*”.

5.2. Amplificazione topografica

Gli effetti di amplificazione topografica si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie superficiali più o meno articolate e da irregolarità topografiche in generale; tali condizioni favoriscono la focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta del rilievo a seguito di fenomeni di riflessione sulla superficie libera e di interazione fra il campo d'onda incidente e quello diffratto.

Tale amplificazione è condizionata dalle caratteristiche geometriche del rilievo (quali il fattore di forma H/L), che devono essere tali per cui la lunghezza d'onda incidente λ sia comparabile con la semilarghezza

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 18
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

$L/2$ della base dell'irregolarità; lungo i fianchi del rilievo l'interazione tra onde incidenti ed onde diffratte produce rapide variazioni in ampiezza e frequenza delle onde sismiche generando un complesso campo di spostamenti con alternanza di amplificazioni ed attenuazioni che possono dare luogo a marcati movimenti differenziali.

Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

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 $i > 30^\circ$

Per tener conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del **coefficiente topografico** S_T riportati nella Tabella 3.2.V (D.M.17 Gennaio 2018), in funzioni delle categorie topografiche definite in § 3.2.2 (D.M. 17 Gennaio 2018) e dell'ubicazione dell'opera.

Le sotto 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 a 30 metri.

Sulla base della morfologia del sito indagato pressoché pianeggiante e pertanto, con inclinazioni inferiori al valore soglia di $i = 15^\circ$, gli **effetti topografici possono essere trascurati** in quanto la superficie topografica, poiché il sito è ubicato in una ampia area pianeggiante, può essere classificata come appartenente alla **categoria T1:**

“Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ ”

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

Per tale categoria si assume quale valore del **coefficiente di amplificazione topografica** $S_T = 1,0$.

5.3. Microzonazione sismica

Facendo riferimento allo studio di microzonazione sismica allegato al P.G.T. comunale (Baraldi et al, 2010 – Carta della pericolosità sismica locale), l'area di studio è stata classificata come **Zona 4A** “Zone di pianura

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 19
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

con presenza di depositi alluvionali granulari e/o coesivi” con effetti associabili ad amplificazioni litologiche.

Considerato che il Teatro Guido oggetto di studio, può considerarsi edificio ed opera rilevante secondo il D.d.u.o. 21 novembre 2003 - n. 19904, è stata elaborata una verifica monodimensionale dell'amplificazione locale (analisi di III° livello). A completamento sarà eseguita anche un'analisi di II° livello.

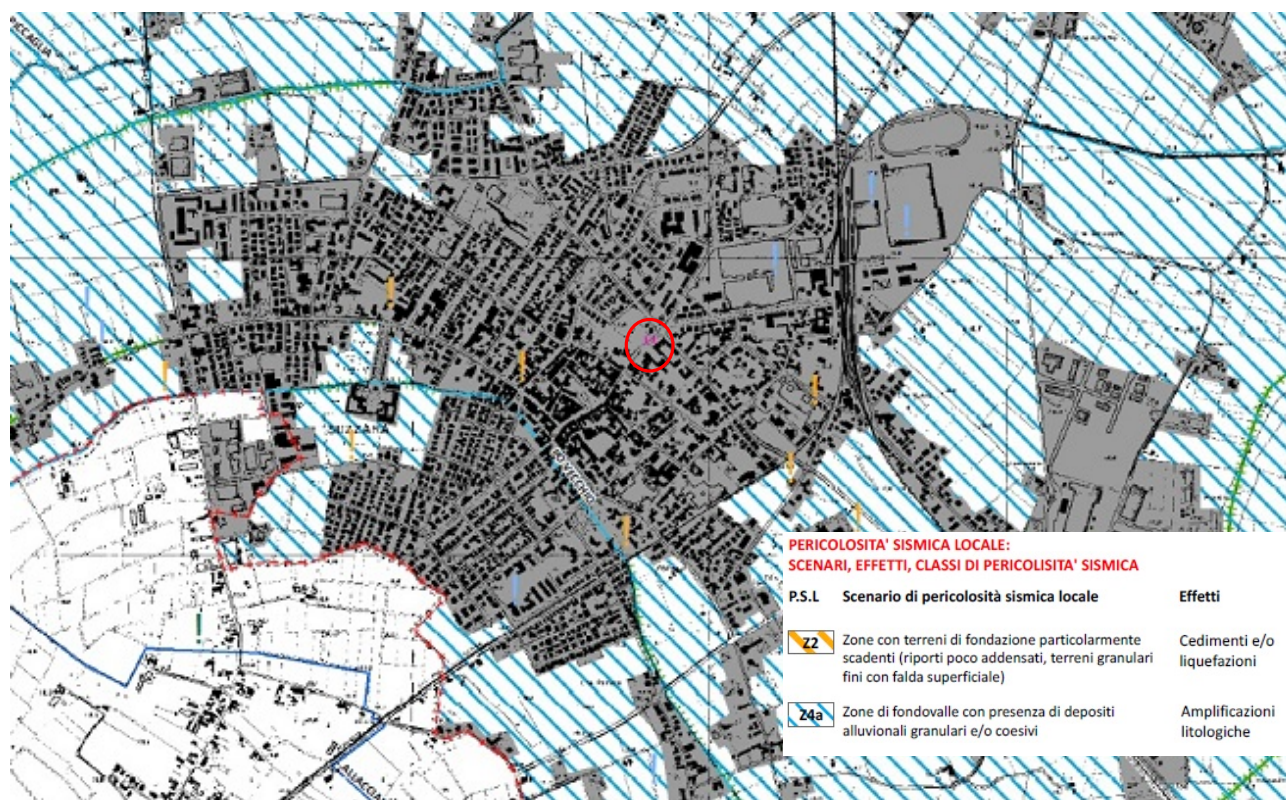


Fig. 1: stralcio della Carta della pericolosità sismica locale allegata al P.G.T. Comunale

5.4. Analisi di secondo livello ai sensi della D.G.R. n. IX/2016 del 30.11.2011

Il secondo livello è di carattere semiquantitativo e fornisce una stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di amplificazione (F_a), valore che si riferisce agli intervalli di periodo (T) tra 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s. La procedura seguita fa riferimento a quanto indicato nella Delibera di Giunta Regionale 30 Novembre 2011 – N. Ix/2616 – Allegato 5.

Per prima cosa è stato calcolato il periodo T proprio del sito mediante la formula di seguito indicata:

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^n h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{s_i} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)}$$

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 20
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

dove:

T = periodo proprio del sito

h e V_s = spessore e velocità dello strato i -esimo del modello preso come riferimento

Il valore che è risultato dai calcoli è stato pari a circa 2,05 (da indagine HVSR2)

La procedura prevede la scelta della scheda litologica in funzione del modello geofisico riscontrato ed utilizzato (andamento delle V_s con la profondità sino al Bedrock); per il sito in questione è stata scelta la scheda litologica Sabbiosa.

La scelta delle curve di correlazione T/Fa all'interno della scheda di valutazione è avvenuta tramite l'individuazione dello spessore e della velocità V_s dello strato superficiale, che ha portato a selezionare la curva 2 (da MASW, primo sismo-strato con velocità inferiore ai 200m/s e spessore di 8,50 metri escludendo i primi 2m di verosimile terreno di riporto), valida per entrambi gli intervalli di Periodo di riferimento, 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s.

L'intervallo 0,1-0,5 s, in particolare, si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide (indicativamente fino a 5 piani in elevazione), mentre l'intervallo 0,5-1,5 s è caratteristico di strutture più alte e flessibili (da 5 a 10 piani).

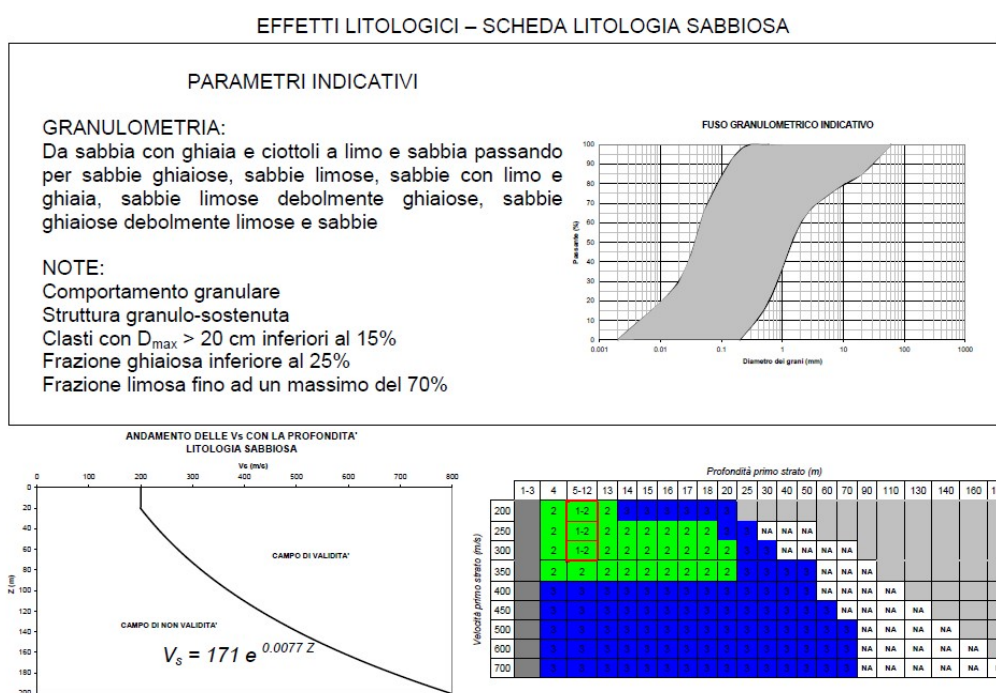


Figura 2 – Stralcio della scheda litologica sabbiosa

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 21
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

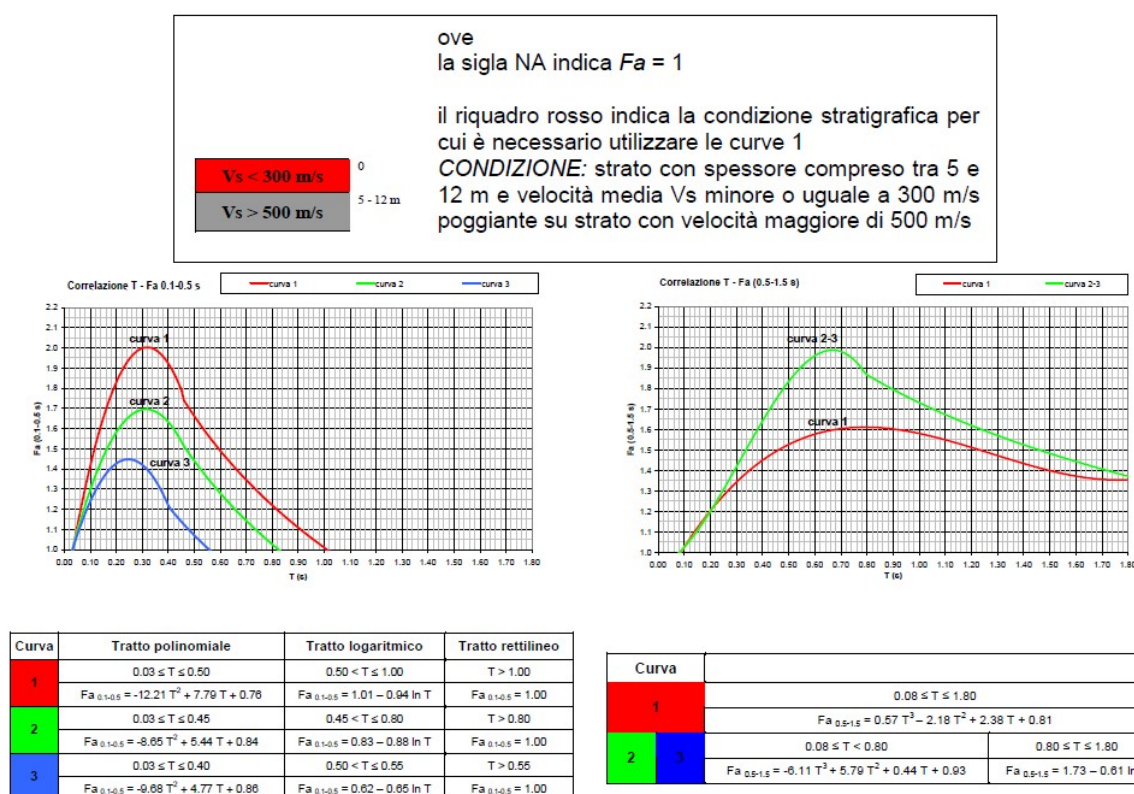


Figura 3 – Curve 1, 2 e 3 per ogni intervallo di periodo considerato della scheda litologica sabbiosa

I risultati a cui si è giunti definiscono per il sito in questione i valori caratteristici dell'area pari a:

$$F_a = 1,0 \quad (0,1s < T_0 < 0,5s)$$

$$F_a = 1,4 \quad (0,5s < T_0 < 1,5s)$$

Per il Comune di Suzzara (MN), i valori di soglia, oltre i quali lo spettro proposto dalla normativa vigente risulta insufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito, riportati nella banca dati in formato .xls (soglie_lomb.xls), sono i seguenti (in rosso quelli relativi ai suoli di Categoria C):

Valori soglia per il periodo compreso tra 0,1-0,5s				
COMUNE	SUOLO B	SUOLO C	SUOLO D	SUOLO E
SUZZARA	1,4	1,8	2,1	1,9
Valori soglia per il periodo compreso tra 0,5-1,5s				
COMUNE	SUOLO B	SUOLO C	SUOLO D	SUOLO E
SUZZARA	1,7	2,3	3,9	2,9

I valori calcolati risultano inferiori rispetto ai valori soglia definiti dalla Regione Lombardia per il territorio comunale di Suzzara (MN), per un suolo di tipo C e pari rispettivamente a:

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 22
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

$$Fa_{soglia} = 1,8 \ (0,1s < T_0 < 0,5 s)$$

$$Fa_{soglia} = 2,3 \ (0,5s < T_0 < 1,5 s)$$

I valori di Fa ottenuti per l'area indagata risultano minori al valore soglia assegnato dalla Regione Lombardia alla categoria di suolo corrispondente "C"; ne consegue che il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica vigente è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica.

Considerando che il Teatro Guido oggetto di studio, è edificio ed opera rilevante secondo il D.d.u.o. 21 novembre 2003 - n. 19904, verrà elaborata una verifica monodimensionale dell'amplificazione locale (analisi di III° livello).

5.5. Verifica monodimensionale dell'amplificazione locale (Analisi di III° livello)

5.5.1 Premessa

Scopo di questo studio di risposta sismica locale consiste nella valutazione degli effetti di sito e la definizione in modo più accurato possibile dell'azione sismica di progetto rispetto alla procedura semplificata, ammessa con qualche restrizione dalle N.T.C. 2018, ed in definitiva il calcolo degli spettri di risposta specifici per il sito in esame.

Le analisi di risposta sismica locale sono state effettuate utilizzando procedure di calcolo in cui viene simulata la propagazione di onde sismiche all'interno di strati di terreno compresi tra il sottostante substrato roccioso ed il piano di campagna.

In generale queste analisi richiedono le seguenti operazioni:

- scelta della schematizzazione geometrica del problema;
- definizione del modello geotecnico nonché sismostratigrafico del sottosuolo;
- definizione dell'azione sismica al substrato roccioso;
- scelta della procedura di analisi.

In considerazione del fatto che il deposito in esame può essere considerato costituito da una sequenza di strati piani e paralleli e il sito è caratterizzato da una superficie topografica orizzontale, è stato possibile effettuare le analisi assumendo un modello stratigrafico monodimensionale (1D), in cui le proprietà dei materiali variano unicamente lungo la direzione verticale.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 23
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



Fig. 4: area di studio e calcolo del periodo di riferimento per l'azione sismica

Si segnala che, sulla base di quanto indicato dai Progettisti dell'opera, sono stati adottati nello studio di risposta sismica locale i seguenti parametri di ingresso:

Vita Nominale V_N : 50 anni

Classe d'uso: III

Coefficiente d'uso c_u : 1,50

Vita di riferimento V_R : 75 anni

5.5.2 Elaborazione del modello sismico

La fase preliminare consiste nel costruire la colonna di sottosuolo di riferimento, rappresentata da strati (layer) con rispettivi caratteristiche litologiche, peso di volume, densità e velocità delle onde di taglio S (V_s). Per la definizione della colonna stratigrafica si è fatto riferimento alle indagini geognostiche eseguite in sito durante la campagna del mese Settembre 2021, alla stratigrafia di pozzi presenti nelle vicinanze dell'area indagata e ad altre informazioni desunte dalla bibliografia (tra cui la Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna in scala 1/250000 vedi stralcio in fig. 5); le risultanze sono state poi confrontate con le informazioni ottenute dall'analisi dei microtremori che hanno permesso di ricostruire la sismostratigrafia profonda. La stima della velocità media di propagazione delle onde di taglio è estrapolata attraverso la rielaborazione congiunta dei risultati delle indagini geofisiche disponibili e dall'analisi del modello geologico profondo, in particolare nella definizione della profondità del bedrock sismico.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 24
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

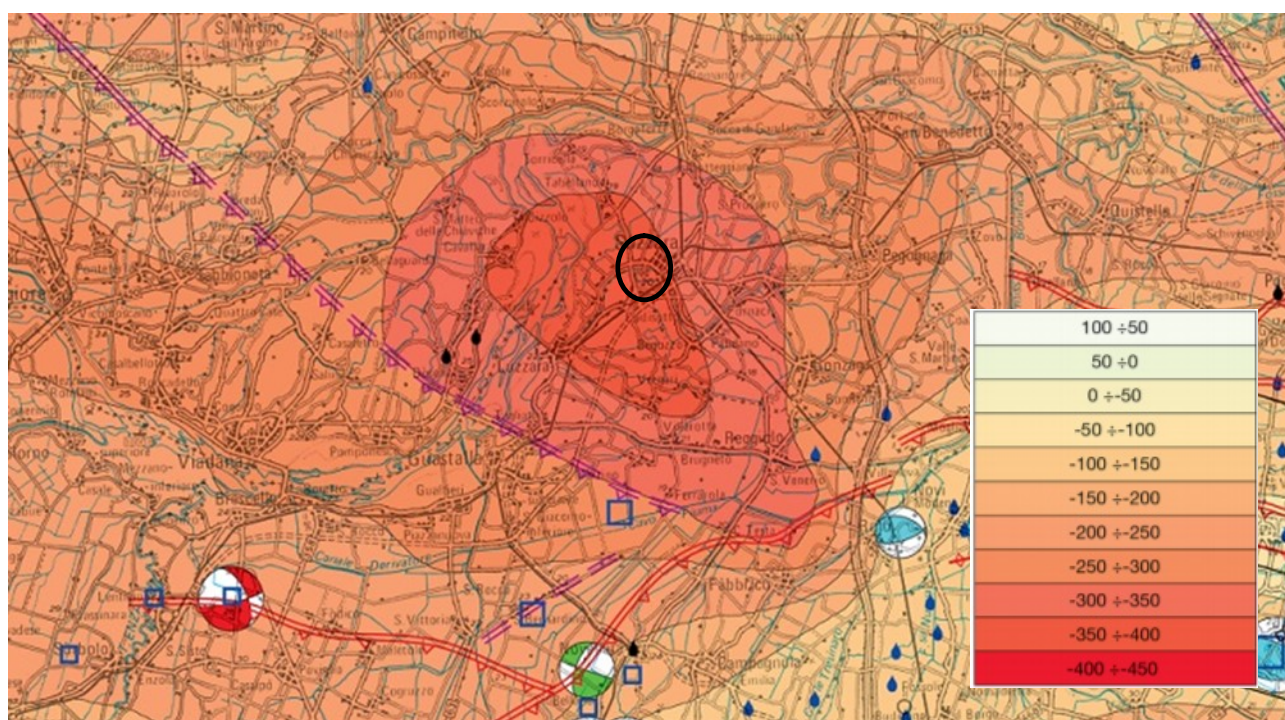


Fig. 5: Schema geologico di sottosuolo nel settore delle pieghe ferraresi. In arancione sono rappresentate le isobate della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (0,45 Ma). Le aree più chiare sono quelle in cui questa superficie stratigrafica è più superficiale. In rosso è rappresentato il fronte dei sovrascorrimenti. (da Boccaletti et al., 2004, Carta Sismotettonica RER).

Il modello numerico di risposta sismica locale è stato elaborato introducendo come input, con parametri sufficientemente cautelativi, il seguente modello sismo-stratigrafico semplificato:

Prof. [m]	Spessore sismostrati [m]	Litologia prevalente	Vs [m/s]	Peso di volume [kN/m ³]	G/G_max Model	Damping Model
0 – 11	11	ARGILLA	170	17.0	Idriss (1990), Clay	Idriss (1990), Clay
11 – 20	9	SABBIA fine	225	18.0	Idriss (1990), Sand	Idriss (1990), Sand
20 -28	8	ARGILLA	275	19.0	Idriss (1990), Sand	Idriss (1990), Sand
28 - 80	52	SABBIA	350	19.5	Idriss (1990), Sand	Idriss (1990), Sand
80 - 130	50	SABBIA	450	20.0	Idriss (1990), Clay	Idriss (1990), Clay
130 - 160	30	SABBIA	520	21.0	Idriss (1990), Sand	Idriss (1990), Sand
160 - 230	70	BEDROCK LIKE	650	21.0	Idriss (1990), Sand	Idriss (1990), Sand
>230	/	BEDROCK SISMICO	800	22.0		Damping 1%

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 25
--	--	---------

<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

Il bedrock sismico inteso come pseudobedrock in quanto caratterizzato da velocità delle onde S pari a 650 m/s inferiore a 800 m/s, è impostato alla profondità di -160 m dal p.c. Il bedrock sismico è stato ipotizzato a partire dai circa 230m da p.c.

Si ritiene che questo intervallo possieda le fondamentali caratteristiche (geometria, età deposizionale, profondità, grado di addensamento, rigidità ecc.) per essere assunto come il bedrock nell'elaborazione del modello sismico.

Il codice di calcolo utilizzato per la modellazione (STRATA) permette di calcolare la risposta dinamica monodimensionale di una colonna di terreno in cui le proprietà elastiche e lo smorzamento variano in funzione del livello deformativo (analisi lineare equivalente EQL).

Nel software sono implementate tutta una serie di curve di decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento realizzate da diversi autori e in funzione di diversi parametri; nel caso in esame sono state scelte quelle realizzate da Idriss (1990).

5.5.3 Definizione dell'azione sismica al bedrock

In questa fase occorre definire l'azione sismica da applicare al substrato litoide, rappresentata da un numero prefissato di registrazioni accelerometriche. Si sono utilizzati accelerogrammi naturali (il numero minimo che consente di far riferimento ai valori medi dei risultati, secondo quanto prescritto dalle NTC 2018) selezionato da banche dati accelerometriche digitali (European Strong-motion Database), imponendo i criteri di scelta e spettro-compatibilità imposti dalle NTC 2018.

In questo lavoro si è deciso di inserire nel calcolo un gruppo di sette accelerogrammi scelti secondo il criterio fondamentale della compatibilità con i vincoli sismotettonici del contesto geologico regionale e, in particolare, con i valori di magnitudo, distanza epicentrale e i meccanismi focali dei terremoti di scenario che contribuiscono maggiormente alla pericolosità del sito.

Tale informazione può essere ottenuta dall'analisi di disaggregazione della pericolosità disponibili sul sito web dell'INGV (<http://esse1-gis.mi.ingv.it>) per tutto il territorio nazionale, con riferimento ai punti del reticolo in cui esso è stato suddiviso attraverso una mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (TR = 476 anni).

Nel caso in esame la probabilità di eccedenza è adattata al periodo di riferimento VR di 100 anni stabilito per le strutture in progetto nel sito di interesse.

Tale adattamento è stato definito utilizzando la seguente relazione:

$$P(VR) = 1 - e^{-[1/TR]\Delta t}$$

Imponendo $\Delta t = 50$ anni è stata stimata la probabilità per SLD (TR=101 anni) pari a circa 39% e per SLV (TR = 949 anni) pari a circa 5%.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 26
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

I diagrammi di disaggregazione sono stati poi costruiti con i valori di probabilità di eccedenza cautelativi rispetto ai valori ricalcolati tra quelle disponibili sul sito INGV, in questo caso pari a 39% (SLD) e a 5% (SLV).

La disaggregazione della pericolosità sismica consente di valutare separatamente, per le coordinate prese a riferimento, i vari contributi dei sismi che hanno sollecitato il sito in oggetto.

Considerata una coppia di valori di magnitudo e distanza, il processo di disaggregazione fornisce il terremoto che domina lo scenario di pericolosità, inteso come l'evento sismico di magnitudo M e distanza R dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso.

Nella figura seguente sono riportati i diagrammi di disaggregazione derivati dalla mappa di pericolosità sismica del territorio italiano definita su una griglia spaziale di passo 0.05°. Sono ottenuti utilizzando il nodo di griglia

della mappa più vicino al sito di interesse.

Le probabilità di eccedenza selezionate sono quelle che più approssimano cautelativamente le probabilità di eccedenza ricalcolate per il periodo di riferimento di 75 anni, considerato nel presente studio.

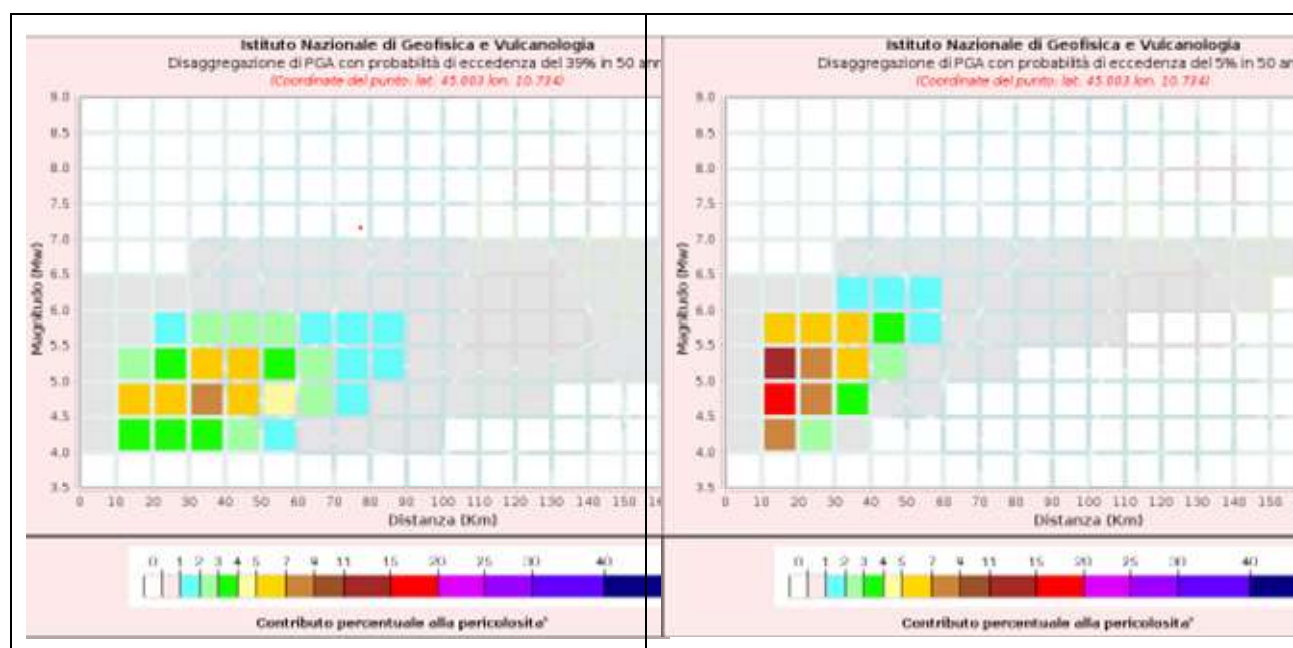


Fig.6: diagrammi di disaggregazione. Il diagramma di sinistra si riferisce a SLD, quello di destra a SLV.

L'analisi dei diagrammi di disaggregazione consente di valutare il contributo percentuale delle diverse coppie di magnitudo e distanza e individua la coppia di valori che domina lo scenario sismico del sito di interesse.

Nella tabella seguente sono riportati i valori medi di magnitudo e distanza ottenuti dall'analisi di disaggregazione condotta sul nodo di griglia della mappa di pericolosità più prossimo al sito di interesse.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 27
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Il parametro ϵ indica di quanto l'accelerazione attesa al sito per coppia magnitudo/distanza individuata dalla analisi di disaggregazione si discosti dal valore di PGA stimato al sito nella carta di pericolosità relativo al sito (valori minori a 1 indicano buona corrispondenza, mentre valori maggiori di 1 indicano uno scostamento significativo).

	MAGNITUDO Mw	DISTANZA Km	ϵ
(SLD) Prob. eccedenza 39%	5.06	45.9	1.1
(SLV) Prob. eccedenza 5%	5.21	26.0	1.4


Dalla disaggregazione si ricavano i valori di M ed R utilizzati per la ricerca degli accelerogrammi naturali con il software Rexel v 3.5 (Iervolino, I., Galasso, C., Chioccarelli, E.) sviluppato nell'ambito del comitato interuniversitario ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica). Tra i parametri più rilevanti per la corretta selezione degli accelerogrammi in relazione allo spettro target cui devono corrispondere ci sono:

- la PGA;
- l'intervallo di confidenza inferiore e superiore con lo spettro target;
- la magnitudo del sisma di riferimento (M);
- la distanza epicentrale (R).

Nelle figure seguenti sono riportate le schermate di Rexel con i parametri utilizzati per la ricerca.


STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 28
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



REXEL v 3.5

Computer aided code-based real record selection for seismic analysis of structures
(c) Iunio Iervolino, Carmine Galasso and Eugenio Chioccarelli, 2008-2013
Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy.



1. Target Spectrum

Italian Building Code 2008

ag [g]

Longitude [°]

Latitude [°]

Site class EC8

Topographic category

Nominal life

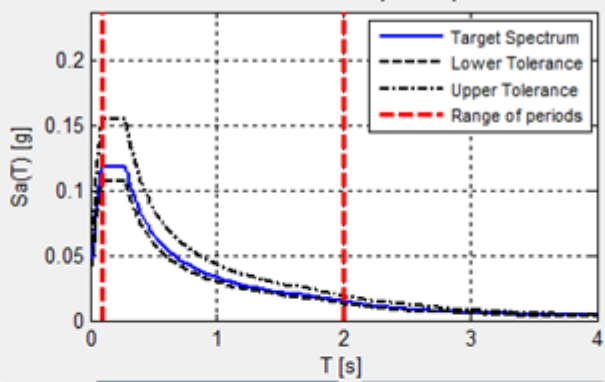
Functional type

Limit state

Horizontal ☒ Vertical ☐

Disaggregation for (Italian sites) Conditional hazard for (Italian sites)

Acceleration elastic response spectrum



Build code spectrum User-defined spectrum

Look at disaggregation Look at conditional hazard

3. Spectrum matching

Lower tolerance [%]

Upper tolerance [%]

T1 [s]

T2 [s]

2. Preliminary database search

Based on M minimum M maximum

R minimum [km] R maximum [km]

T [s] Epsilon minimum Epsilon maximum

Database

Site class

records: 2x 229
events: 120

4. Analysis options

Scaled records ☒ (PGA-normalized records' search)

I'm feeling lucky ☐ (Returns only the first combination found)

Set size

☐ Individual record

☒ 7 records

☐ 30 records

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 29
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

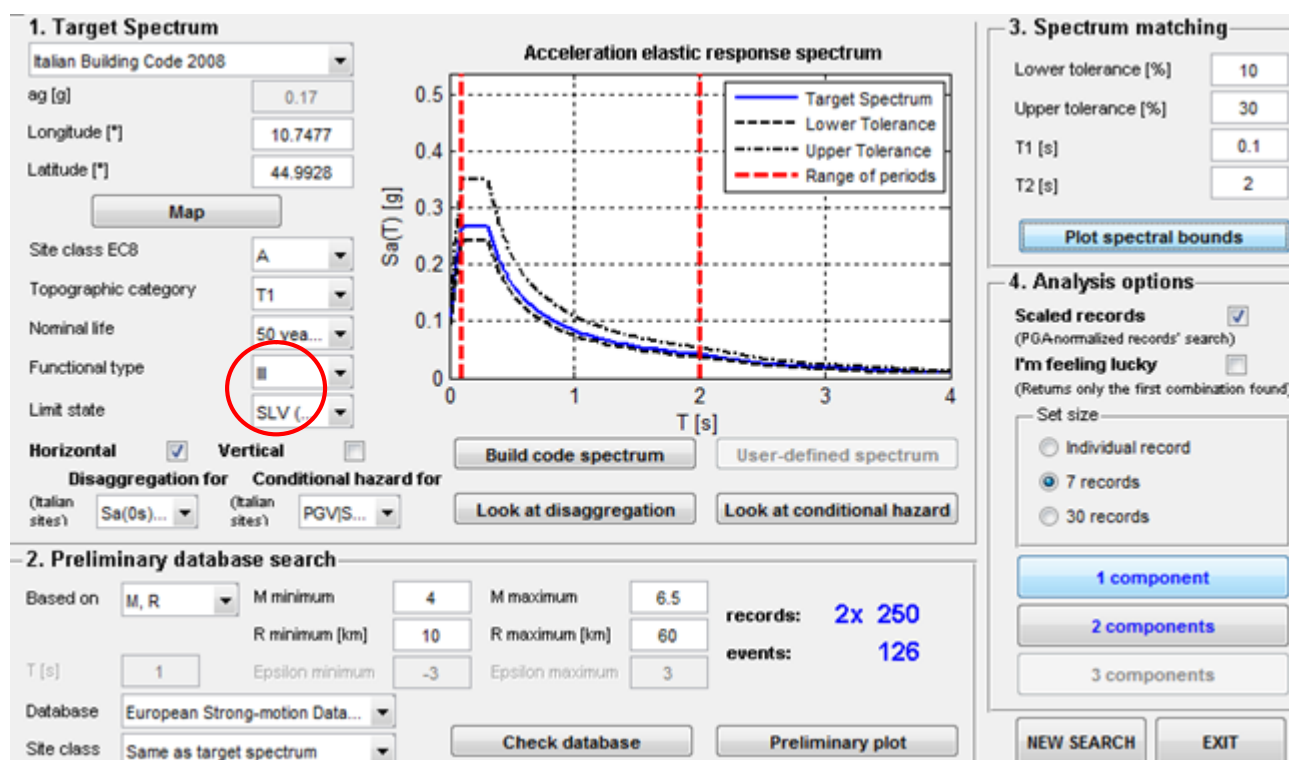


Fig. 7: Schermata di REXEL con i parametri utilizzati per la ricerca (SLD in alto e SLV in basso)

Solitamente i sette accelerogrammi estratti, non hanno le dimensioni corrette per corrispondere con sufficiente confidenza allo spettro target, si rende necessaria quindi la scalatura lineare dei records.

SLD						
Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Dist. [km]	EC8 Site class	Waveform ID
Izmit (aftershock)	31/08/1999	5.1	oblique	73	A	6956xa
Umbria Marche (aftershock)	12/10/1997	5.2	oblique	22	A	789xa
Kranidia	25/10/1984	5.5	?	23	A	1891ya
Cazulas	24/06/1984	4.9	oblique	24	A	342xa
Umbria Marche	26/09/1997	6	normal	27	A	598xa
Chenoua	29/10/1989	5.9	thrust	50	A	467ya
Ierissos (foreshock)	14/06/1983	4.4	strike slip	13	A	1916xa

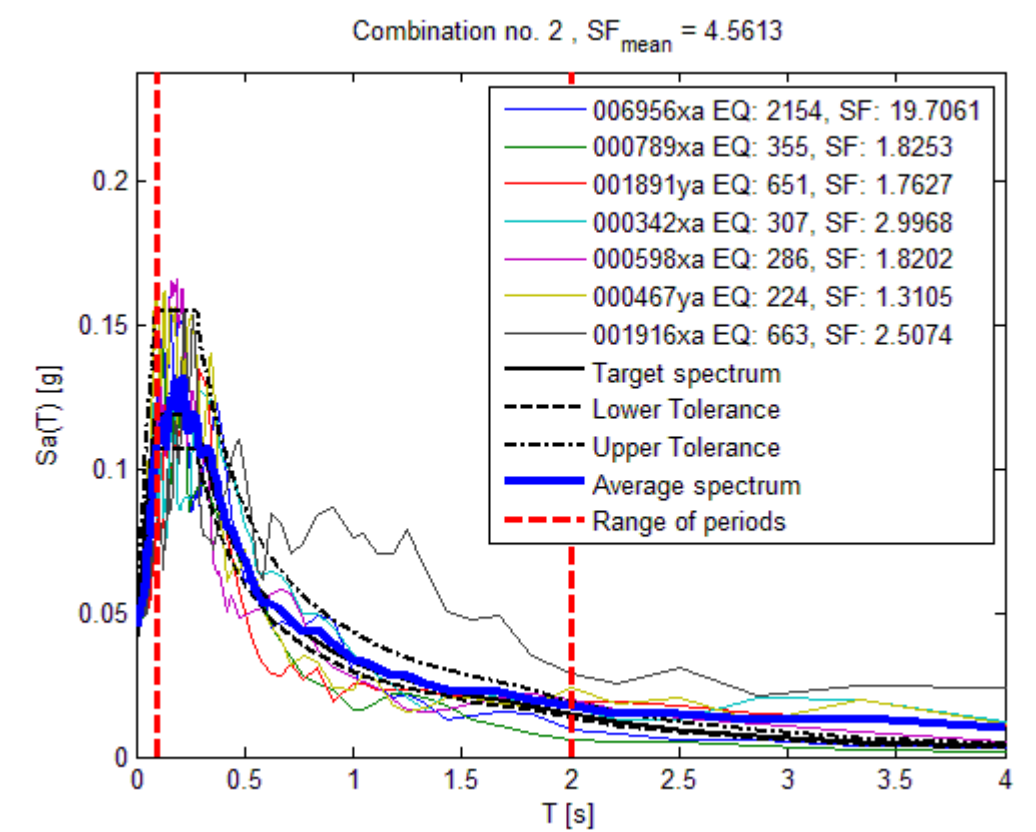
SLV						
Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Dist. [km]	EC8 Site class	Waveform ID
Bingol	01/05/2003	6.3	strike slip	14	A	7142ya

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 30
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Cazulas	24/06/1984	4.9	oblique	24	A	342xa
Sicilia-Orientale	13/12/1990	5.6	strike slip	50	A	960xa
South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	34	A	6269xa
Umbria Marche (aftershock)	14/10/1997	5.6	normal	23	A	642xa
Biga	05/07/1983	6.1	oblique	56	A	350xa
Umbria Marche	26/09/1997	6	normal	55	A	615xa

I sette spettri costituenti le combinazioni utilizzate sono rappresentati nei diagrammi di seguito riportati. Le linee tratteggiate rappresentano le fasce di tolleranza inferiore e superiore del 10 e 30 % rispettivamente, che devono essere rispettate all'interno dell'intervallo temporale considerato vincolante (0.1 – 2.0 secondi in tratteggio rosso).



STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 31
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

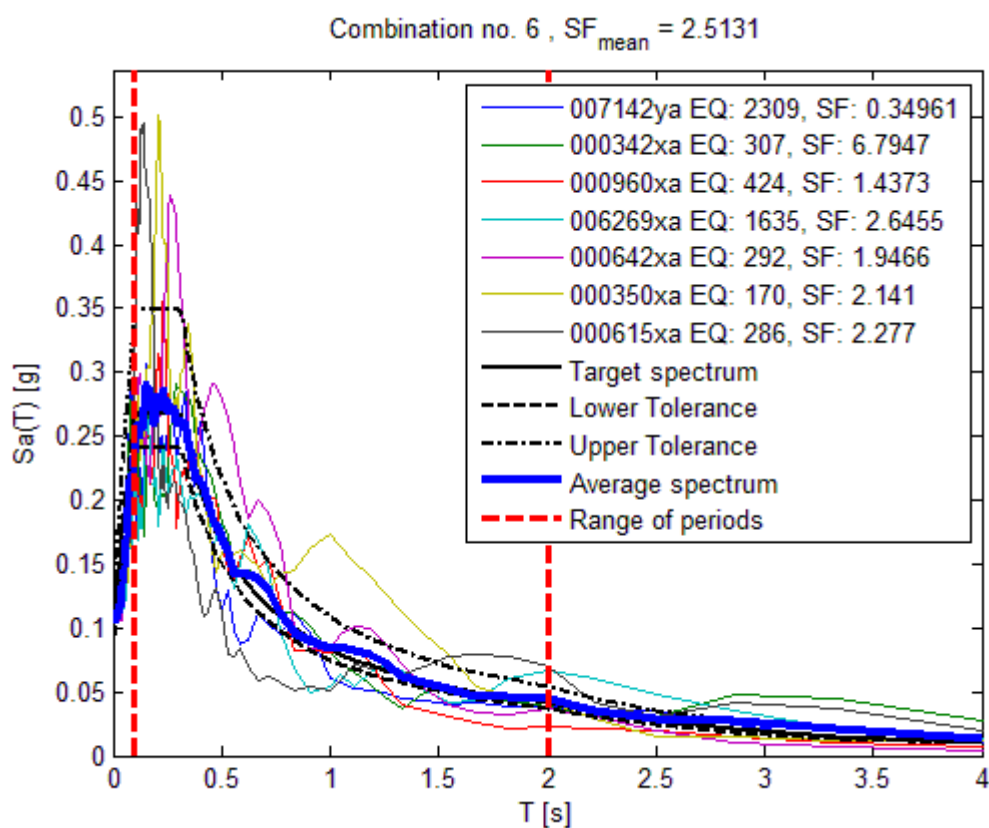


Fig. 8: Grafici di spettro-compatibilità tra lo spettro medio ottenuto dai 7 accelerogrammi naturali e lo spettro di risposta elastico su suolo a previsto per SLD (in alto) e SLV (in basso) nel sito di interesse.

5.5.4 Elaborazione degli effetti di amplificazione

Per la modellazione sismica si è utilizzato il programma STRATA, sviluppato dalla University of Texas, Austin, e distribuito gratuitamente dal Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER) dell'University of California, Berkeley. STRATA come EERA, sono modellatori che discendono dal codice di calcolo SHAKE, sviluppato già negli anni '70 da Shnabel, in California, e da allora ampiamente utilizzato. STRATA sviluppa l'analisi della risposta sismica di sito mediante un modello monodimensionale (1D), dove non sono presenti significative variazioni laterali di impedenza sismica, con un metodo lineare equivalente (EQL) nel dominio delle frequenze, utilizzando dei segnali di input nel dominio del tempo (accelerogrammi).

Nell'analisi di risposta sismica le variabili da considerare sono molteplici e la complessità del sistema nasce anche dall'incertezza con cui sono vincolate le caratteristiche litologiche e geofisiche, in particolare degli strati profondi. Il risultato dell'analisi è uno spettro di risposta "medio" (mediana dei modelli analizzati per tutti gli input) a cui è associata una stima della variabilità statistica (logaritmo della deviazione standard).

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 32
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Nel software sono implementate tutta una serie di curve di decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento realizzate da diversi autori e in funzione di diversi parametri; nello stesso tempo è possibile importare valori per la costruzione delle curve derivati da altri studi o da risultati sperimentali.

Nelle figure seguenti sono riportati i diagrammi delle curve inserite (funzione della litologia) e utilizzate per l'elaborazione della risposta sismica locale con i relativi autori.

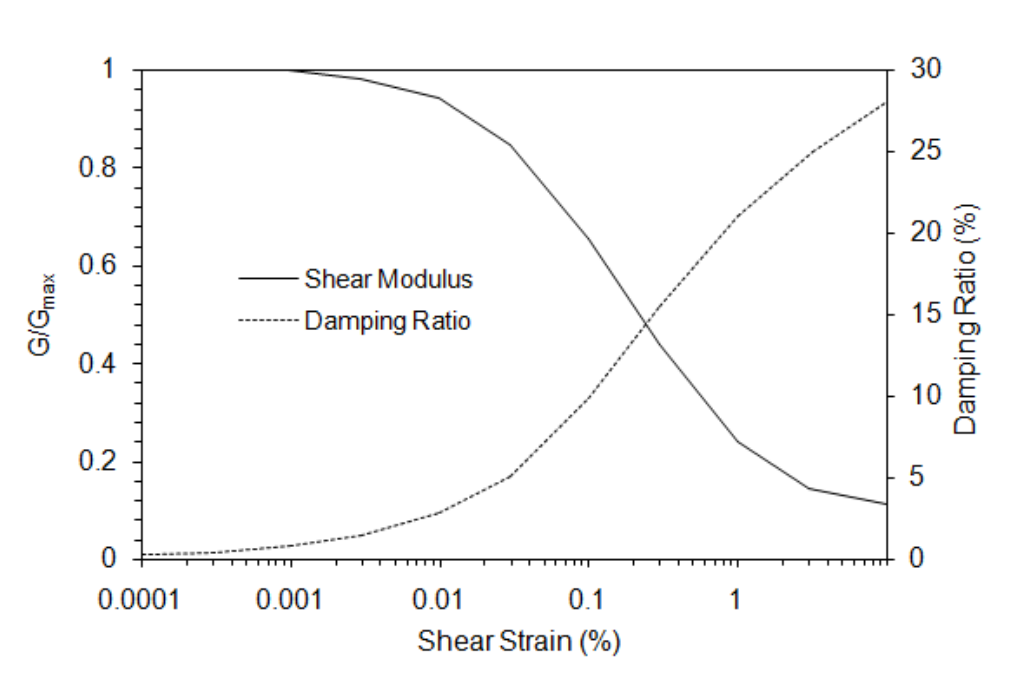
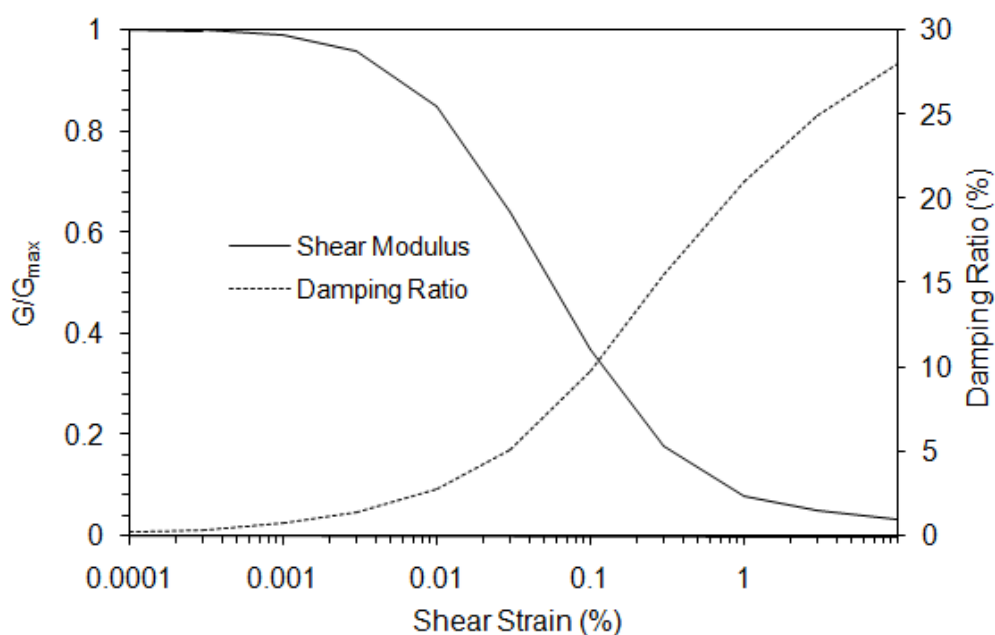


Fig. 9: Modulus for clay (Seed and Sun, 1989) - Upper range and damping for clay (Idriss 1990)



Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Fig. 10: Modulus for sand (Seed & Idriss 1970) - Upper Range and damping for sand (Idriss 1990)

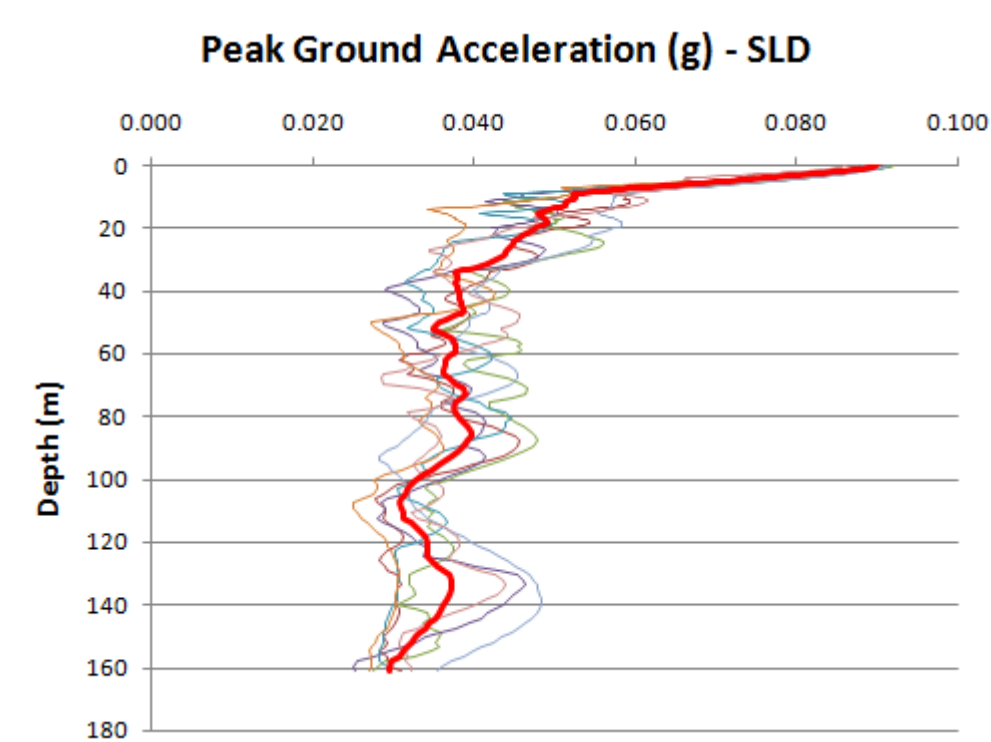
Attraverso l'elaborazione tramite il software STRATA è stato possibile valutare la risposta sismica del sito. La modellazione consente la valutazione dell'amplificazione locale intesa come PGA/PGA_0 , ossia come rapporto dell' Ag_{max} al suolo (calcolata con STRATA) rispetto all' Ag di riferimento del terremoto. In altre parole la modellazione di risposta sismica locale consente di elaborare il profilo equivalente della variazione della ag di picco dal tetto del pseudobedrock sismico fino alla superficie.

Secondo la procedura semplificata contenuta nelle norme NTC per il progetto in essere che prevede la realizzazione di strutture in Classe III, Vita nominale 50 anni, periodo di riferimento 75 anni, si ha:

- **SLD:** il tempo di ritorno è pari a 75 anni e, tenuto conto dell'accelerazione orizzontale massima di riferimento attesa al bedrock (0,046 g) per un terreno di categoria C ($FA= 1,50$) l'accelerazione massima orizzontale al suolo risulta $a_{MAX(g)} = 0,069$ g.

- **SLV:** il tempo di ritorno è pari a 712 anni e, tenuto conto dell'accelerazione orizzontale massima di riferimento attesa al bedrock (0,107 g) per un terreno di categoria C ($FA= 1,50$) l'accelerazione massima orizzontale al suolo risulta $a_{MAX(g)} = 0,161$ g.

Nei seguenti diagrammi è riportato l'andamento della PGA lungo la verticale restituito da STRATA dove le linee sottili rappresentano il risultato dei segnali degli input sismici di riferimento, mentre la linea rossa rappresenta il valore medio.



STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 34
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

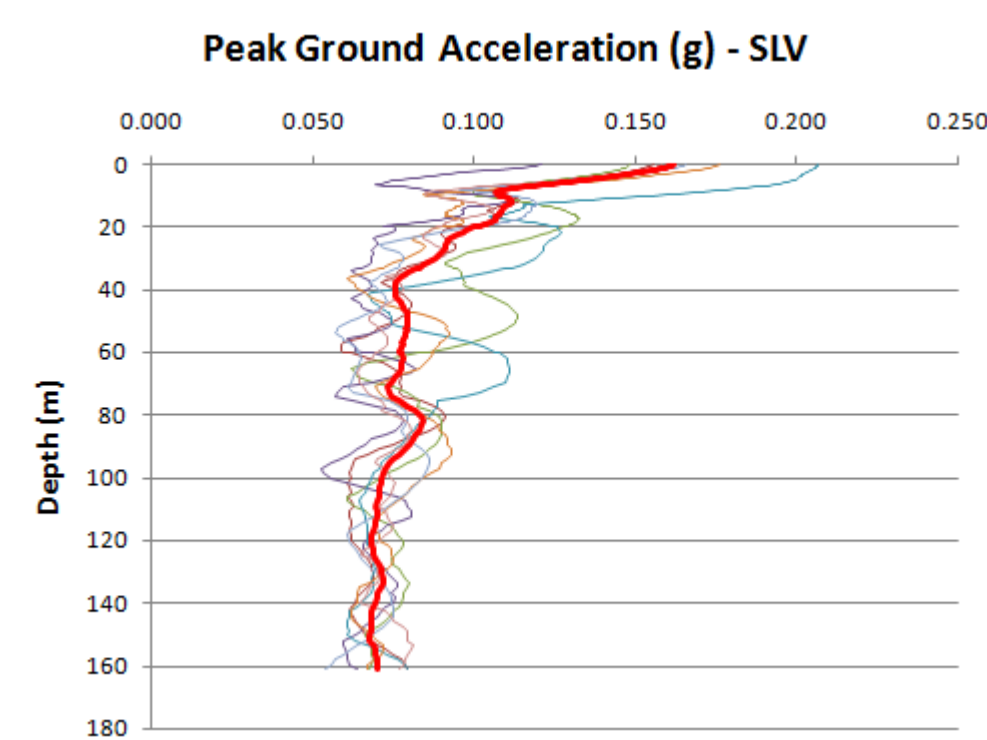


Fig. 11: andamento della PGA lungo la verticale restituito da STRATA - linee sottili rappresentano il risultato dei segnali degli input sismici di riferimento; la linea rossa rappresenta il valore medio (SLD i alto; SLV in basso)

Riassumendo, si evidenziano i seguenti risultati:

per **SLD** il valore massimo dell'accelerazione di picco è pari a **0,092 g (input 467ya)** e il valore medio a **0,090 g** che, se confrontati all'accelerazione di riferimento al bedrock (**0,046 g**), producono un fattore di amplificazione rispettivamente pari a **$FA_{MAX} = 2,00$** e **$FA_{MEDIO} = 1,96$** ;

per **SLV** il valore massimo dell'accelerazione di picco è pari a **0,207 g (input 642xa)** e il valore medio a **0,162 g** che, se confrontati all'accelerazione di riferimento al bedrock (**0,107 g**), producono un fattore di amplificazione rispettivamente pari a **$FA_{MAX} = 1,93$** e **$FA_{MEDIO} = 1,51$** .

Dai dati di output relativi ai segnali costituenti la settupla di accelerogrammi spettro-compatibili utilizzati sono stati ricavati poi i relativi spettri di risposta elastici; in particolare, nella figura successiva sono riportati gli spettri elastici per le componenti orizzontali relativi ai singoli segnali e il segnale medio.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 35
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

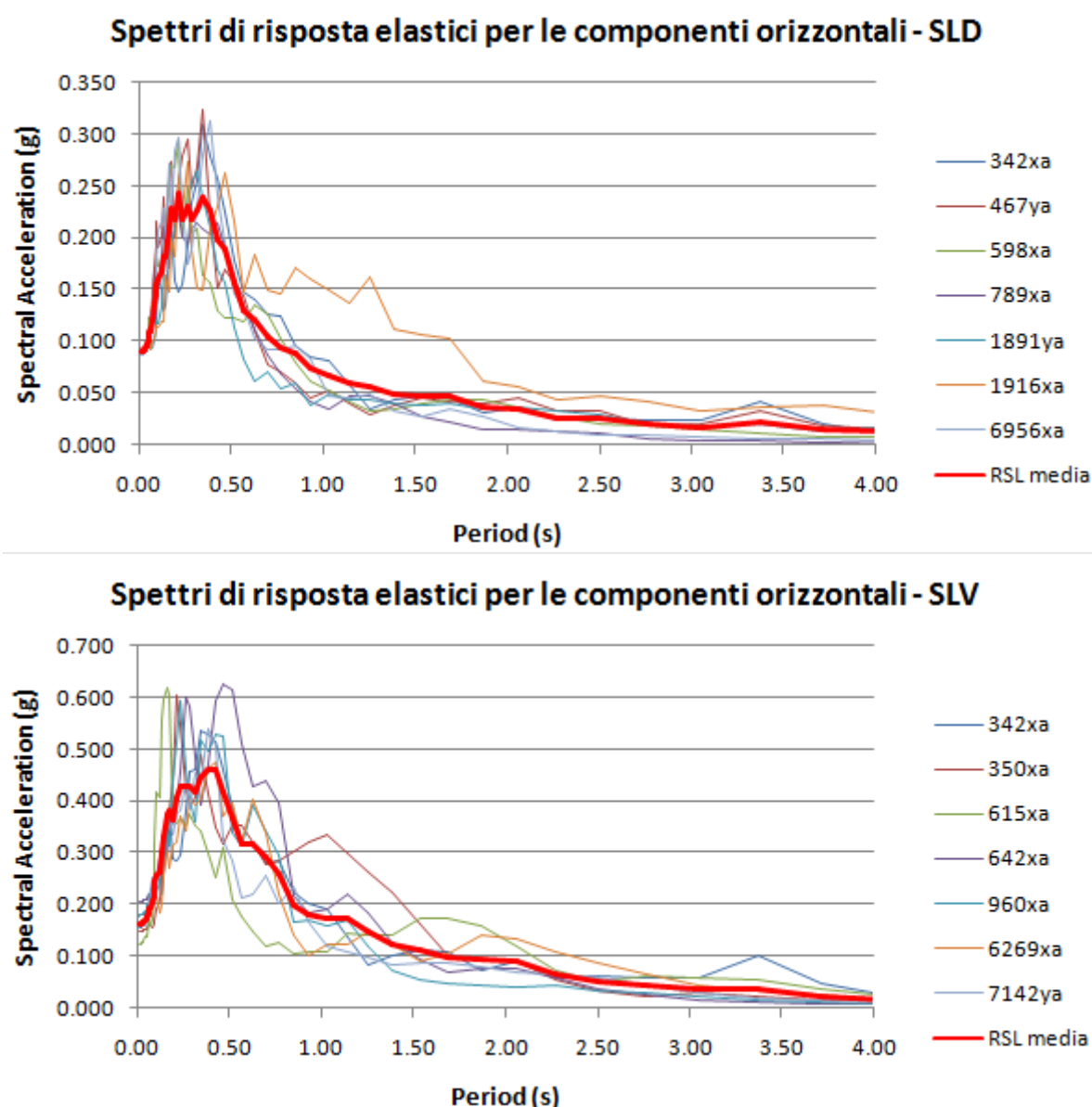


Fig. 13: spettri elastici per le componenti orizzontali relativi ai singoli segnali e il segnale medio.

Nelle tabelle seguenti sono tabulate le coordinate degli spettri medi di risposta sismica locale allo SLD e SLV.

Spettro medio di Risposta Sismica Locale - SLD									
	T (sec)	Acc. (g)			T (sec)	Acc. (g)		T (sec)	Acc. (g)
	0.010	0.090			0.079	0.137		0.630	0.121
	0.011	0.090			0.088	0.146		0.695	0.104

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 36
--	--	---------

Titolo:	Data:
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

	0.012	0.090			0.097	0.155			0.767	0.094
	0.013	0.090			0.107	0.159			0.847	0.088
	0.015	0.090			0.118	0.167			0.935	0.074
	0.016	0.091			0.130	0.182			1.032	0.067
	0.018	0.091			0.143	0.182			1.139	0.059
	0.020	0.091			0.158	0.211			1.257	0.057
	0.022	0.091			0.175	0.228			1.387	0.048
	0.024	0.091			0.193	0.218			1.531	0.047
	0.027	0.091			0.213	0.242			1.689	0.047
	0.030	0.092			0.235	0.217			1.864	0.036
	0.033	0.092			0.259	0.230			2.058	0.035
	0.036	0.093			0.286	0.218			2.271	0.026
	0.040	0.096			0.316	0.227			2.507	0.025
	0.044	0.098			0.349	0.239			2.766	0.020
	0.048	0.101			0.385	0.227			3.053	0.017
	0.053	0.108			0.425	0.199			3.370	0.022
	0.059	0.112			0.469	0.189			3.719	0.015
	0.065	0.110			0.517	0.156			4.105	0.012
	0.072	0.121			0.571	0.130			4.530	0.007

Spettro medio di Risposta Sismica Locale - SLV										
	T (sec)	Acc. (g)			T (sec)	Acc. (g)			T (sec)	Acc. (g)
	0.010	0.162			0.079	0.207			0.630	0.318
	0.011	0.162			0.088	0.217			0.695	0.293
	0.012	0.162			0.097	0.245			0.767	0.258
	0.013	0.163			0.107	0.254			0.847	0.198

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 37
--	--	---------

Titolo:	Data:
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

	0.015	0.163			0.118	0.264			0.935	0.179
	0.016	0.163			0.130	0.301			1.032	0.175
	0.018	0.163			0.143	0.333			1.139	0.172
	0.020	0.163			0.158	0.372			1.257	0.148
	0.022	0.163			0.175	0.381			1.387	0.124
	0.024	0.164			0.193	0.363			1.531	0.111
	0.027	0.164			0.213	0.407			1.689	0.098
	0.030	0.165			0.235	0.429			1.864	0.095
	0.033	0.165			0.259	0.428			2.058	0.089
	0.036	0.167			0.286	0.428			2.271	0.066
	0.040	0.168			0.316	0.416			2.507	0.052
	0.044	0.168			0.349	0.445			2.766	0.044
	0.048	0.172			0.385	0.459			3.053	0.037
	0.053	0.177			0.425	0.460			3.370	0.037
	0.059	0.184			0.469	0.418			3.719	0.023
	0.065	0.190			0.517	0.369			4.105	0.016
	0.072	0.195			0.571	0.315			4.530	0.011

Successivamente è riportato, per entrambi gli stati limite presi in esame, il grafico che evidenzia lo spettro elastico medio di risposta sismica locale e il relativo spettro normalizzato con la classica forma dello spettro di normativa per poterlo confrontare con gli spettri di risposta semplificati anch'essi riportati nel diagramma.

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

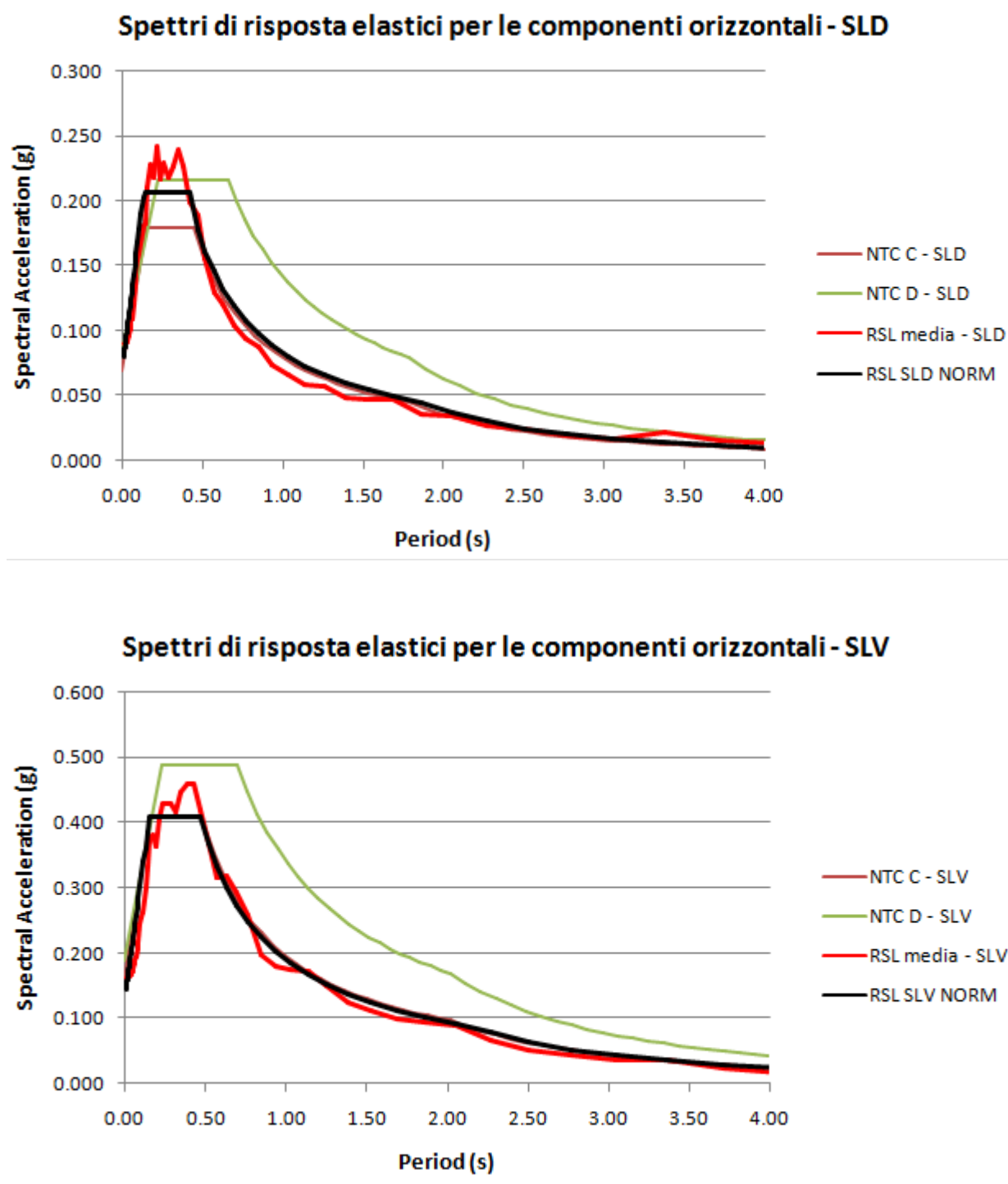


Fig. 13 spettro elastico medio e spettro normalizzato di risposta sismica locale confrontati con suolo tipo C e tipo D definito dalle Norme tecniche

La procedura di “normalizzazione” dello spettro si basa sulle regole di realizzazione degli spettri di normativa ed è qui di seguito sinteticamente descritta.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 39
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Gli spettri da normativa dipendono da parametri indipendenti (A_g , T_c^* , F_0) dati dalla norma, altri fissati dal progettista e altri (T_B, T_C , T_D , SS , ST) dipendenti dai precedenti.

La procedura permette di trasformare lo spettro elastico di risposta, risultato delle simulazioni numeriche (output), in uno spettro con forma standard (NTC, 2018), costituita da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, ed un ramo in cui l'accelerazione decresce con $1/T$ e quindi con velocità costante.

Dalla Risposta Sismica Locale si calcola lo spettro in pseudo accelerazione (S_A) si determina il periodo (T_A) per il quale si ha il massimo dello spettro stesso.

Si calcola il valore medio dello spettro (S_{Am}) nell'intorno del massimo T_A tra $0,5T_A$ e $1,5T_A$, questo sarà assunto come valore del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard.

Si determina lo spettro in pseudo velocità (S_V) a partire da quello di accelerazione, si determina altresì il massimo di tale valore in pseudo velocità e analogamente si calcola il valore medio dello spettro (S_{Vm}) nell'intorno di T_V tra $0,8T_V$ e $1,2T_V$.

Si determina il periodo proprio in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante con la formula $T_C = 2 \cdot \pi \cdot (S_{Vm}/S_{Am})$ e successivamente si determinano $T_B = T_C/3$ e $T_D = 4A_{max} + 1.6$

Poiché il valore di A_{max} non è fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, il parametro F_0 di output è definito dal rapporto fra S_{Am} e A_{max} , mentre il parametro SS di amplificazione stratigrafica si ottiene dal rapporto fra A_{max} e A_g (ovvero accelerazione del sito su roccia, terreno A).

Infine, si applicano le equazioni da NTC 2018 per la determinazione dei tratti dello spettro tra 0 s, T_B , T_C , T_D e $>T_D$.

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

Nelle tabelle seguenti sono tabulate le coordinate degli spettri semplificati di risposta sismica locale allo SLD e SLV.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 40
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Spettro normalizzato di Risposta Sismica Locale - SLD										
	T (sec)	Acc. (g)			T (sec)	Acc. (g)			T (sec)	Acc. (g)
	0.010	0.079			0.079	0.151			0.630	0.132
	0.011	0.081			0.088	0.159			0.695	0.119
	0.012	0.082			0.097	0.169			0.767	0.108
	0.013	0.083			0.107	0.179			0.847	0.098
	0.015	0.084			0.118	0.190			0.935	0.089
	0.016	0.086			0.130	0.203			1.032	0.080
	0.018	0.088		TB	0.143	0.207			1.139	0.073
	0.020	0.090			0.158	0.207			1.257	0.066
	0.022	0.092			0.175	0.207			1.387	0.060
	0.024	0.094			0.193	0.207			1.531	0.054
	0.027	0.097			0.213	0.207			1.689	0.049
	0.030	0.100			0.235	0.207		TD	1.864	0.045
	0.033	0.103			0.259	0.207			2.058	0.037
	0.036	0.106			0.286	0.207			2.271	0.030
	0.040	0.110			0.316	0.207			2.507	0.025
	0.044	0.114			0.349	0.207			2.766	0.020
	0.048	0.119			0.385	0.207			3.053	0.017
	0.053	0.124		TC	0.425	0.207			3.370	0.014
	0.059	0.130			0.469	0.177			3.719	0.011
	0.065	0.136			0.517	0.161			4.105	0.009
	0.072	0.143			0.571	0.145			4.530	0.008

Spettro normalizzato di Risposta Sismica Locale - SLV										
	T (sec)	Acc. (g)			T (sec)	Acc. (g)			T (sec)	Acc. (g)
	0.010	0.145			0.079	0.271			0.630	0.301

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

	0.011	0.147			0.088	0.285			0.695	0.273
	0.012	0.149			0.097	0.302			0.767	0.248
	0.013	0.152			0.107	0.320			0.847	0.224
	0.015	0.154			0.118	0.340			0.935	0.203
	0.016	0.157			0.130	0.362			1.032	0.184
	0.018	0.160			0.143	0.386			1.139	0.167
	0.020	0.163		TB	0.158	0.408			1.257	0.151
	0.022	0.167			0.175	0.408			1.387	0.137
	0.024	0.171			0.193	0.408			1.531	0.124
	0.027	0.176			0.213	0.408			1.689	0.112
	0.030	0.181			0.235	0.408			1.864	0.102
	0.033	0.186			0.259	0.408		TD	2.058	0.092
	0.036	0.192			0.286	0.408			2.271	0.078
	0.040	0.199			0.316	0.408			2.507	0.064
	0.044	0.207			0.349	0.408			2.766	0.052
	0.048	0.215			0.385	0.408			3.053	0.043
	0.053	0.224			0.425	0.408			3.370	0.035
	0.059	0.234		TC	0.469	0.408			3.719	0.029
	0.065	0.245			0.517	0.367			4.105	0.024
	0.072	0.257			0.571	0.333			4.530	0.020

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

La figura successiva riporta invece l'andamento delle amplificazioni locali in funzione delle frequenze del moto di vibrazione dell'impulso sismico, del fattore di smorzamento D, del rapporto tra le impedenze sismiche dei sismostrati (allo SLV).

La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione $A(f)$ del deposito.

Il moto sismico può essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione del deposito.

In questo senso, molto importante risulta la prima frequenza naturale di vibrazione denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore massimo.

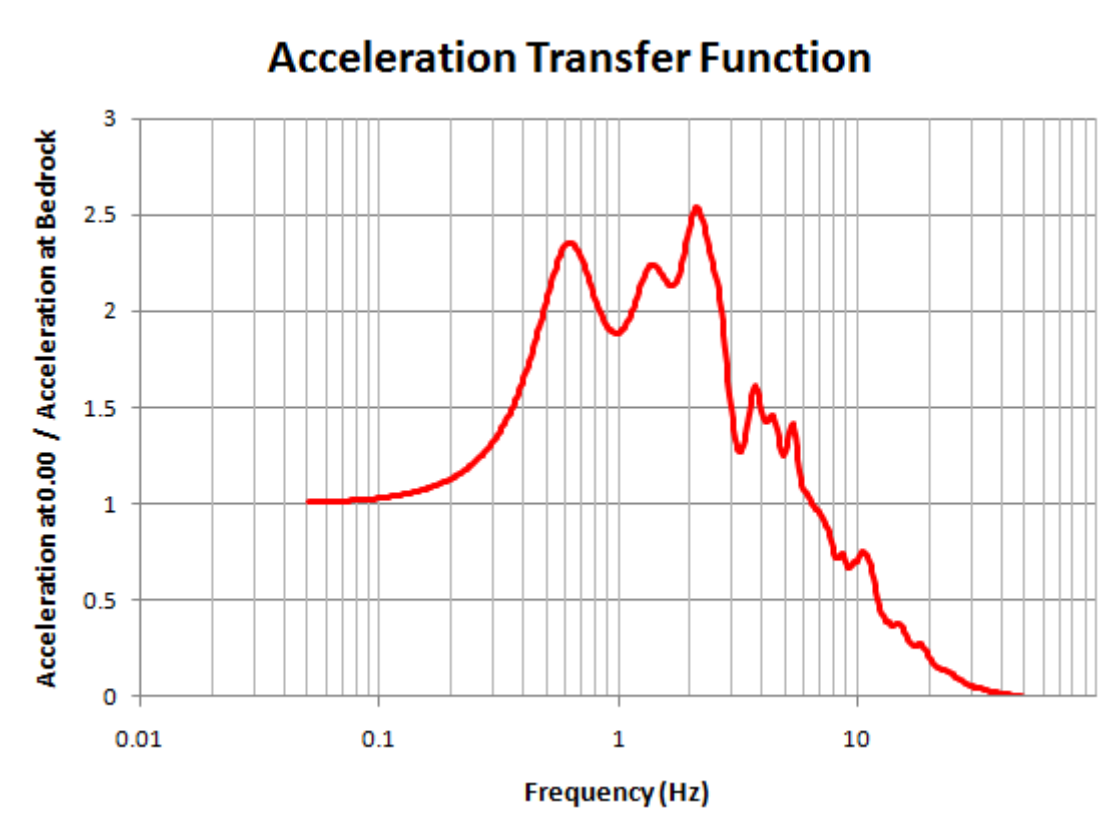


Fig. 14: Funzione di trasferimento del moto oscillatorio del sisma lungo tutta la colonna litologica tipo per valore medio degli input sismici

Dalle funzioni di amplificazione ricavate dalle elaborazioni risulta che la frequenza fondamentale assume un valore locale di **2.15 Hz** con amplificazione pari a circa **2.55**; è stata individuata un'altra frequenza significativa a **0.62 Hz** con amplificazione pari a circa **2,35**.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 43
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

5.6. Amplificazione stratigrafica allo SLV e allo SLD

Tenuto conto dell'accelerazione al suolo di riferimento pari a 0,107g (derivato dalle coordinate del luogo di studio), del coefficiente di amplificazione stratigrafico (1,93 da analisi di III° Livello) e del coefficiente topografico (1,0), **l'accelerazione alla sommità del deposito** (o accelerazione massima orizzontale al suolo) **allo SLV** risulta:

$$a_{MAX(g)} = 0,107 * 1,93 * 1,00 = 0,207g$$

Tenuto conto dell'accelerazione al suolo di riferimento pari a 0,046g (derivato dalle coordinate del luogo di studio), del coefficiente di amplificazione stratigrafico (2,00 da analisi di III° Livello) e del coefficiente topografico (1,0), **l'accelerazione alla sommità del deposito** (o accelerazione massima orizzontale al suolo) **allo SLD** risulta:

$$a_{MAX(g)} = 0,046 * 2,00 * 1,00 = 0,092g$$

6 VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Per liquefazione di un terreno si intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi. Se si esprime la resistenza al taglio attraverso la relazione di Coulomb:

$$\tau = c + (\sigma_{v0} - u) \cdot \tan \varphi$$

con:

c = coesione del terreno;

σ_{v0} = pressione litostatica totale agente alla profondità di indagine;

u = pressione interstiziale dell'acqua;

φ = angolo di resistenza al taglio del terreno

è evidente che la grandezza **τ** si può annullare solo nel caso in cui si siano verificate le condizioni:

1. **c** = 0;
2. **$(\sigma_{v0} - u)$** = 0.

La condizione 1 vieta che il fenomeno della liquefazione possa verificarsi in terreno coesivi o incoerenti ma con una significativa frazione argillosa o limosa plastica; la condizione 2 si verifica, quando la pressione interstiziale eguaglia la pressione totale esercitata ad una data profondità della colonna di terreno sovrastante e dagli eventuali sovraccarichi presenti in superficie (**$\sigma_{v0} = u$**). In definitiva il fenomeno della liquefazione si può manifestare preferibilmente in depositi sciolti non coesivi posti sotto falda, in seguito ad eventi che producano un forte aumento della pressione interstiziale dell'acqua. Durante un terremoto il terreno può essere visto come sottoposto da una serie di cicli di carico variabili in intensità e numero in funzione della magnitudo del sisma stesso. In terremoti di elevata magnitudo è sufficiente un numero ridotto di cicli di

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 44
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

carico per produrre la liquefazione del deposito, poiché ad ogni ciclo è associata una sollecitazione dinamica di maggiore intensità. In terremoti di minore magnitudo lo stesso effetto lo si ottiene con un numero superiore di cicli di carico. In definitiva quindi, un'elevata magnitudo del sisma e una lunga durata dello stesso rendono più probabile l'iniziarsi della liquefazione in un deposito a prevalenza sabbiosa. Dall'analisi dei fattori che predispongono un terreno alla liquefazione, tra i quali la granulometria, la profondità del livello potenzialmente liquefacibile, il grado di addensamento dei depositi, in linea generale si possono ritenere potenzialmente liquefacibili quei depositi sciolti costituiti da sabbie da fini a medie con contenuto in fine variabile dallo 0 al 25%, si trovano sotto falda, sono da poco a mediamente addensati e si trovano a profondità relativamente basse (di solito inferiori a 15 metri). Per la presenza di depositi limoso-sabbiosi e sabbioso-limosi, saturi, a comportamento geotecnico di tipo attritivo/granulare, è necessario, alla luce della normativa vigente, si ritiene necessario eseguire la verifica a liquefazione.

Come indicato nella DAL n. 112/2007 e successive integrazioni e modifiche, tra i metodi semplificati sono raccomandati quelli basati su prove penetrometriche CPT e/o CPTU. Tra questi si è scelto di impiegare per i calcoli specifici quello di Idriss e Boulanger del 2008, ritenuto idoneo per gli scopi del presente lavoro.

Per il presente studio sono state quindi realizzate le verifiche della propensione alla liquefazione e dei cedimenti potenziali indotti da sisma sulle verticali delle prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU1 e CPTU2 eseguite.

Per i calcoli è stato utilizzato il programma "Cliq 1.7" della Geologismiki Geotechnical Software, sviluppato in collaborazione con il Prof. Peter Robertson. L'algoritmo di calcolo utilizzato si basa sul metodo di Idriss & Boulanger (2008). Le analisi eseguite seguono le procedure di riferimento dettate dall'NCEER. Lo stesso software esegue il calcolo dei cedimenti attesi secondo il metodo proposto da Zhang ed al. (2002), calcolando per tutti i livelli che hanno un fattore di sicurezza inferiore a 2. Il potenziale di liquefazione si ottiene eseguendo il calcolo del fattore di sicurezza FS_L , definito dal rapporto CRR su CSR.

Le metodologie utilizzate permettono di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso il confronto tra le caratteristiche granulometriche e di addensamento del deposito, espresse dai valori della resistenza penetrometrica q_c normalizzati con lo sforzo tagliante indotto dal sisma (CRR e CSR), ottenuti mediante le seguenti relazioni:

$$CSR = 0,65 \cdot (a_{max}) / (g) \cdot (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) \cdot r_d \cdot 1 / (MSF \cdot K\sigma)$$

dove: a_{max} = accelerazione sismica di picco al piano campagna;

g = accelerazione di gravità;

σ_{vo} = pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.;

σ'_{vo} = pressione verticale efficace alla profondità z da p.c.;

r_d = fattore di riduzione delle tensioni alla profondità interessata;

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 45
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

MSF = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma;

K σ = coefficiente correttivo funzione delle tensioni efficaci alla profondità interessata.

Metodo di Idriss & Boulanger (2008)

Il valore di MSF è calcolato sulla base della relazione (Idriss & Boulanger):

$$\mathbf{MSF = 6,9 \exp (-M/4) - 0,058}$$

Dal valore di (q_{c1N}) è possibile ottenere la resistenza alla liquefazione, per eventi sismici di magnitudo di momento pari a $M=7.5$, mediante la seguente espressione valida per sabbie pulite.

$$\mathbf{CRR = \exp \cdot [(q_{c1N}/540) + (q_{c1N}/67)^2 - (q_{c1N}/80)^3 + (q_{c1N}/114)^4 - 3]}$$

dove: (q_{c1N})_{cs} = resistenza penetrometrica statica normalizzata e corretta per l'influenza del contenuto in fini.

Il fattore di sicurezza alla liquefazione FS_L è definito dal rapporto CRR su CSR:

$$\mathbf{FS_L = CRR \cdot MSF/CSR}$$

La liquefazione è in relazione al fattore di sicurezza nel seguente modo:

- **$FS_L > 1,25$** **liquefazione assente**
- **$1,0 < FS_L < 1,25$** **liquefazione possibile**
- **$FS_L < 1,00$** **liquefazione molto probabile**

Dati di input sismico:

I parametri di input sono stati scelti in maniera ragionata sulla base delle conoscenze acquisite, in modo da risultare i più cautelativi possibili:

- $M_w = 5,95$ ($M_{w_{max}}$ da disaggregazione);
- $a_{max} = 0,207g$ (accelerazione massima attesa sulla sommità del deposito ottenuta dallo studio della risposta sismica locale - III° livello);
- quota piezometrica da sisma: posta a -2,00 m da p.c.;
- MSF (fattore di scala: metodologia Idriss & Boulanger pari a 1,44).

Per il dettaglio delle verifiche eseguite si rimanda negli allegati, in cui sono riportati i report del software per i quali sono indicati i parametri di input utilizzati e sono rappresentati in forma grafica gli andamenti con la profondità del fattore di sicurezza, del potenziale di liquefazione e dei cedimenti attesi.

I risultati hanno evidenziato la potenziale liquefacibilità ($FS < 1,00$) dei livelli presenti tra i 10m e 11m di profondità lungo la Prova CPTU1, a circa 6,5m e circa 10,5m di profondità lungo la Prova CPTU2; la

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 46
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

restante parte degli strati granulari presenta valori di FSL generalmente > 1,00 (liquefazione assente o poco probabile).

Al termine della procedura è stato valutato l'indice del potenziale di liquefazione I_L (Iwasaki et al., 1982) che viene così definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

in cui z è la profondità dal piano campagna in metri e $w(z) = 10 - 0.5z$; ad una data quota z il fattore $F(z) = F$ vale: $F = 1 - F_L$ se $F_L \leq 1.0$

$F = 0$ se $F_L > 1.0$

dove F_L è il fattore di sicurezza alla liquefazione alla quota considerata.

Le categorie individuate dalla presente metodologia sono le seguenti:

$I_L = 0 \rightarrow$ Rischio di liquefazione “nullo”

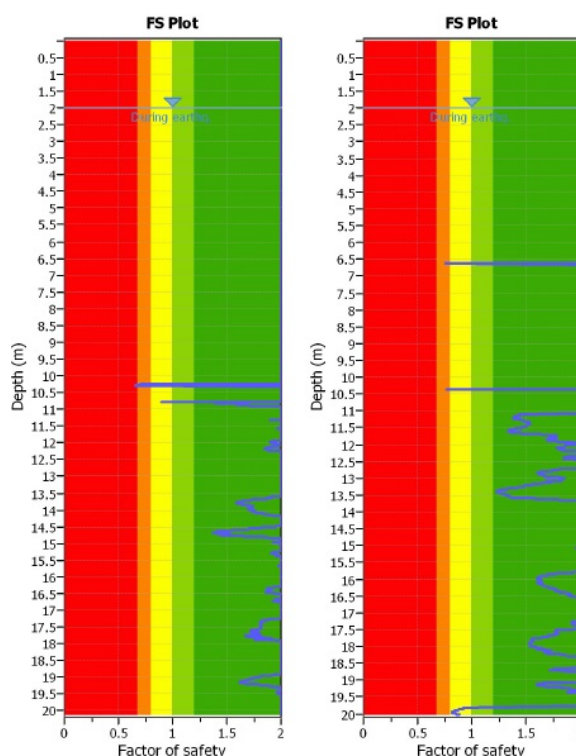
$0 < I_L \leq 2 \rightarrow$ Rischio di liquefazione “basso”

$2 < I_L \leq 5 \rightarrow$ Rischio di liquefazione “moderato”

$5 < I_L \leq 15 \rightarrow$ Rischio di liquefazione “elevato”

$I_L > 15 \rightarrow$ Rischio di liquefazione “estremamente elevato”

Le verifiche elaborate lungo la verticale CPTU1 ha fornito il risultato di **0,084** e di **0,061** lungo la Prova CPTU2 ($I_L < 2,00$) e, pertanto rientrano nella categoria di “**Rischio di liquefazione basso**”.



STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 47
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Fig. 15 Valori del FS alla liquefazione lungo le due verticali CPTU

Recentemente, per valutare i potenziali effetti globali del manifestarsi del fenomeno della liquefazione, è stato introdotto il Liquefaction Severity Number (LSN) il quale è definito dalla seguente relazione (Tonkin and Taylor, 2013; Van Ballegooy et al., 2014):

$$LSN = 1000 \cdot \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz$$

dove ε_v rappresenta la deformazione volumetrica post-liquefazione (Zhang et al., 2002) e z è la profondità dal piano campagna espressa in metri (vedasi sezioni successive).

LSN	Potenziali effetti indotti da liquefazione
0÷10	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione da nulle a lievi. Effetti trascurabili
10÷20	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione modeste. Pochi vulcanelli di sabbia
20÷30	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione moderate. Qualche vulcanello di sabbia e qualche danno strutturale
30÷40	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione da moderate a severe. I cedimenti indotti possono causare danni strutturali
40÷50	Evidenti manifestazioni del fenomeno della liquefazione. Ondulazioni e fratture in superficie. Significativi cedimenti assoluti e differenziali delle strutture
>50	Danni notevoli, estese manifestazioni del fenomeno in superficie. Notevoli cedimenti assoluti e differenziali delle strutture. Danni ai sottoservizi

Tabella 1 - Scala dei potenziali effetti indotti da liquefazione in accordo al parametro LSN (Tonkin e Taylor, 2013)

I valori calcolati col metodo suddetto per la verticale di indagine, rientrano nel campo compreso tra 0 e 10, indicante una situazione in cui le “manifestazioni del fenomeno della liquefazione sono da nulle a lievi e, pertanto, con effetti trascurabili”.

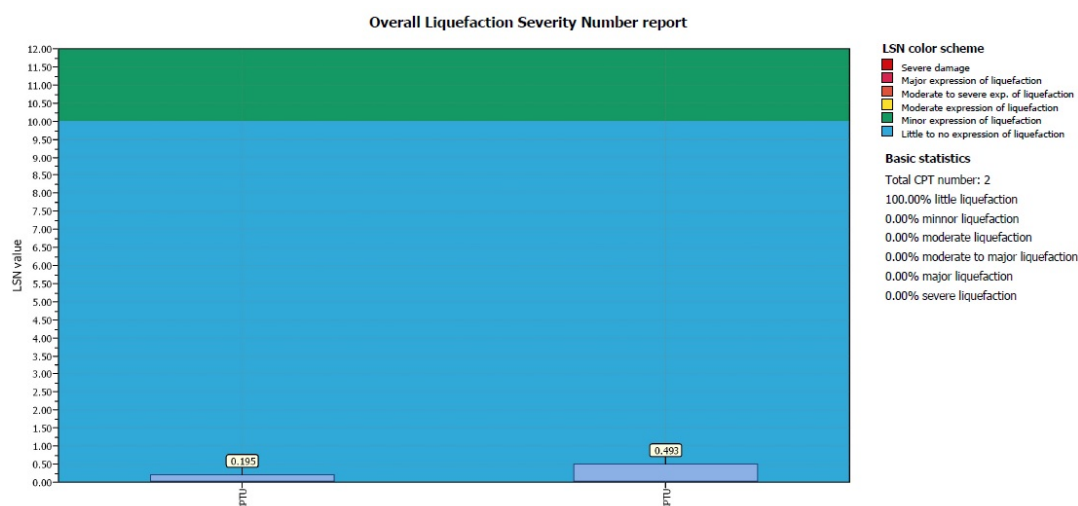


Fig. 16 Valori del parametro LSN sulle due verticali di indagine CPTU (Tonkin e Taylor, 2013)

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 48
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

7 CEDIMENTI POST SISMICI

In condizioni di sisma vi possono essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi e che possono coinvolgere sia i depositi granulari poco addensati e recenti (olocenici), sia i sedimenti fini poco coesivi.

Nell'ultimo decennio sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”), provocate da perdite di resistenza.

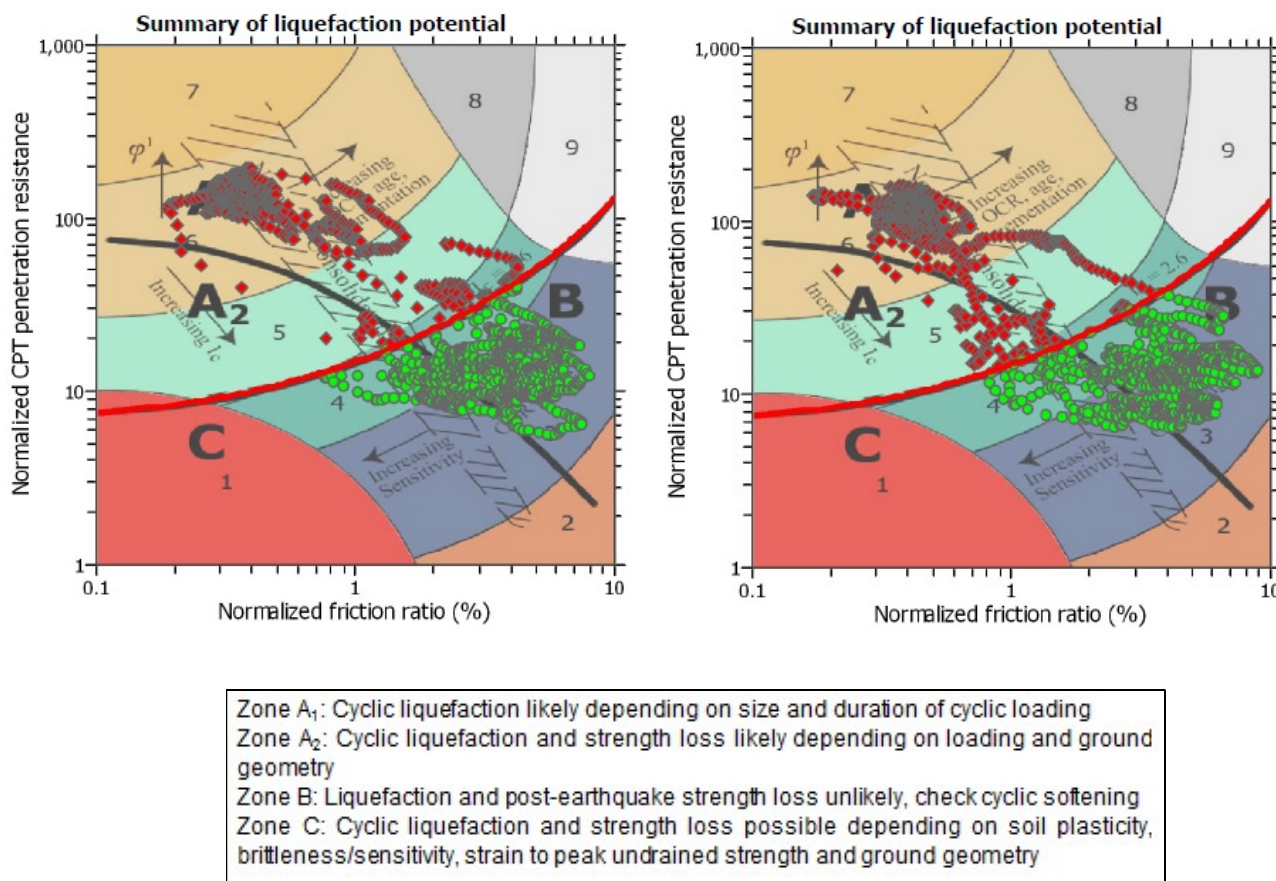


Fig. 17: Risultanze indagini penetrometriche - Classificazione di P.K. Robertson (2009) con diagramma (Q_{tn}-F) di classificazione

Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004-2007). Per la stima dei cedimenti post sisma, si è proceduto alla verifica basata sulla classificazione di comportamento di tutti i terreni proposta da Robertson (1990; 2009).

La figura seguente propone il diagramma (Q_{tn}-F) di classificazione nel quale si distinguono le zone di potenziale liquefazione e/o di “cyclic softening”.

Le zone A1 e A2 corrispondono ai sedimenti di bassa coesione attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma; le Zone B e C ($I_c > 2,6$) corrispondono

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 49
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso ed entrambi sensibili a “cyclic softening”, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona C risultano più suscettibili a perdite di resistenza post-sisma.

Limi non plastici saturi spesso cadono nella zona C, tuttavia, il loro CRR è fortemente controllato dalla coesione non drenata c_u .

Nella medesima figura è riportato, inoltre, il plottaggio dei risultati delle indagini CPTU: si evince che i sedimenti a comportamento granulare ($I_c < 2,60$), si distribuiscono nel campo A1 in maniera prevalente (miscela di sabbie – da sabbie limose e limi sabbiosi) e nel campo A2 (sabbie – da sabbie pulite a sabbie limose). Mentre i sedimenti fini ricadono sia nel campo B che nel campo C.

Cedimenti post-sismici in terreni granulari

Nei sedimenti saturi a comportamento granulare, in particolare, si è proceduto alla stima automatica dei cedimenti utilizzando la recente procedura di Robertson (2009).

L'approccio si basa sulla valutazione delle deformazioni volumetriche post-cicliche e calcola i cedimenti sulla base dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione FL calcolato (se $< 1,25$) e sulla base degli esiti di densità relativa D_r desunti dalle resistenze di punta (q_{c1N})_{cs}, in accordo con le correlazioni per le stime dei cedimenti di post-liquefazione nelle sabbie sature da prove CPT proposte da Zhang et Al. (2007).

I risultati cumulativi dei cedimenti indotti da sisma sono anch'essi stati calcolati attraverso il software Cliq v. 1.7.5.27 della Geologismiki Geotechnical Software e riportati graficamente in allegato: in sintesi, si sono ottenuti valori di cedimento pari a **0,201cm (Prova CPTU1)** e **0,755cm (Prova CPTU2)**, la cui compatibilità è da valutare con le opere in progetto.

Cedimenti post-sismici in terreni coesivi

Nel presente capitolo viene fatta una stima dei cosiddetti cedimenti post-sismici, ossia dei cedimenti permanenti di riconsolidazione conseguenti ad un terremoto.

Un'azione dinamica, quale quella dovuta a un evento sismico, può produrre in terreni molli (terreni coesivi) o poco addensati (terreni granulari) un riordino dello scheletro solido che si traduce in un addensamento e quindi in una consolidazione, determinando così un cedimento, denominato appunto “cedimento post-sismico”.

Il cedimento post-sismico:

- è conseguente alla dissipazione delle pressioni interstiziali (pressioni neutre) che si possono accumulare durante un terremoto (la dissipazione di tali pressioni neutre può generare dei cedimenti permanenti anche se non si raggiunge la condizione di liquefazione);
- può verificarsi sia in terreni granulari poco addensati e in presenza di falda ad una certa profondità dal piano campagna (generalmente a quote inferiori ai 15 metri da p.c.), sia in terreni coesivi soffici.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 50
--	--	---------

<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

La stima viene effettuata con riferimento a disposizioni normative e a metodi proposti da vari autori della letteratura scientifica che hanno analizzato il fenomeno.

A livello normativo la D.A.L. 112/2007 della Regione Emilia Romagna all'Allegato 3 fornisce le "Procedure di riferimento per le analisi di terzo livello di approfondimento"; la delibera stabilisce i criteri per una caratterizzazione sismica piuttosto spinta, quali la stima del potenziale di liquefazione, i cedimenti post-sismici in terreni granulari (saturi e non) e coesivi, l'identificazione dei pendii potenzialmente instabili.

Le procedure indicate dalla D.A.L. 112/2007 sono sostanzialmente identiche a quelle indicate nel documento "Indirizzi e criteri per la MICROZONAZIONE SISMICA – Parte I e Parte II" della Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile (Settembre 2008).

Nello studio in questione la stima dei cedimenti post-sismici è stata condotta con riferimento:

- alla procedura di cui all'Allegato 3 della D.A.L. 112/2007 della Regione Emilia Romagna per i terreni coesivi.

Per i sedimenti fini coesivi a comportamento coesivo (zone B e C), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche.

Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007), in cui le argille compressibili e soffici sono caratterizzati da valori della coesione non drenata < 70 kPa.

Nella letteratura scientifica si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%.

Inoltre, in riferimento al verificarsi di eventuali problematiche legate alla compressibilità dei livelli coesivi superficiali, argillosi e argilloso-limosi, caratterizzati da permeabilità da molto bassa a praticamente nulla, si fa notare come la dissipazione delle pressioni interstiziali indotte dal passaggio dell'onda sismica, avvenga in tempi sicuramente più lunghi rispetto alla breve durata di un sisma.

Tuttavia, essendo presenti tra i terreni superficiali di natura coesiva livelli di consistenza da soffice a plastica, moderatamente compressibili se ritenuto opportuno produrre una valutazione dei cedimenti post sismici nei terreni coesivi saturi compresi fra $-1,00$ m di quota e $-11,00$ m; per uno spessore complessivo di 1000 cm.

A tale scopo è stata utilizzata la seguente formula (DAL 112/2007):

$$\Delta H = \varepsilon_{VR} * H$$

dove: H = altezza dello strato;

ε_{VR} (%) = deformazione volumetrica post-ciclica, calcolabile nel seguente modo:

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 51
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

$$\varepsilon_{vr} = \frac{\alpha C_r}{1 + e_0} \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0}} \right)$$

dove:

α = costante sperimentale in prima approssimazione uguale a 1,25 – valore medio tra 1,0 e 1,50;

C_r = indice di riconsolidazione post-ciclica = 0,225 * C_c ;

C_c = indice di compressione ottenuto mediante la relazione (Righi e Marchi) $C_c = 1,33/(qc/fs) + 0,067$;

e_0 = indice dei vuoti iniziale;

$\Delta u/\sigma'_0$ = rapporto di pressione interstiziale.

Nei calcoli sono stati assunti valori prudenziali ricavati dalla letteratura geotecnica. In particolare è stato posto:

$C_c = 0,162$;

$C_r = 0,0364$;

$e_0 = 1,50$ – indice dei vuoti e_0 in base ai dati di letteratura, viene assunto in via cautelativa, pari a 1,50 con $c_u > 50$ kPa e pari a 2,0 per depositi più soffici con $c_u < 50$ kPa;

$\gamma_{max} = 0,000766$ valore ricavato dalla formula:

$$\gamma_{max} = 0,65 \frac{a_{max,s}}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

$a_{max} = 0,207g$;

$\sigma_v = 1,11$ kg/cmq – tensione verticale nella sezione media dello strato ($\sigma_v = \gamma_t \cdot z$ assumendo $\gamma_t = 1850$ kg/mc e $z = 6,00$ metri);

$r_d = 0,91$ – valore determinato dalla quota media dello strato ($r_d = 1 - 0,015z$ alla quota $z = 6,00$ metri);

$G = 180$ kg/cmq – valore stimato in base alla Tabella 3 dell'Allegato 3 della D.L. 112/2007; $G/G_0 = 0,50$ con $G_0 = 350$ kg/cmq desunto dalle indagini sismiche;

Tabella 3 – Fattore di riduzione del modulo di taglio G nei primi 20 m in funzione dell'accelerazione $a_{max,s}$	
$a_{max,s}$ [g]	G/G_0
0.10	0.80
0.20	0.50
0.30	0.35
0.40	0.28

$\Delta u/\sigma'_0 = 0,18$ - valutato con riferimento all'abaco della figura successiva in base al valore di γ_{max} .

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 52
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

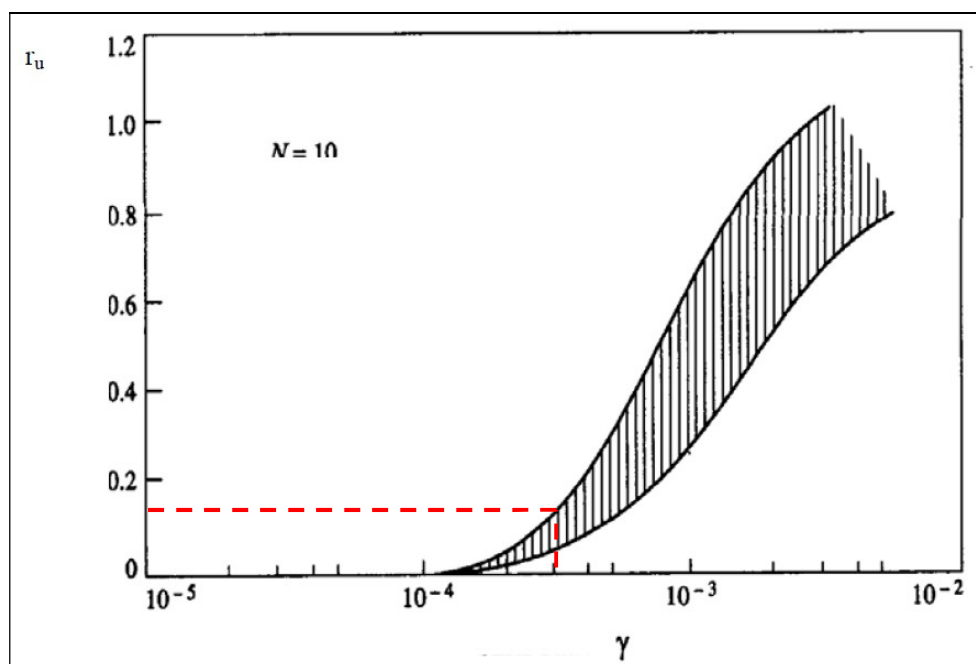


Fig. 18: Valore del rapporto di pressione interstiziale r_u in funzione della deformazione di taglio massima indotta dal terremoto γ_{max}

In base alle considerazioni e alle elaborazioni risulta:

TABELLA CEDIMENTI PERMANENTI POST-SISMICI – TERRENI COESIVI

Spessore strato [cm]	C_r	e_0	$\Delta u / \sigma'_0$	$\varepsilon_{VR} (\%)$	ΔH [cm]
1000	0,0364	1,50	0,18	0,0014	1,40

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 53
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

8 CONCLUSIONI

Si riepiloga quanto esposto nella presente relazione riguardante le indagini geofisiche per la definizione del modello sismico del sottosuolo a supporto del progetto dei lavori di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Viale Zonta in Comune di Suzzara (MN).

Le indagini effettuate sono consistite in due prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU1 e CPTU2) ed una prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT3), spinte alla profondità di 20,00 metri dal p.c.; in una prova geofisica al suolo con rilievo dei microtremori secondo il metodo di Nakamura (HVSRI), associata ad un'indagine MASW ed un'indagine REMI.

In generale è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- dal punto di vista della risposta sismica, il rilievo dei microtremori con il metodo di Nakamura ha posto in luce, nell'intero sito, la presenza di un intervallo di frequenza al suolo compresa **0,60 e 0,80 Hz** (HVSRI) (Periodo 1,66 e 1,25 sec) e **0,70 e 0,90 Hz** (HVSRI2) (Periodo 1,42 e 1,11 sec), nel quale è possibile l'insorgere di fenomeni di doppia risonanza struttura-terreno.

Il report dell'indagine geofisica, allegati in calce alla presente relazione, evidenzia che per il sito indagato sono sempre stati rispettati i criteri di acquisizione per l'ottenimento di una curva H/V affidabile, secondo la check-list proposta dalla procedura SESAME;

- dalla ricostruzione del quadro geofisico emerso dal seguente studio, si ritiene opportuno inserire il sito in oggetto di studio nella **Categoria C** *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 e 360 m/s”*

- gli effetti topografici possono essere trascurati in quanto il sito è ubicato in una ampia area pianeggiante e può essere classificata come appartenente alla **categoria T1** - *superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$* ; per tale categoria si assume quale valore del coefficiente di amplificazione topografica $S_T = 1,0$;

- nello studio di III° livello elaborato nella presente relazione, sono stati adottati i seguenti parametri di ingresso:

Vita Nominale V_N : 50 anni;

Classe d'uso: III; Coefficiente d'uso c_u : 1,500;

Vita di riferimento V_R : 75 anni (Tr allo SLV pari a 712 anni e allo SLD pari a 75 anni);

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 54
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

- sulla base di quanto emerso dallo stesso studio di III° livello elaborato nella presente relazione, i risultati per lo **SLV** evidenziano un valore massimo dell'accelerazione di picco pari a **0,207 g (input 642xa)** e il valore medio a **0,162 g** che, se confrontati all'accelerazione di riferimento al bedrock (**0,107g**), producono un fattore di amplificazione rispettivamente pari a **FA_{MAX} = 1,93** e **FA_{MEDIO} = 1,51**.

Tenuto conto dell'accelerazione al suolo di riferimento pari a 0,107g (derivato dalle coordinate del luogo di studio), del coefficiente di amplificazione stratigrafico (1,93 da analisi di III° Livello) e del coefficiente topografico (1,0), **l'accelerazione alla sommità del deposito** (o accelerazione massima orizzontale al suolo) **allo SLV** risulta:

$$a_{MAX(g)} = 0,107 * 1,93 * 1,00 = 0,207g$$

- sulla base di quanto emerso dallo stesso studio di III° livello elaborato nella presente relazione i risultati per lo **SLD** il valore massimo dell'accelerazione di picco è pari a **0,092 g (input 467ya)** e il valore medio a **0,090 g** che, se confrontati all'accelerazione di riferimento al bedrock (**0,046g**), producono un fattore di amplificazione rispettivamente pari a **FA_{MAX} = 2,00** e **FA_{MEDIO} = 1,96**.

Tenuto conto dell'accelerazione al suolo di riferimento pari a 0,046g (derivato dalle coordinate del luogo di studio), del coefficiente di amplificazione stratigrafico (2,00 da analisi di III° Livello) e del coefficiente topografico (1,0), **l'accelerazione alla sommità del deposito** (o accelerazione massima orizzontale al suolo) **allo SLD** risulta:

$$a_{MAX(g)} = 0,046 * 2,00 * 1,00 = 0,092g$$

- la natura litologica dei depositi del sottosuolo unita alle caratteristiche meccaniche/geotecniche, limita ad un rischio basso la possibilità del verificarsi di fenomeni di liquefazione in presenza di eventi sismici, indicando un basso indice del potenziale di liquefazione, pur considerando la presenza di terreni sabbiosi limosi e sabbiosi nel sottosuolo;
- i valori calcolati dei **cedimenti post-sismici nei terreni granulari** sono risultati pari a **0,201cm (Prova CPTU1)** e **0,755cm (Prova CPTU2)**; mentre per i **terreni coesivi di consistenza soffice** sono risultati pari a **1,40cm**, rispetto ai quali dovrà essere accertata la compatibilità con gli interventi in progetto.

GEOLOGO
DANIELE DE TOGNI



GEOLOGO
FRANCESCO GABRIELLI



STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 55
--	--	---------

Titolo:	Data:
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

APPENDICE DOCUMENTALE

RISULTATI E CERTIFICATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE

TAV. 1 - Planimetria generale: ubicazione indagini in sito

Report indagine microtremori H/V

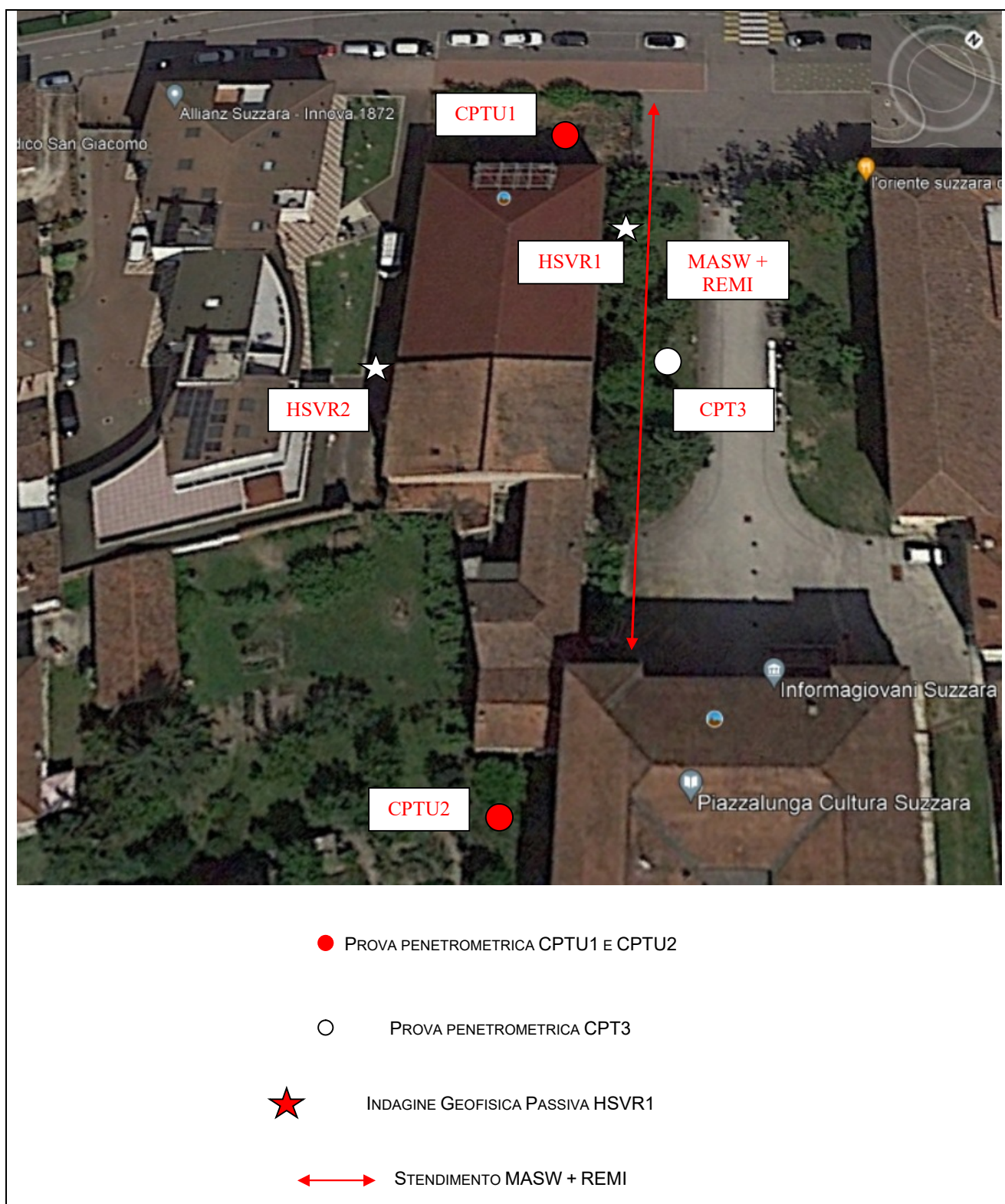
Report indagine sismica attiva MASW

Report indagine sismica passiva REMI

Verifica alla liquefazione Prove CPTU1 e CPTU2

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 56
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 57
--	--	---------

Titolo:	Data:
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

REPORT ANALISI MICROTREMORI HVSr1 E HVSr2

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 58
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

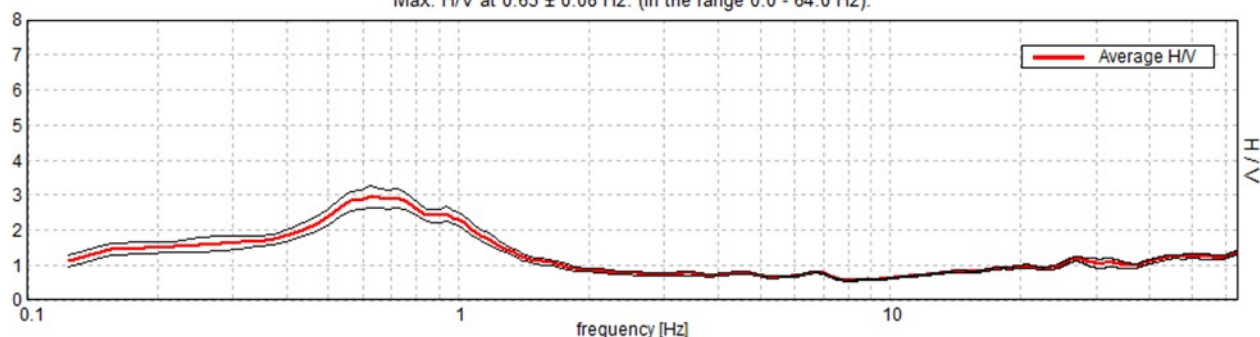
Comune di Suzzara (MN) – Teatro Guido – HVSR1 al suolo

Instrument: TE3-0085/01-14
 Data format: 32 byte
 Full scale [mV]: 51
 Start recording: 13/09/21 07:43:53 End recording: 13/09/21 08:13:53
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 GPS data not available

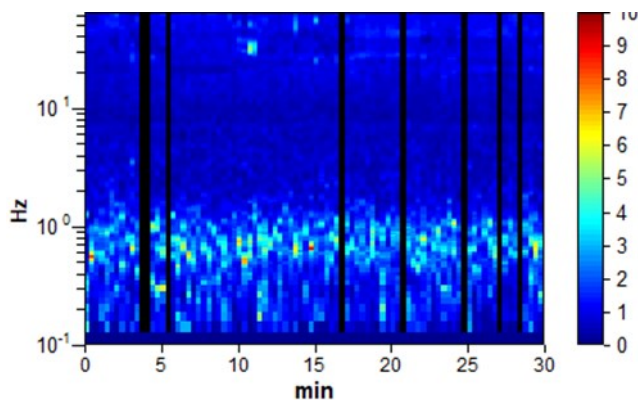
Trace length: 0h30'00". Analyzed 91% trace (manual window selection)
 Sampling rate: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing type: Triangular window
 Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

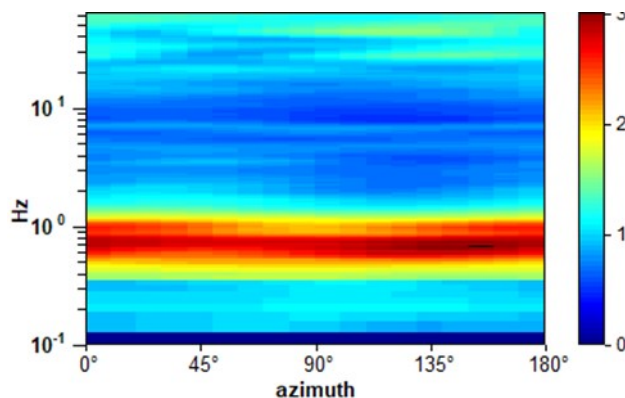
Max. H/V at 0.63 ± 0.08 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



H/V TIME HISTORY

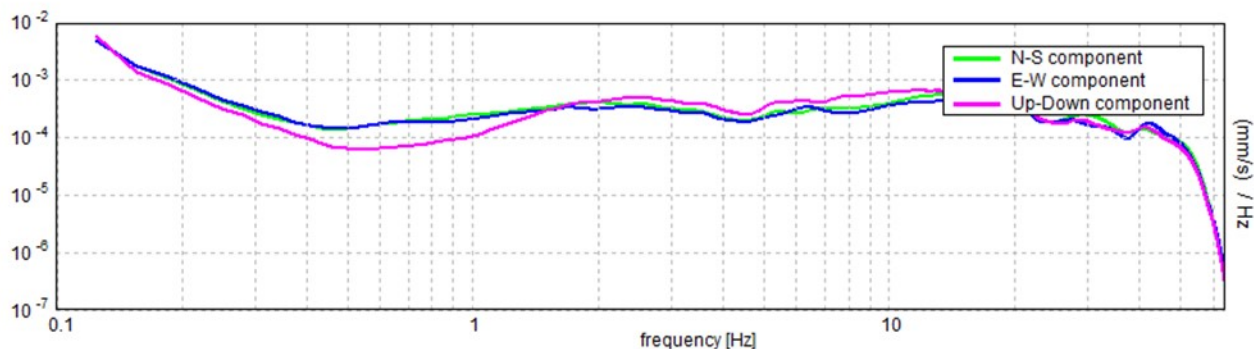


DIRECTIONAL H/V

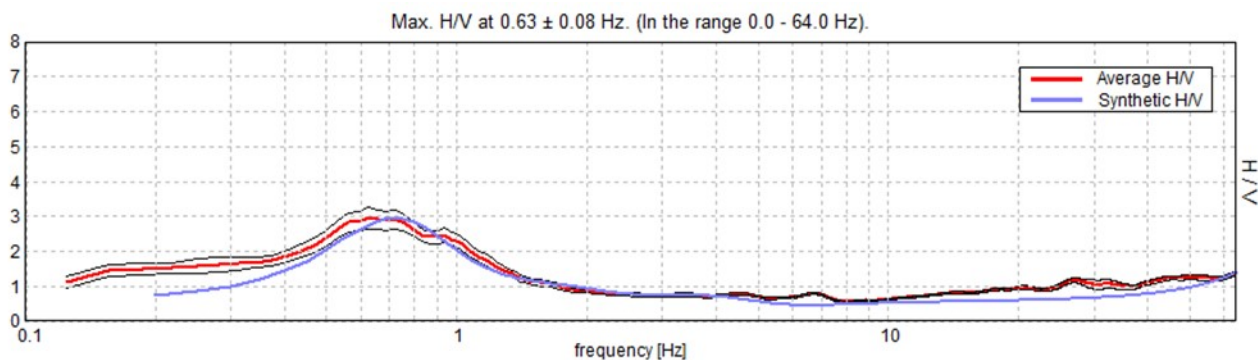


Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

SINGLE COMPONENT SPECTRA



EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V

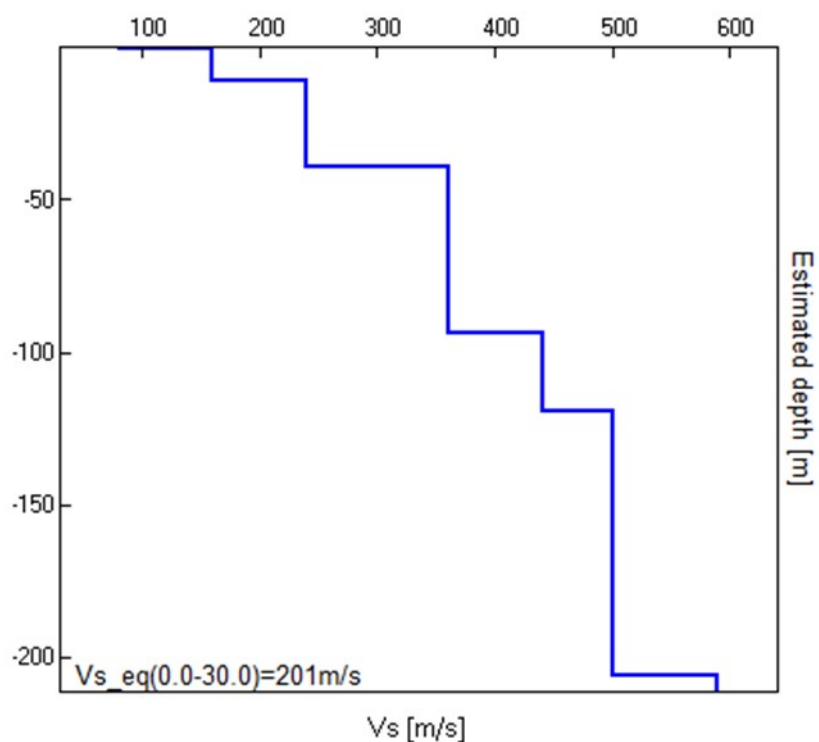


Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.20	0.20	80	0.42
11.00	10.80	160	0.42
39.00	28.00	240	0.42
94.00	55.00	360	0.42
119.00	25.00	440	0.42
206.00	87.00	500	0.42
inf.	inf.	590	0.42

$$V_{s_eq}(2.00-32.00)=208\text{m/s}$$

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 60
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 61
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]**

Max. H/V at 0.63 ± 0.08 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).
--

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.63 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1025.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 31 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.156 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.281 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.96 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.12469 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.07793 < 0.09375$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3113 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. range [Hz]	< 0.2	$0.2 - 0.5$	$0.5 - 1.0$	$1.0 - 2.0$	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 62
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Comune di Suzzara (MN) – Teatro Guido – HVSR2 al suolo

Instrument: TE3-0085/01-14

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 13/09/21 09:02:01 End recording: 13/09/21 09:22:01

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 92% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

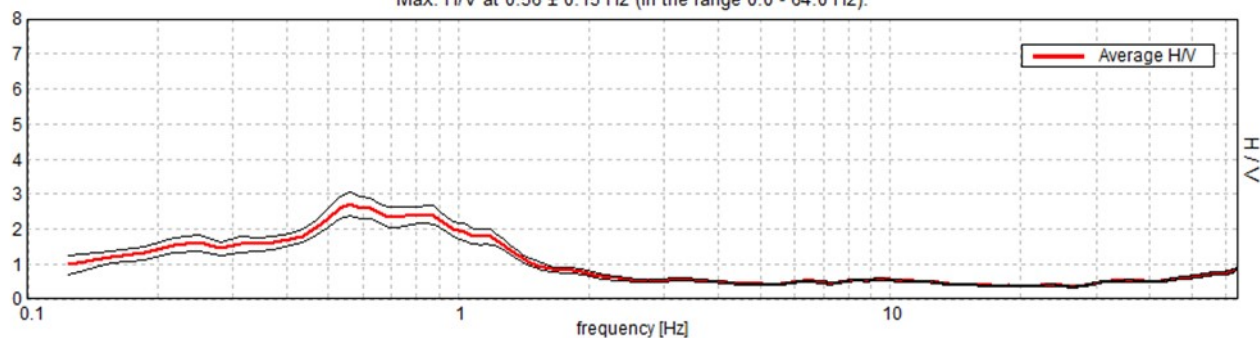
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

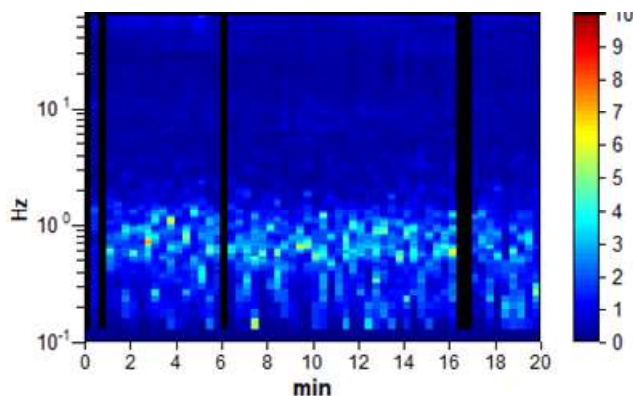
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

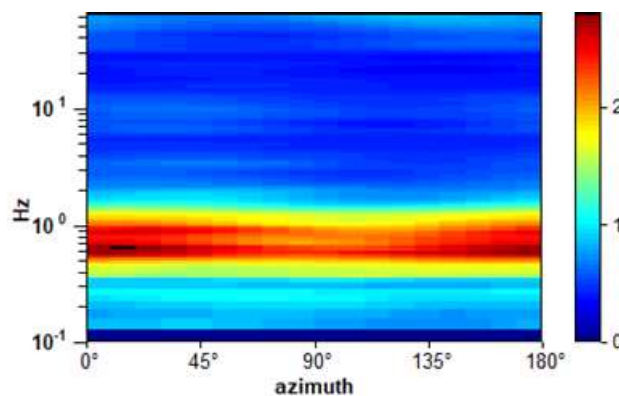
Max. H/V at 0.56 ± 0.15 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).



H/V TIME HISTORY

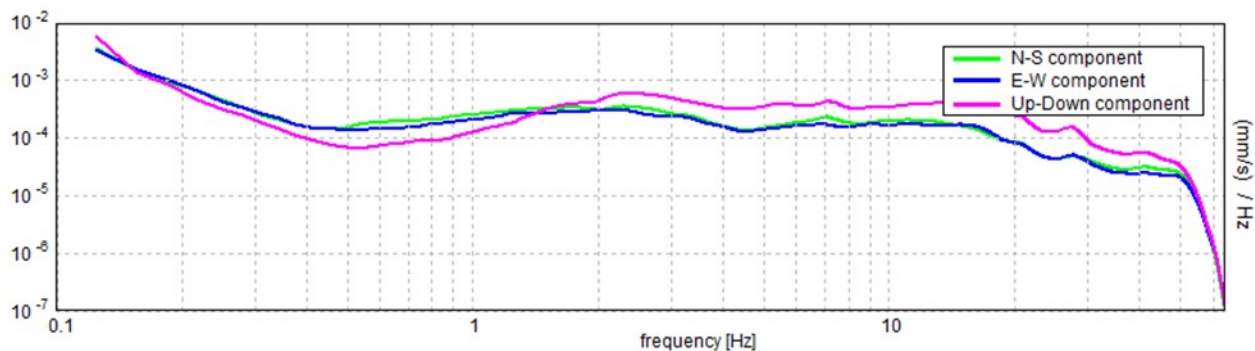


DIRECTIONAL H/V

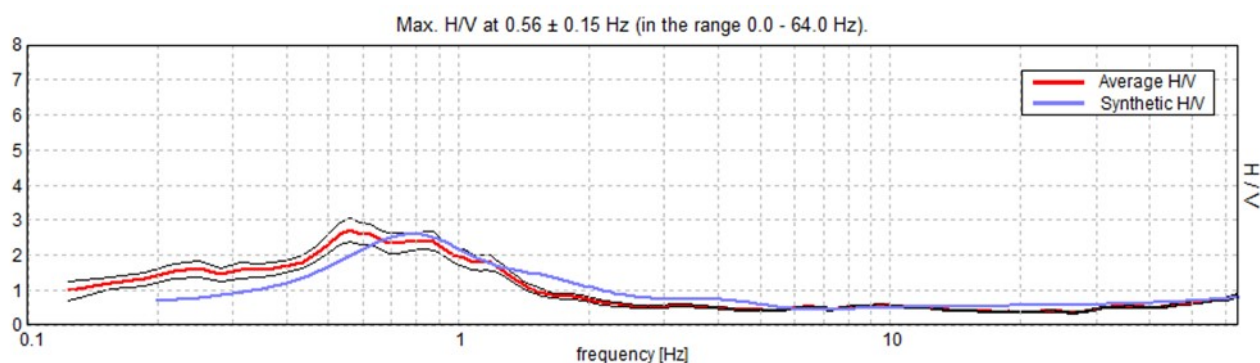


Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

SINGLE COMPONENT SPECTRA



EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V

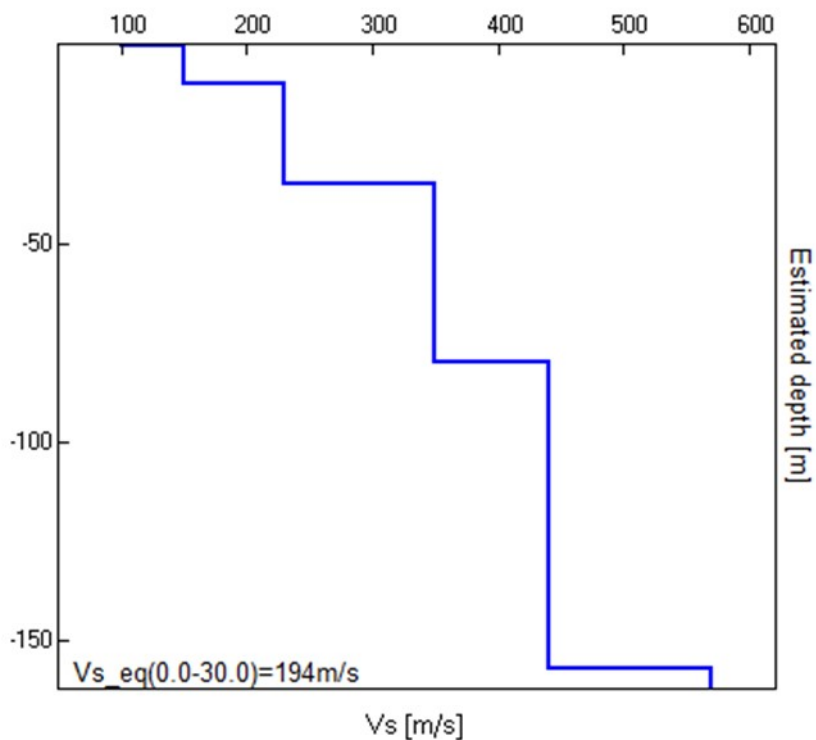


Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.20	0.20	100	0.42
10.00	9.80	150	0.42
35.00	25.00	230	0.42
80.00	45.00	350	0.42
157.00	77.00	440	0.42
inf.	inf.	570	0.42

$$V_{s_eq(2.00-32.0)}=201\text{m/s}$$

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 64
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**

Max. H/V at 0.56 ± 0.15 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).
--

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.56 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$618.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 28 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.188 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.344 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.70 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.27504 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.15471 < 0.08438$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3366 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. range [Hz]	< 0.2	$0.2 - 0.5$	$0.5 - 1.0$	$1.0 - 2.0$	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 66
--	--	---------

Titolo:	Data:
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

REPORT INDAGINE GEOFISICA MASW

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 67
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Comune di Suzzara (MN) – Teatro Guido – INDAGINE MASW

Start recording: 13/09/21 10:22:26 End recording: 13/09/21 10:24:12

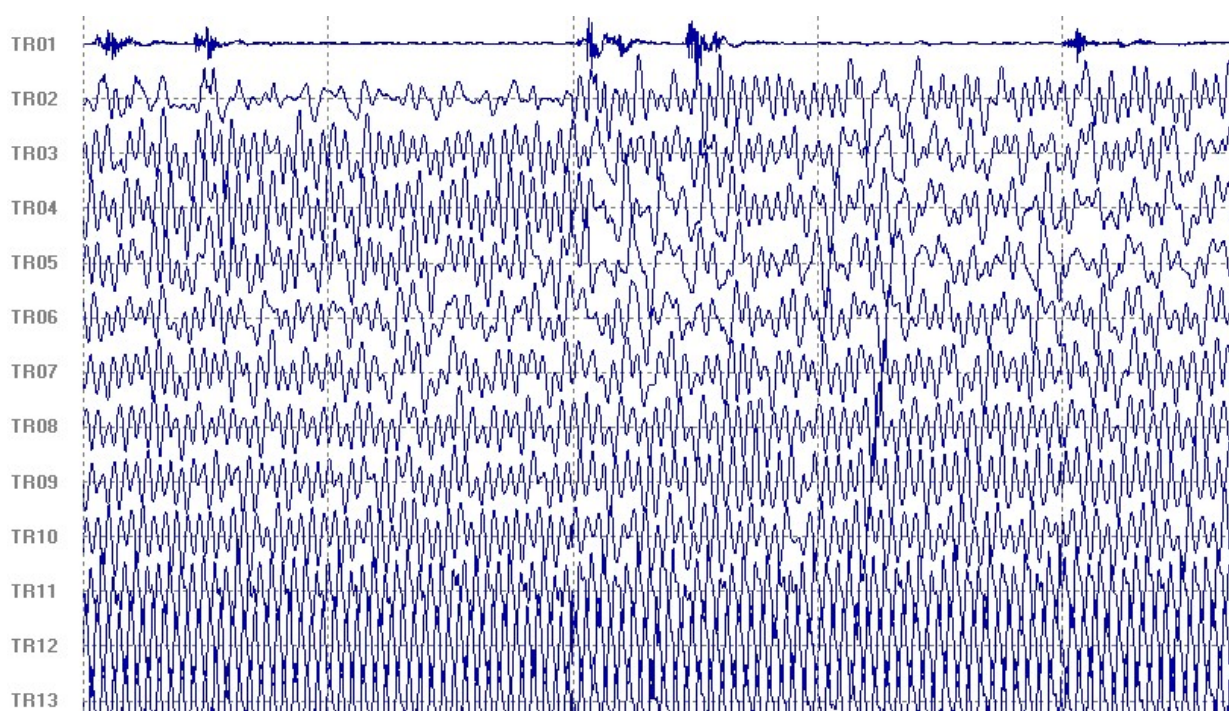
Trace length: 0h00'06".

Sampling rate: 512 Hz

Channel labels: TR01 +TR01 ; TR02 +TR02 ; TR03 +TR03 ; TR04 +TR04 ; TR05 +TR05 ; TR06 +TR06 ; TR07 +TR07 ; TR08 +TR08 ; TR09 +TR09 ; TR10 +TR10 ; TR11 +TR11 ; TR12 +TR12 ; TR13 +TR13 ; TR14 +TR14 ; TR15 +TR15 ; TR16 +TR16

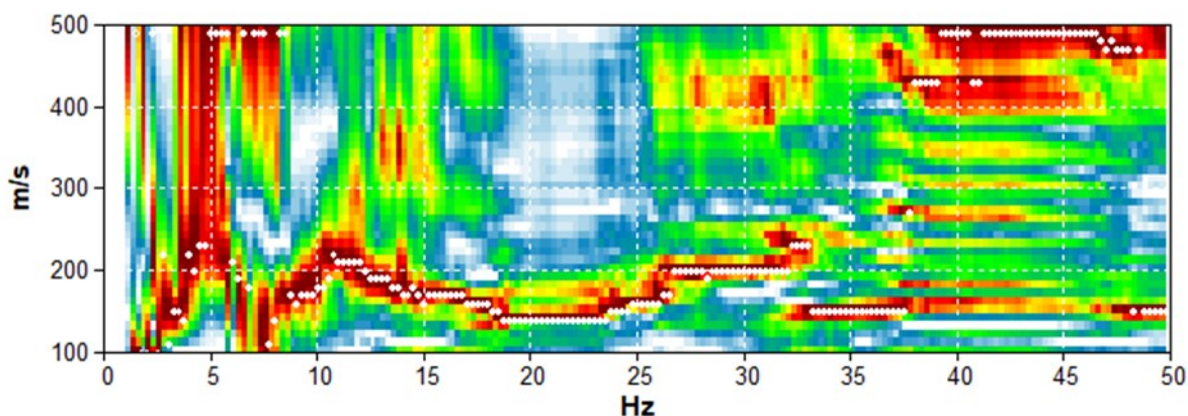
Array geometry (x): 0.0 4.0 8.0 12.0 16.0 20.0 24.0 28.0 32.0 36.0 40.0 44.0 48.0 52.0 56.0 60.0 m.

TRACCIA MASW

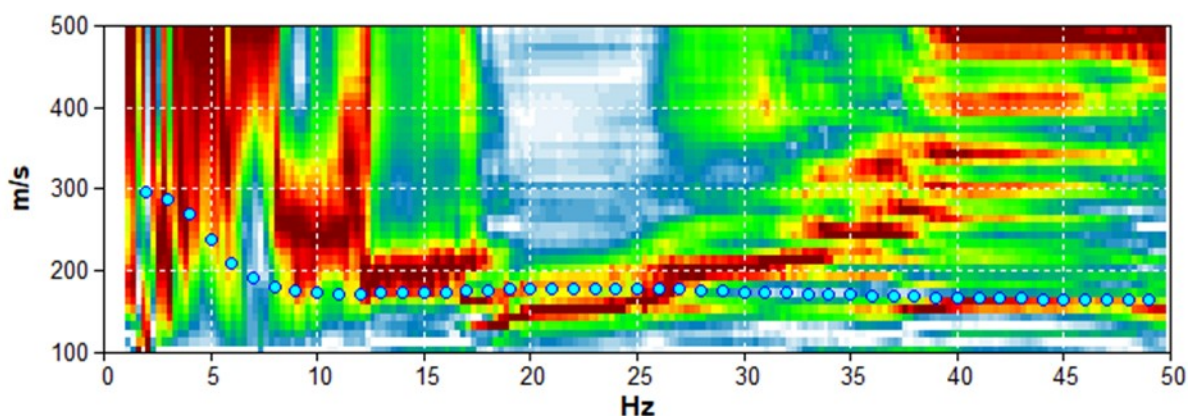


STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 68
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE

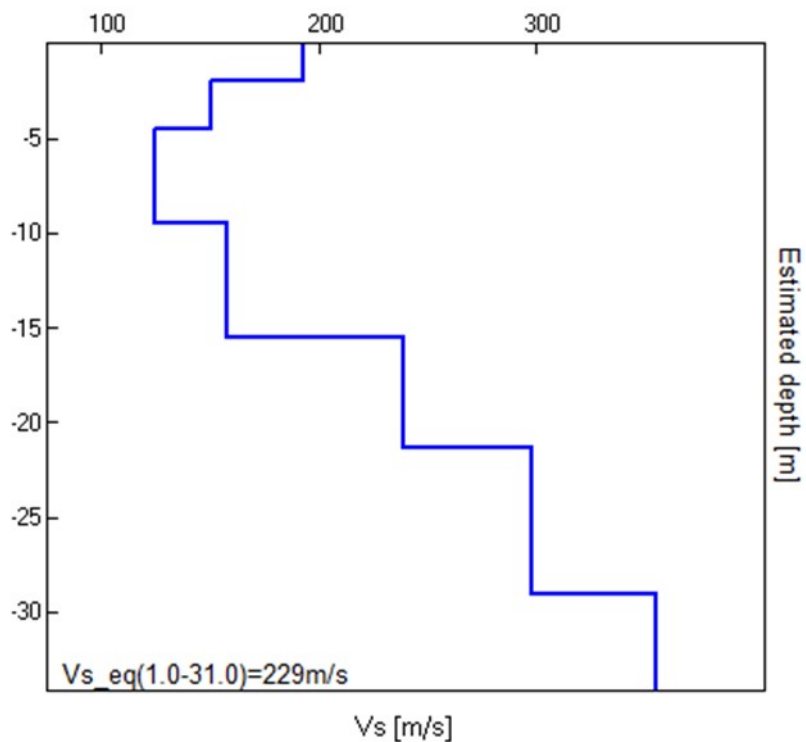


Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
1.70	1.70	250	0.42
3.10	1.40	203	0.42
7.20	4.10	155	0.42
10.30	3.10	173	0.42
17.30	7.00	229	0.42
25.10	7.80	278	0.42
inf.	inf.	330	0.42

$$V_{s_eq}(2.00-32.00)=258\text{m/s}$$

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 69
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021



STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 70
--	--	---------

Titolo:	Data:
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

REPORT INDAGINE GEOFISICA RE.MI.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 71
--	--	---------

Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Comune di Suzzara (MN) – Teatro Guido - Traccia REMI

Start recording: 13/09/21 10:09:44 End recording: 13/09/21 10:14:49

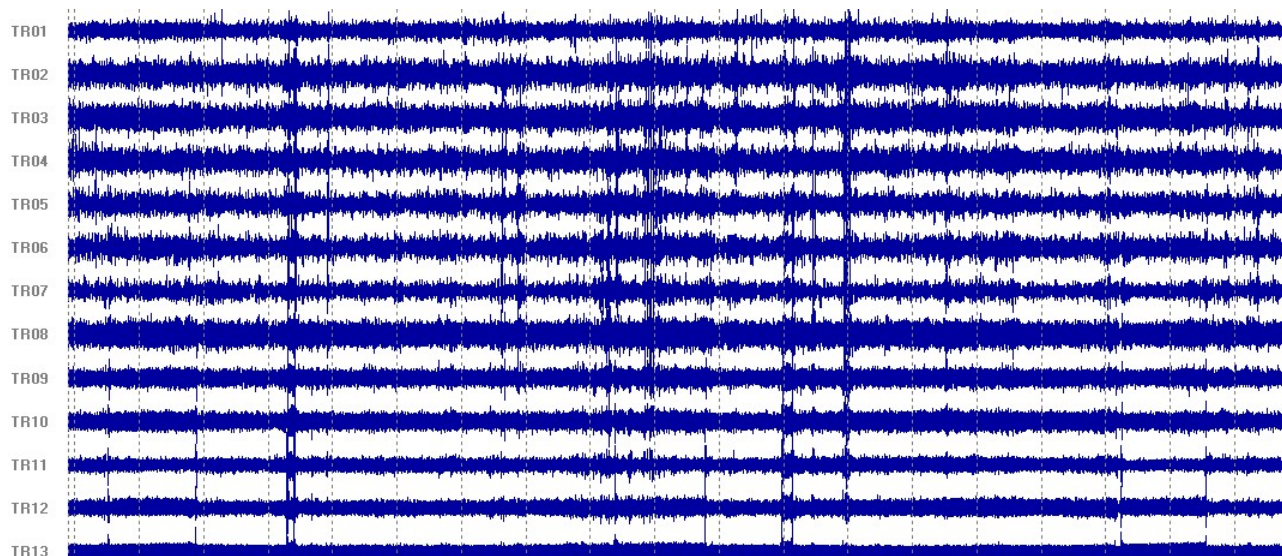
Trace length: 0h05'04".

Sampling rate: 256 Hz

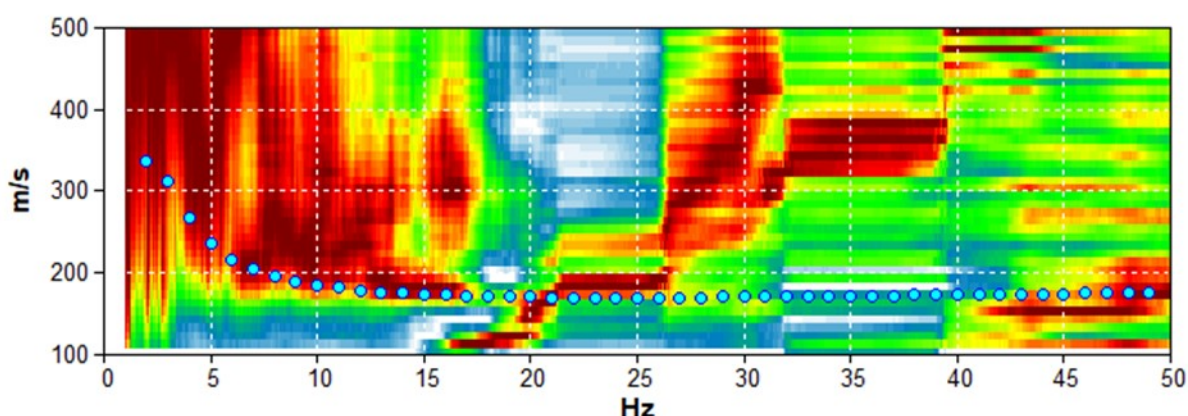
Channel labels: TR01 +TR01 ; TR02 +TR02 ; TR03 +TR03 ; TR04 +TR04 ; TR05 +TR05 ; TR06 +TR06 ; TR07 +TR07 ; TR08 +TR08 ; TR09 +TR09 ; TR10 +TR10 ; TR11 +TR11 ; TR12 +TR12 ; TR13 +TR13 ; TR14 +TR14 ; TR15 +TR15 ; TR16 +TR16

Array geometry (x): 0.0 4.0 8.0 12.0 16.0 20.0 24.0 28.0 32.0 36.0 40.0 44.0 48.0 52.0 56.0 60.0 m.

TRACCIA REMI



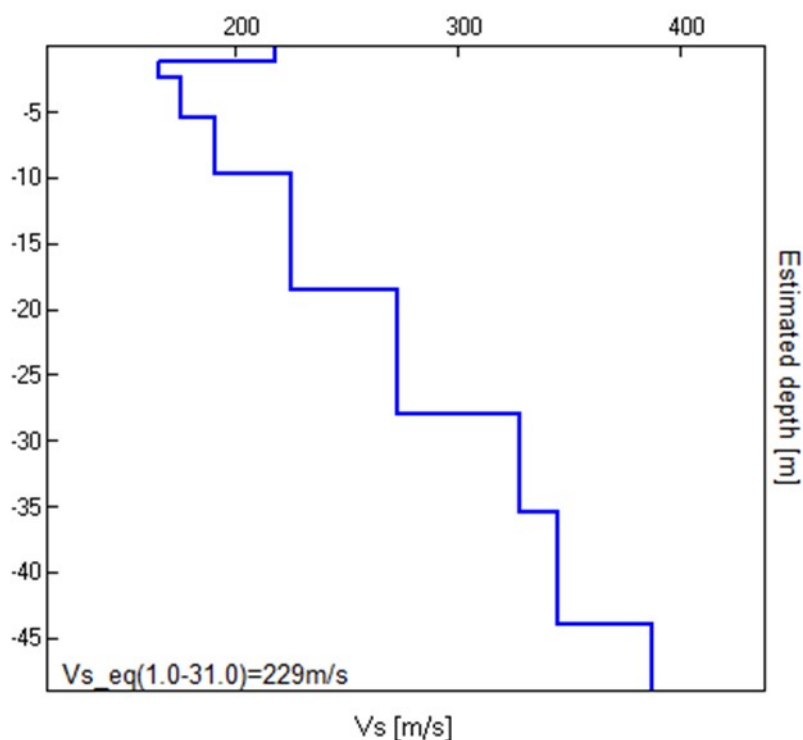
MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE



Titolo:	Data:
Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)	Ottobre 2021

Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
1.15	1.15	218	0.42
2.45	1.30	165	0.42
5.45	3.00	175	0.42
9.75	4.30	191	0.42
18.55	8.80	225	0.42
27.95	9.40	273	0.42
35.45	7.50	328	0.42
43.95	8.50	345	0.42
inf.	inf.	388	0.42

$V_{s_eq(2.0-32.0)} = 233 \text{ m/s}$



Titolo:	Data:
<i>Relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base, a supporto del progetto di realizzazione dell'intervento di restauro, rifunzionalizzazione e miglioramento sismico del Teatro Guido ubicato in Comune di Suzzara (MN)</i>	<i>Ottobre 2021</i>

VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE CPTU1 E CPTU2

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 335.577.1941 - 339.407.3066 E-mail: info@studiogds.com	COMUNE DI SUZZARA Piazza Castello n. 1 46029 - Suzzara (MN)	Pag. 74
--	--	---------

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

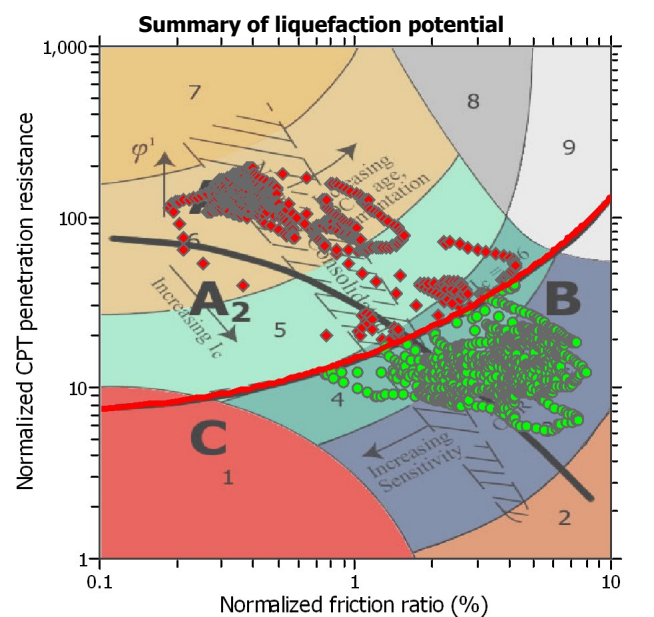
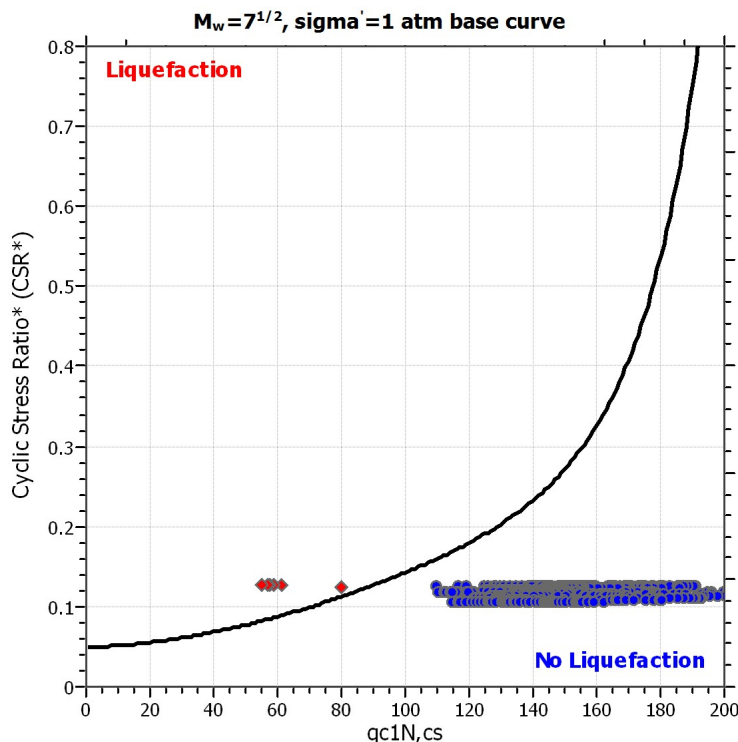
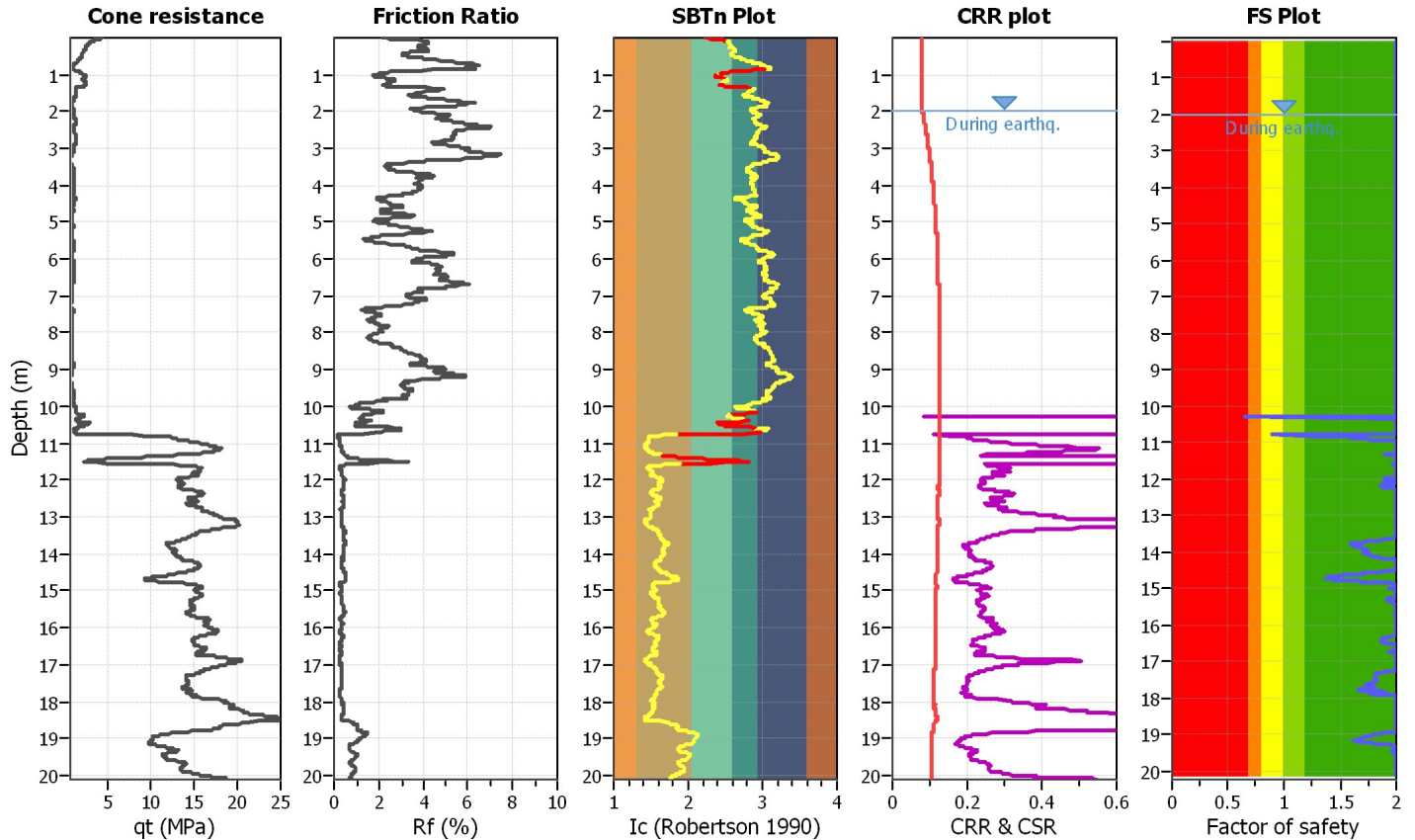
Project title : Comune di Suzzara

Location : Teatro Guido

CPT file : CPTU

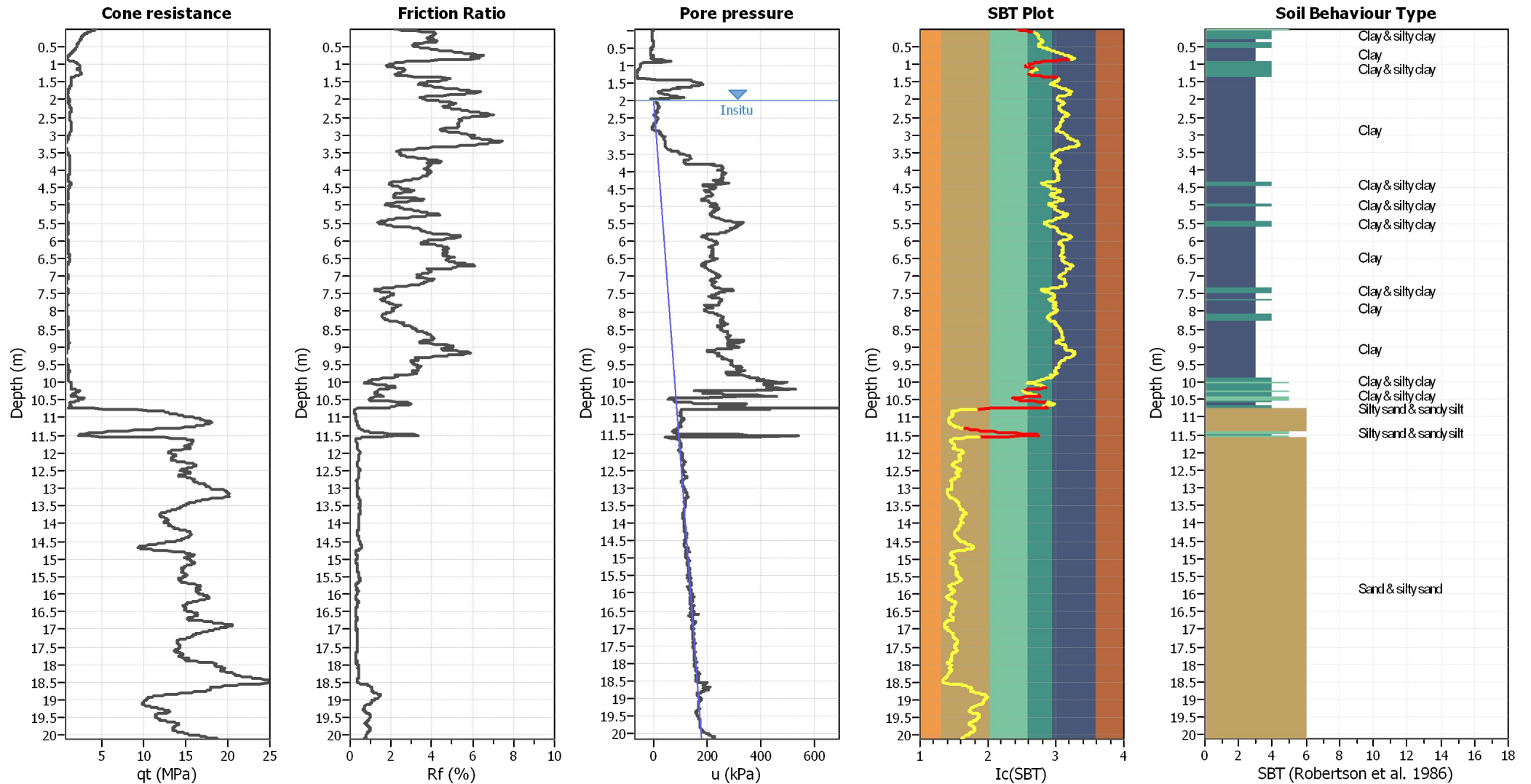
Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	I&B (2008)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude M_w :	5.95	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



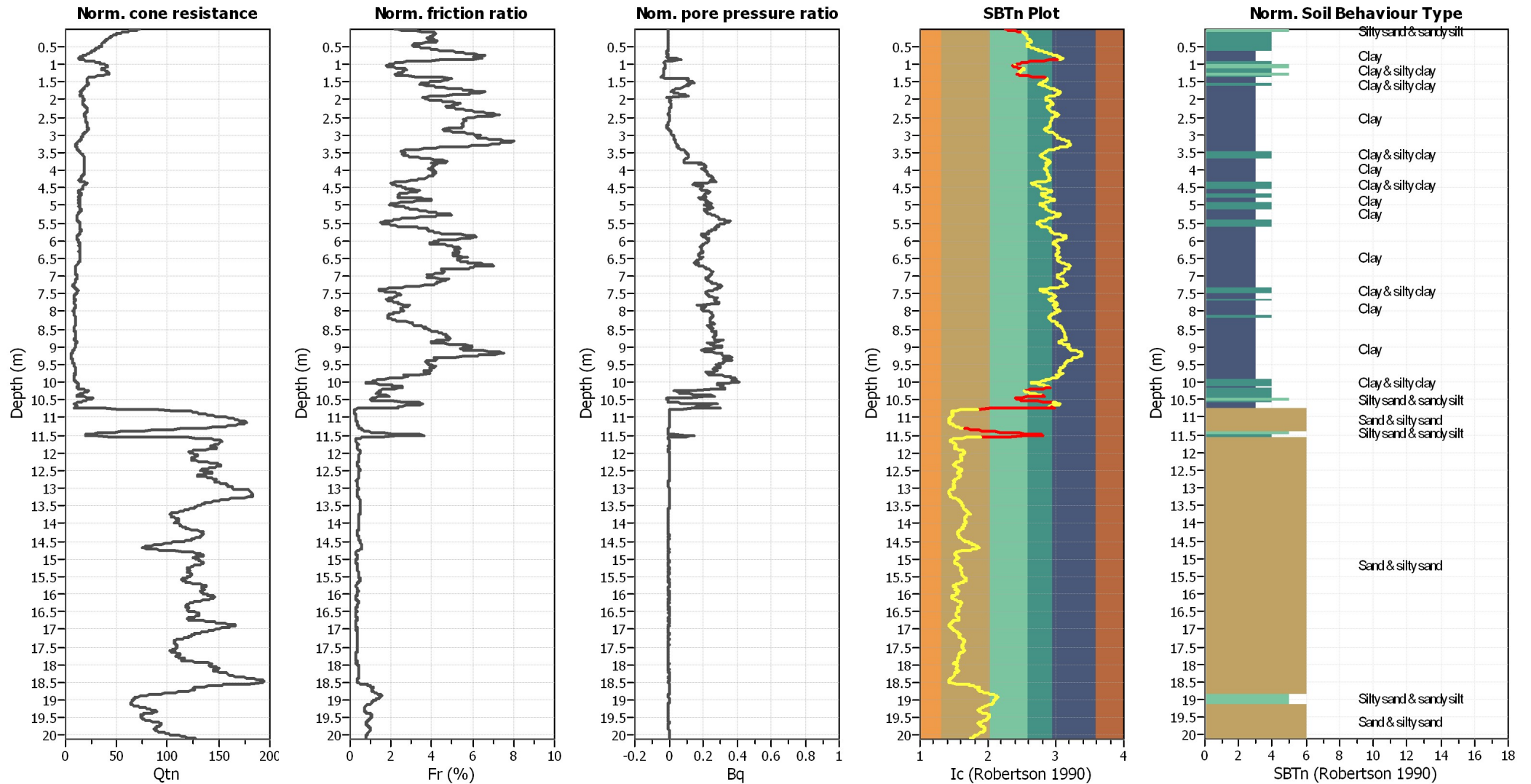
Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_G applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

SBT legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

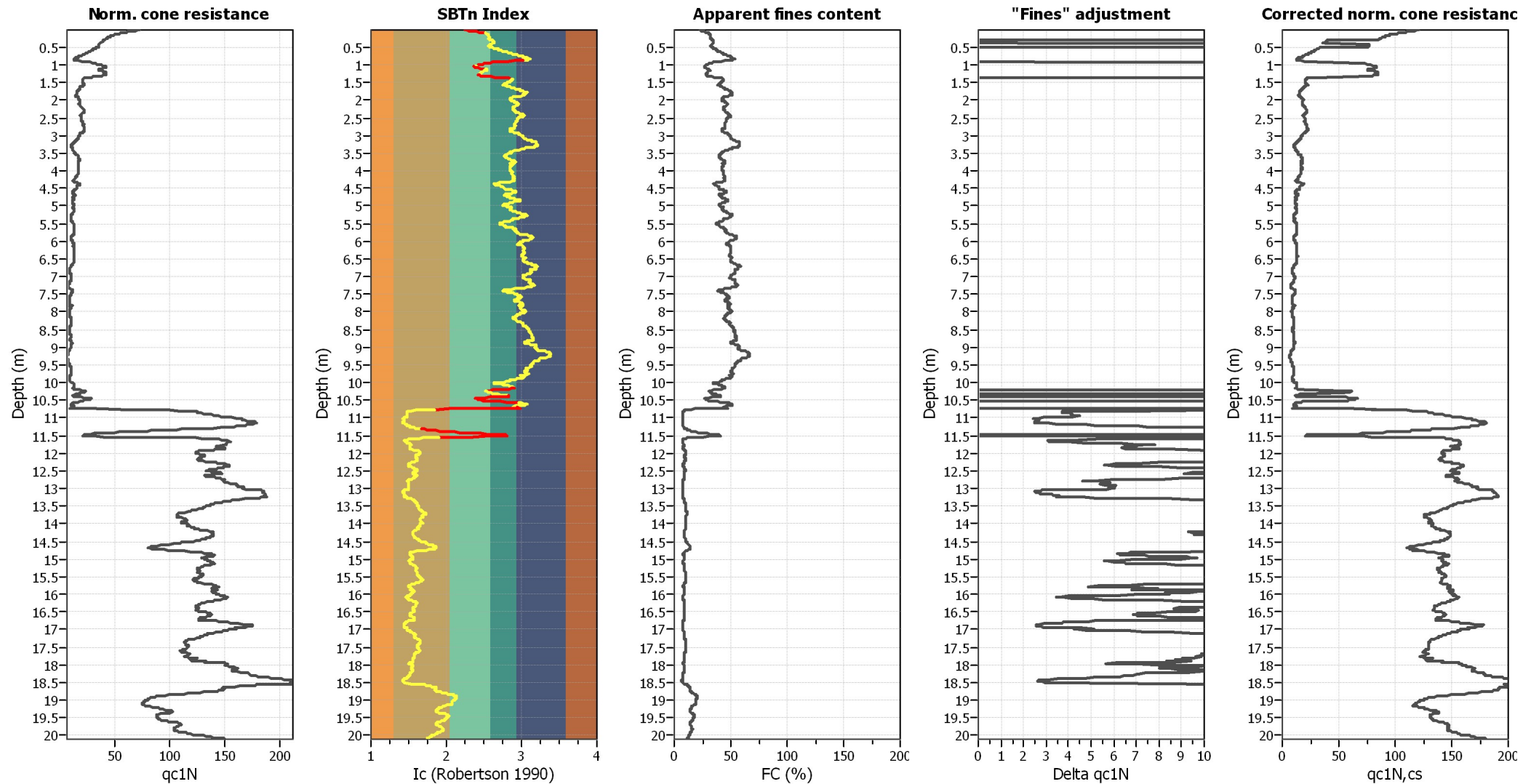
CPT basic interpretation plots (normalized)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _G applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

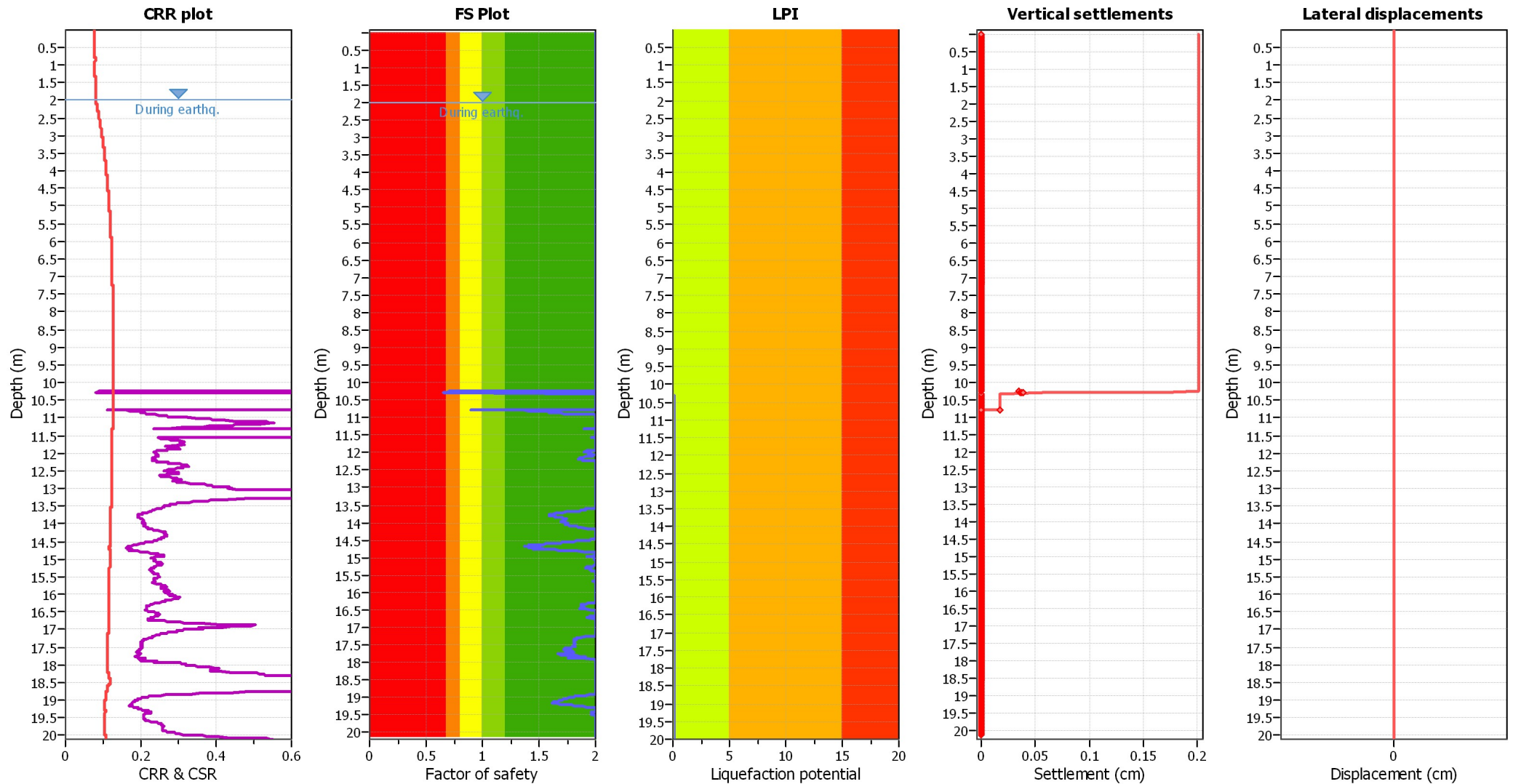
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _G applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _s applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

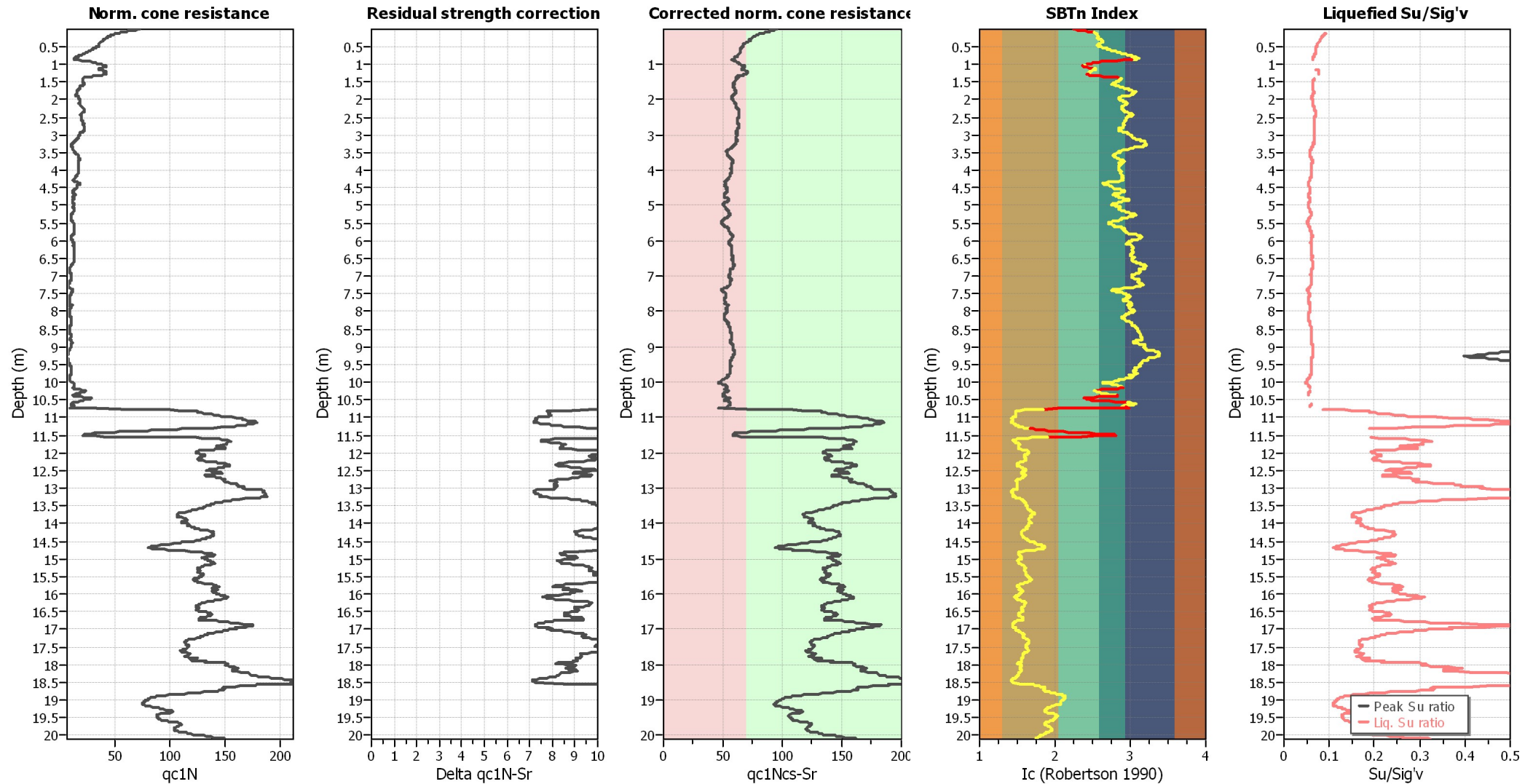
F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Check for strength loss plots (Idriss & Boulanger (2008))



Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _G applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

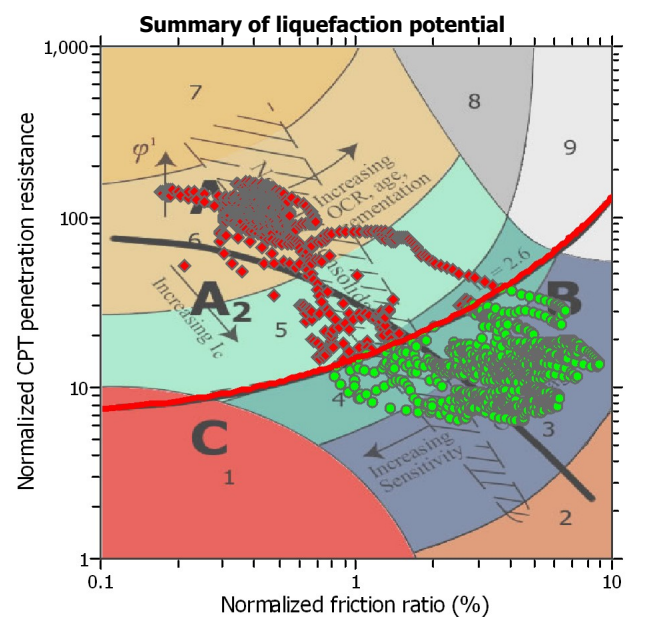
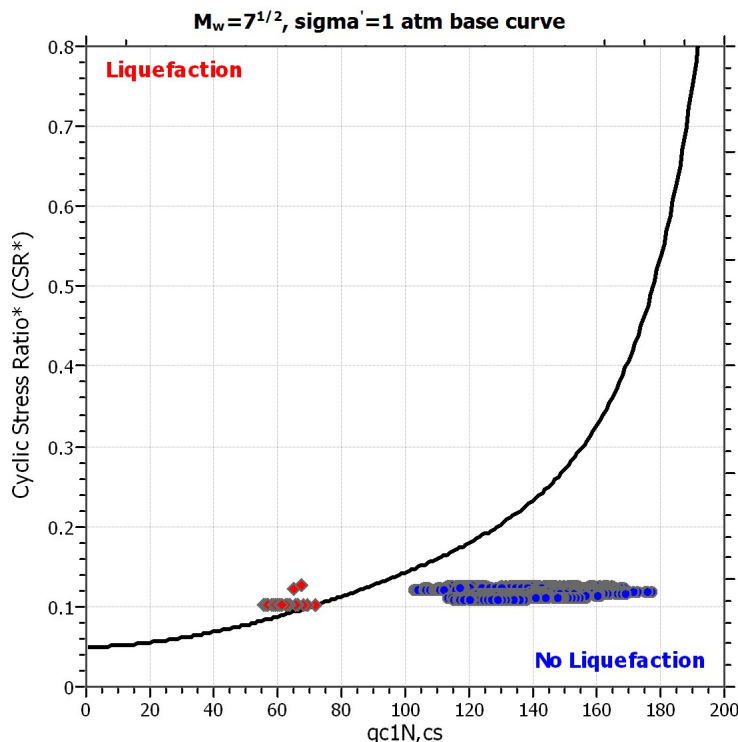
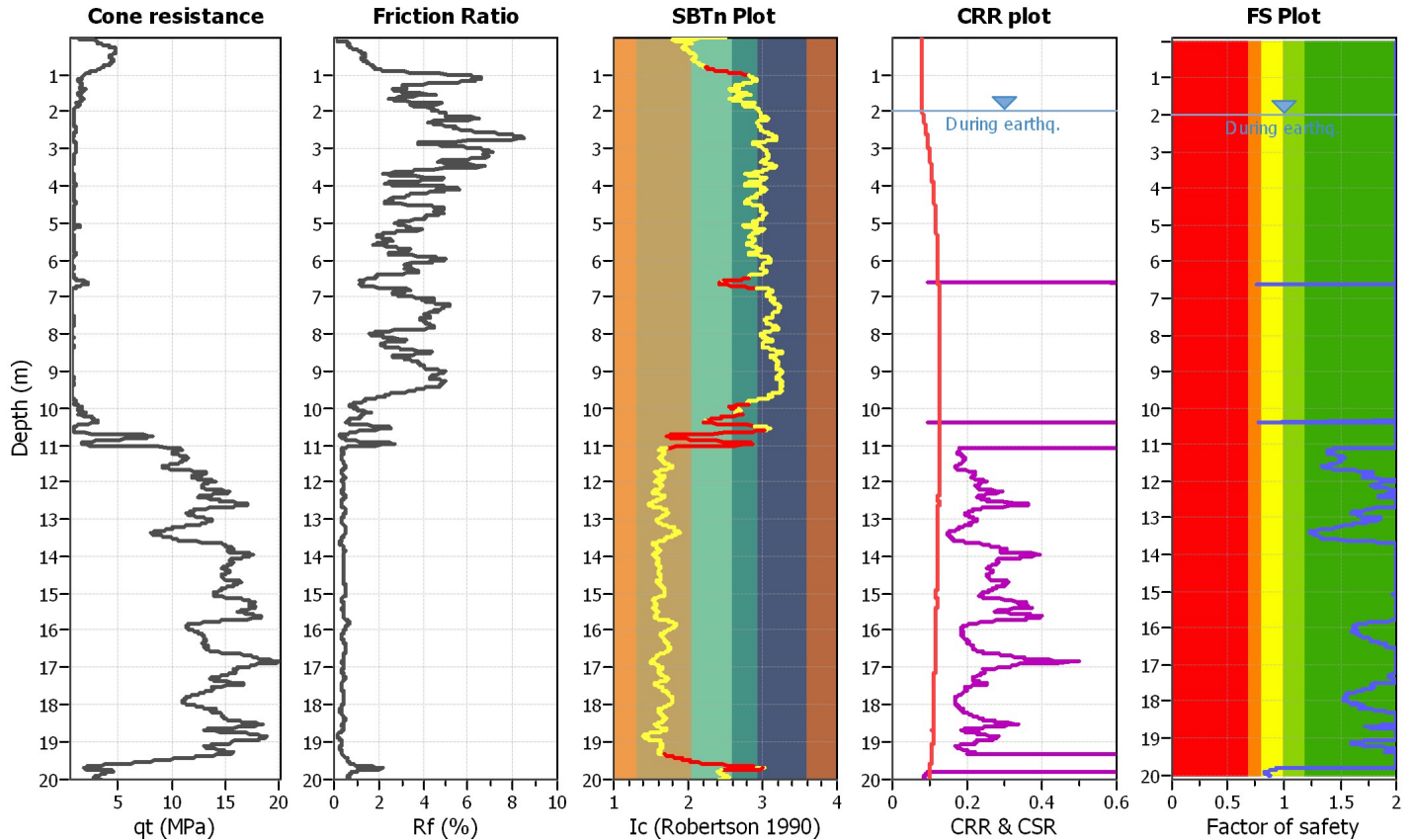
Project title : Comune di Suzzara

Location : Teatro Guido

CPT file : CPTU

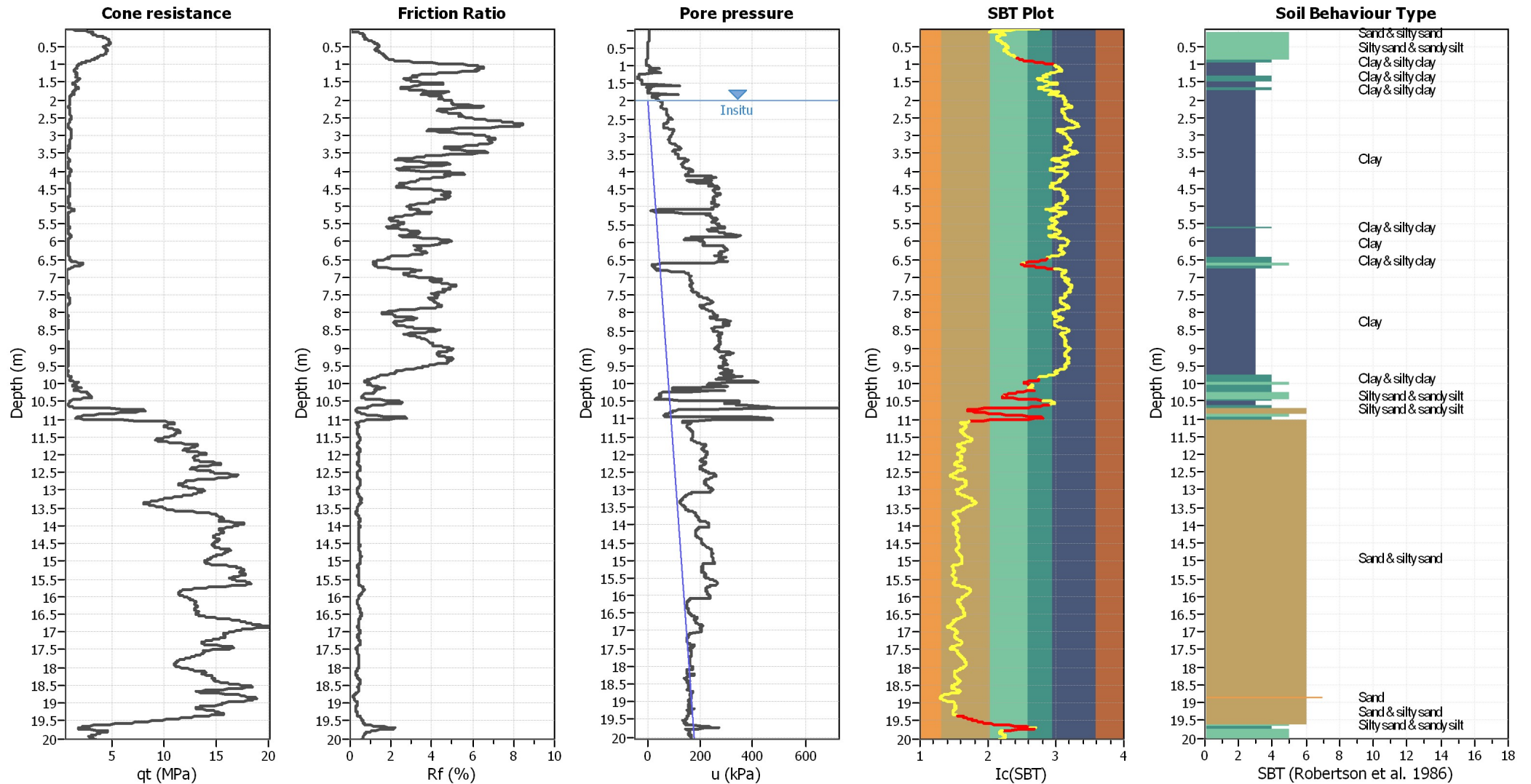
Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	I&B (2008)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude M_w :	5.95	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



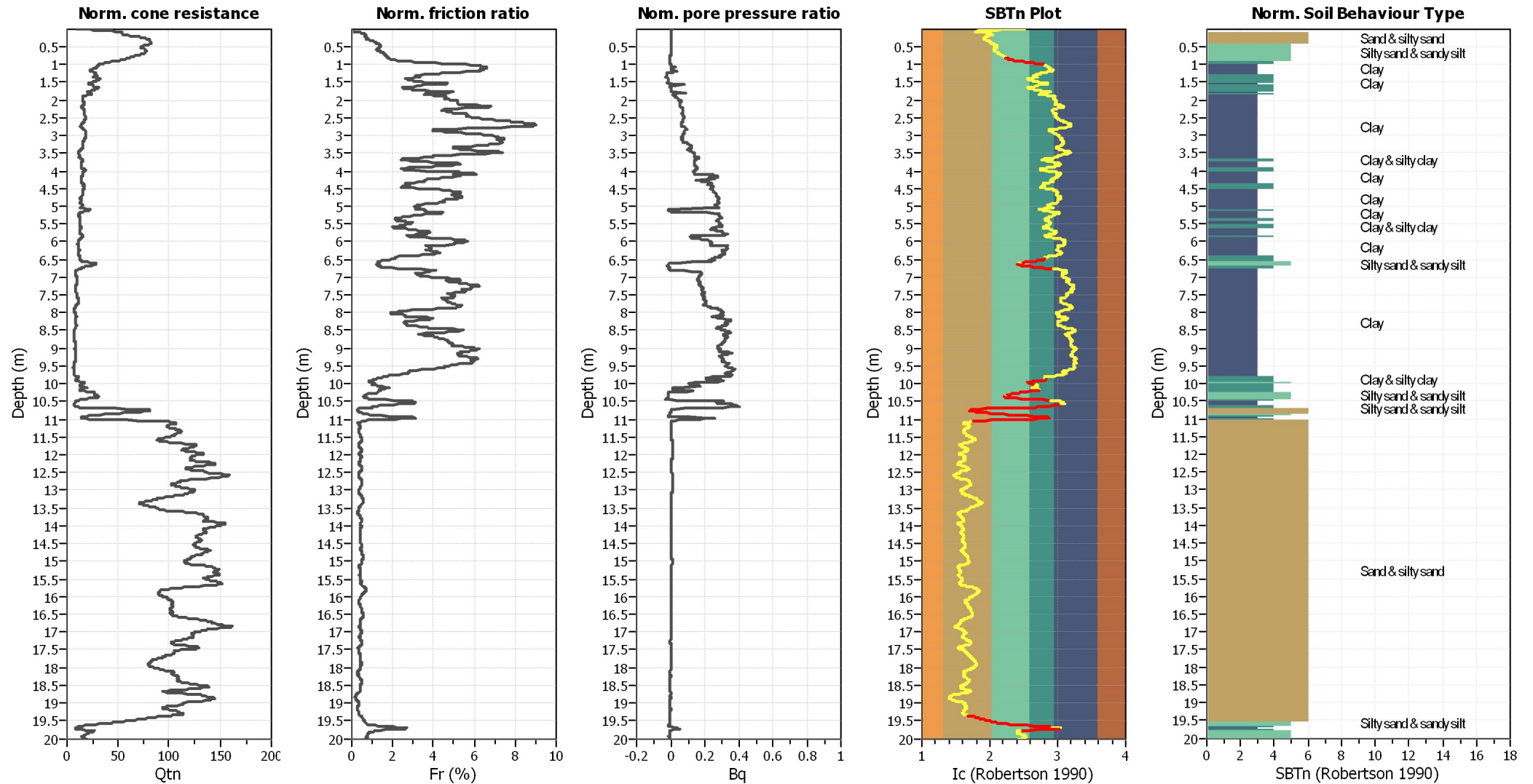
Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_G applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

SBT legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

CPT basic interpretation plots (normalized)



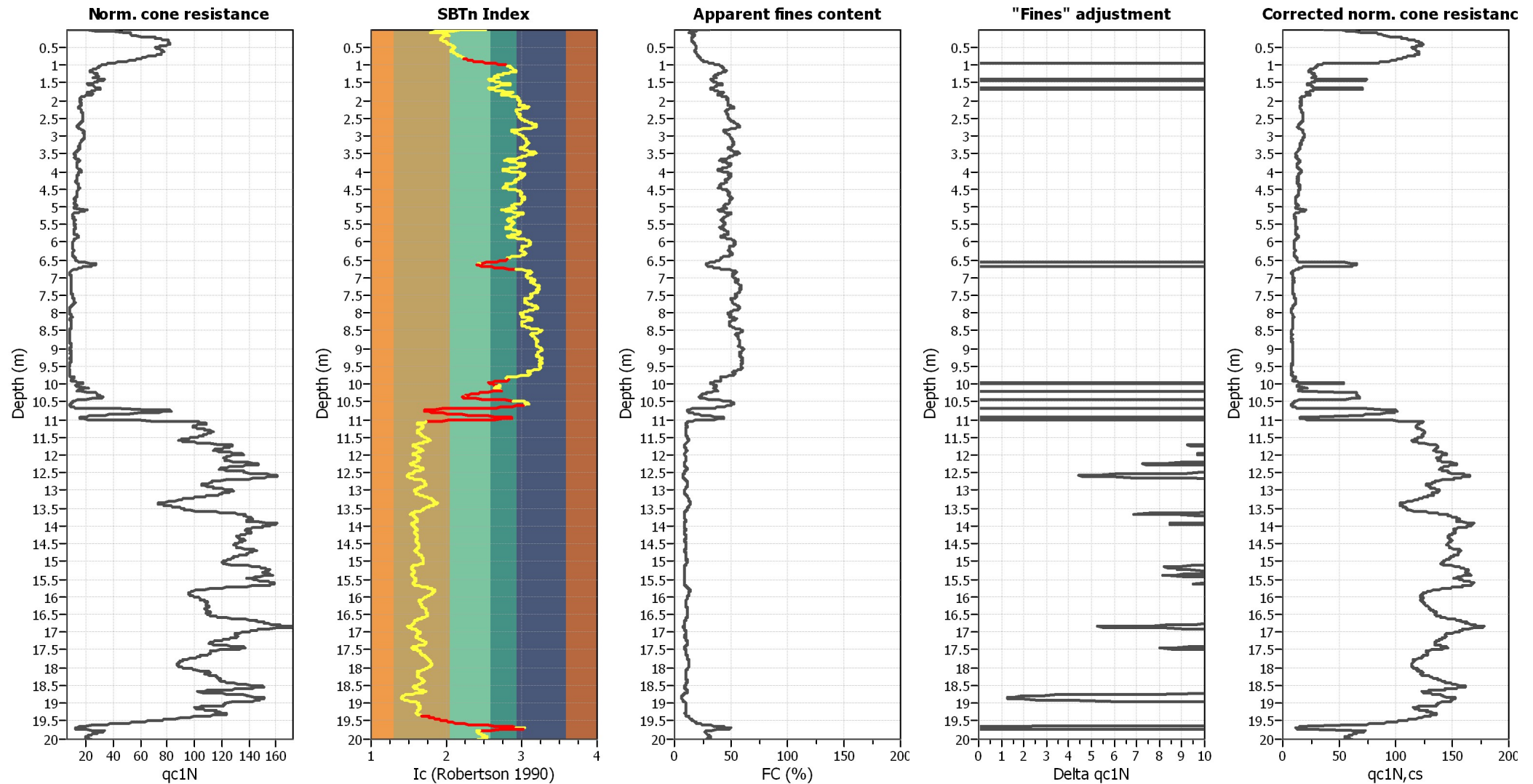
Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _G applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

SBTn legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

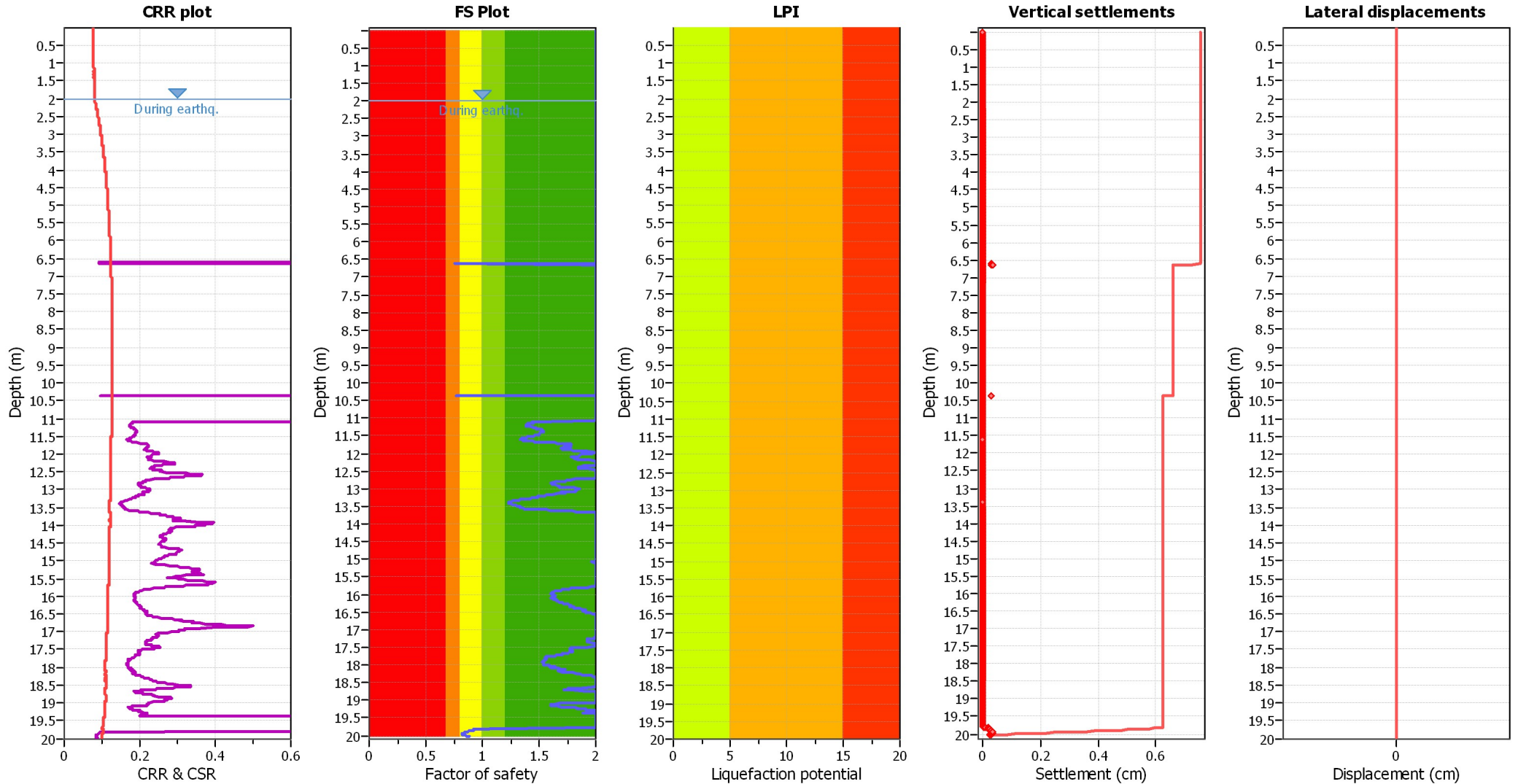
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _G applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _s applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

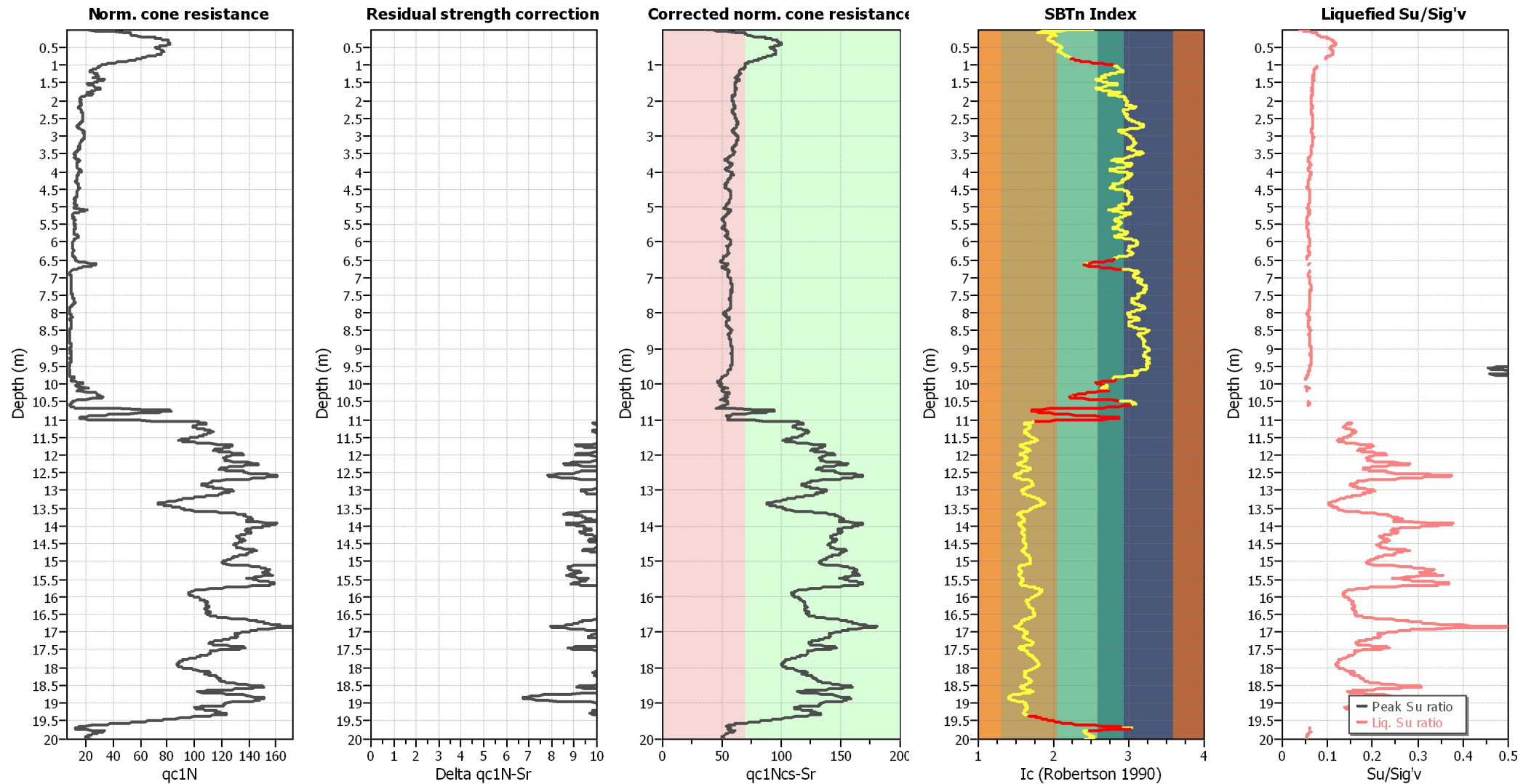
F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Check for strength loss plots (Idriss & Boulanger (2008))

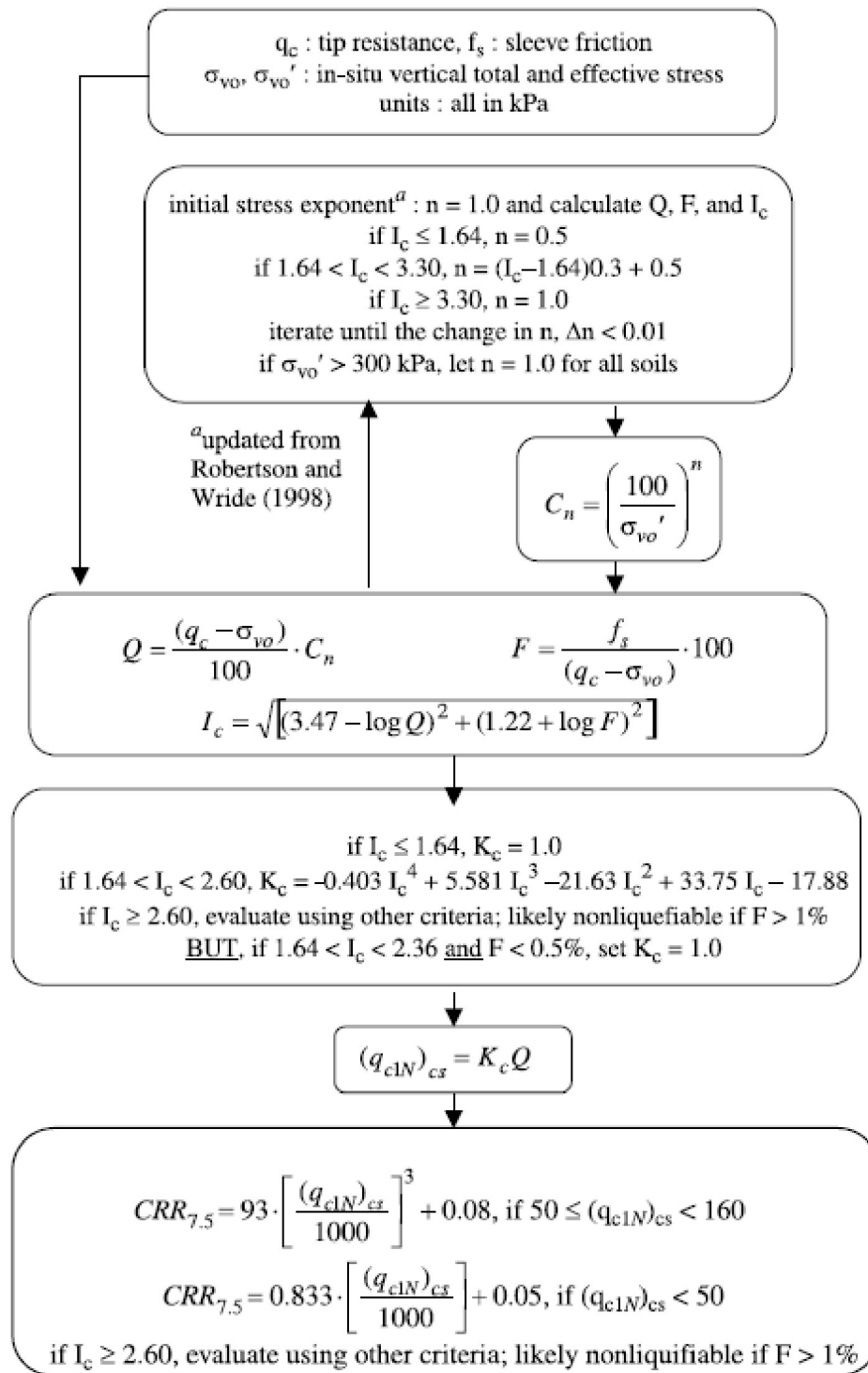


Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	I&B (2008)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _G applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	5.95	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance, NCEER (1998)

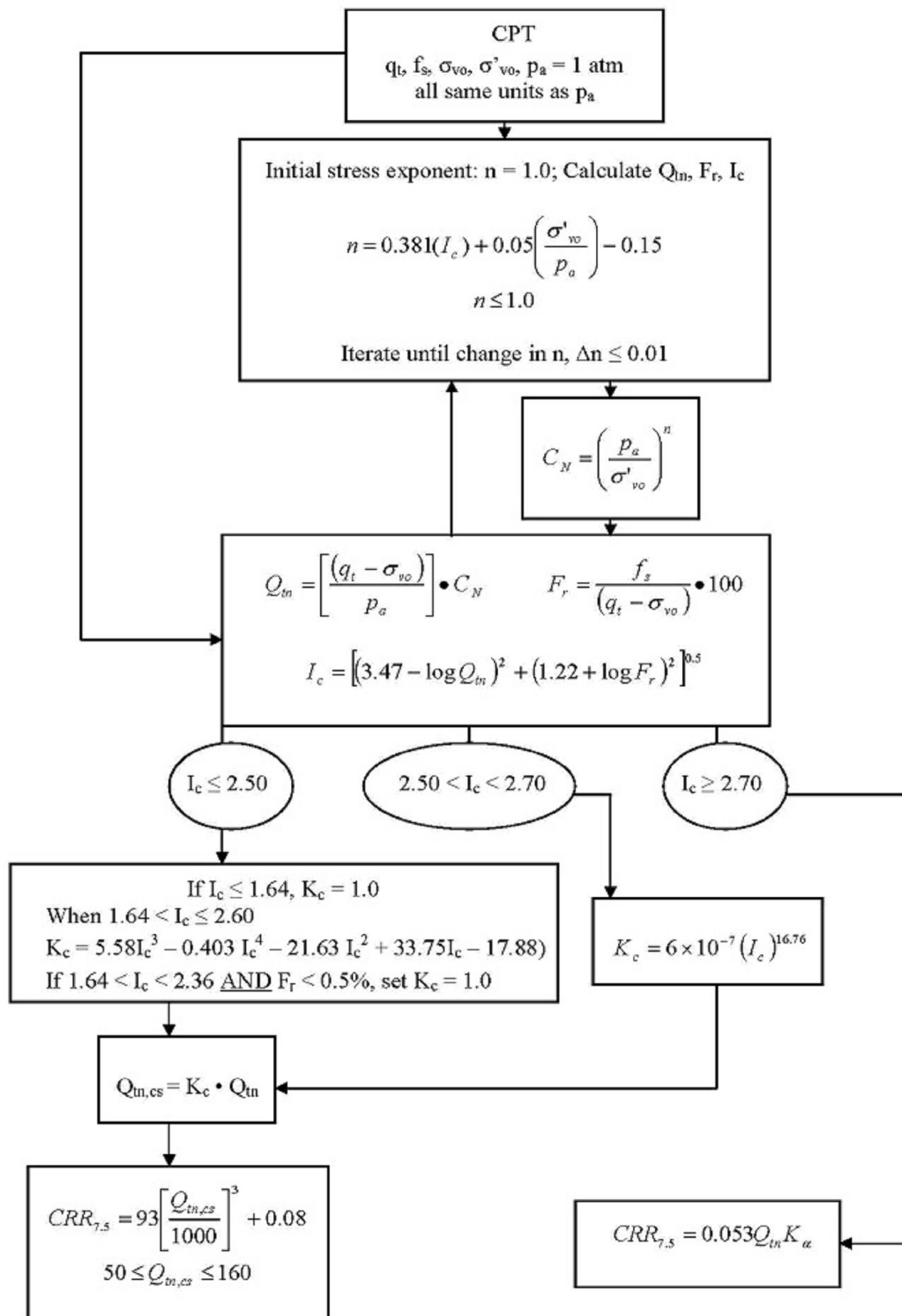
Calculation of soil resistance against liquefaction is performed according to the Robertson & Wride (1998) procedure. The procedure used in the software, slightly differs from the one originally published in NCEER-97-0022 (Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils). The revised procedure is presented below in the form of a flowchart¹:



¹ "Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground", G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman

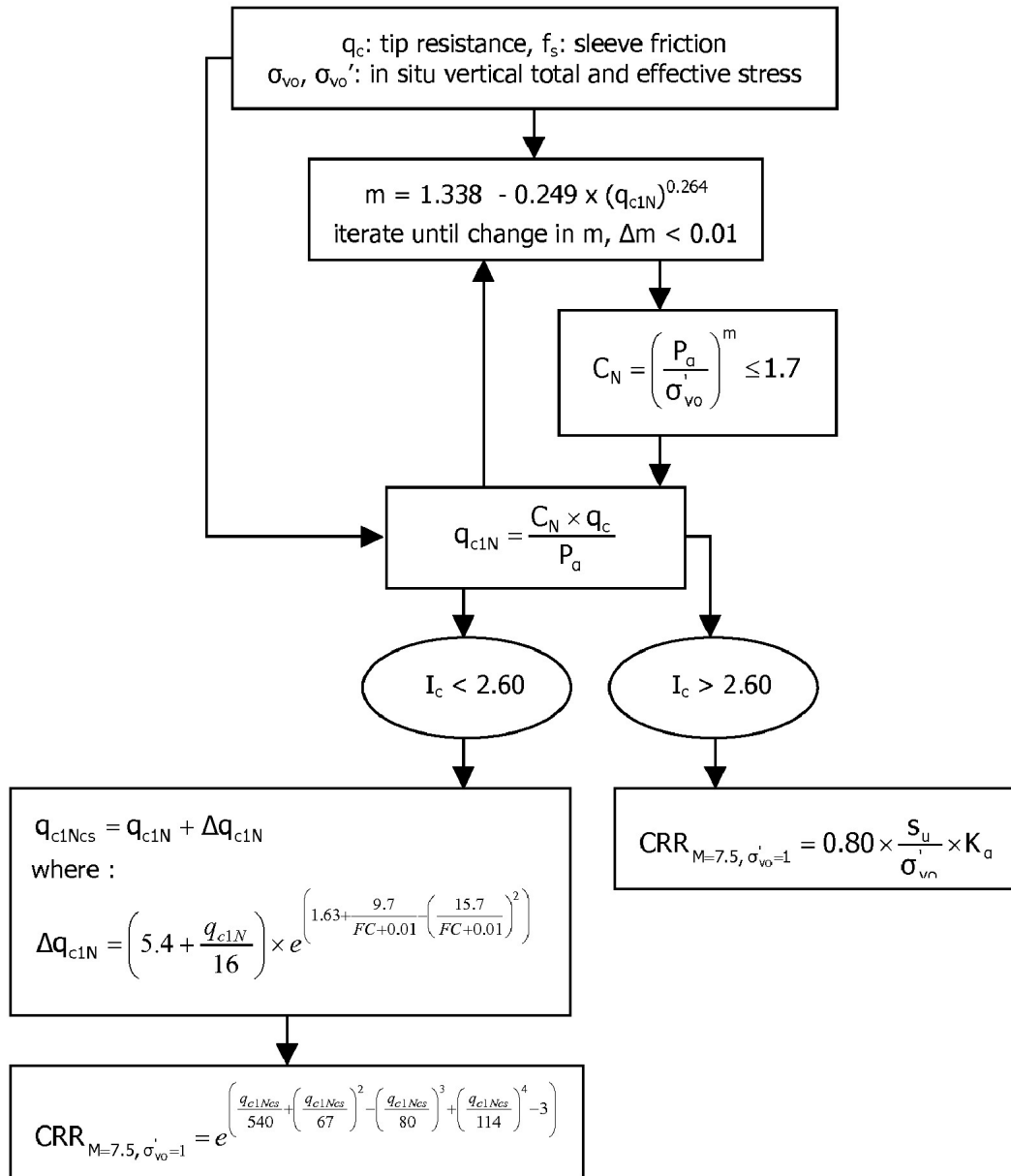
Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance (all soils), Robertson (2010)

Calculation of soil resistance against liquefaction is performed according to the Robertson & Wride (1998) procedure. This procedure used in the software, slightly differs from the one originally published in NCEER-97-0022 (Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils). The revised procedure is presented below in the form of a flowchart¹:

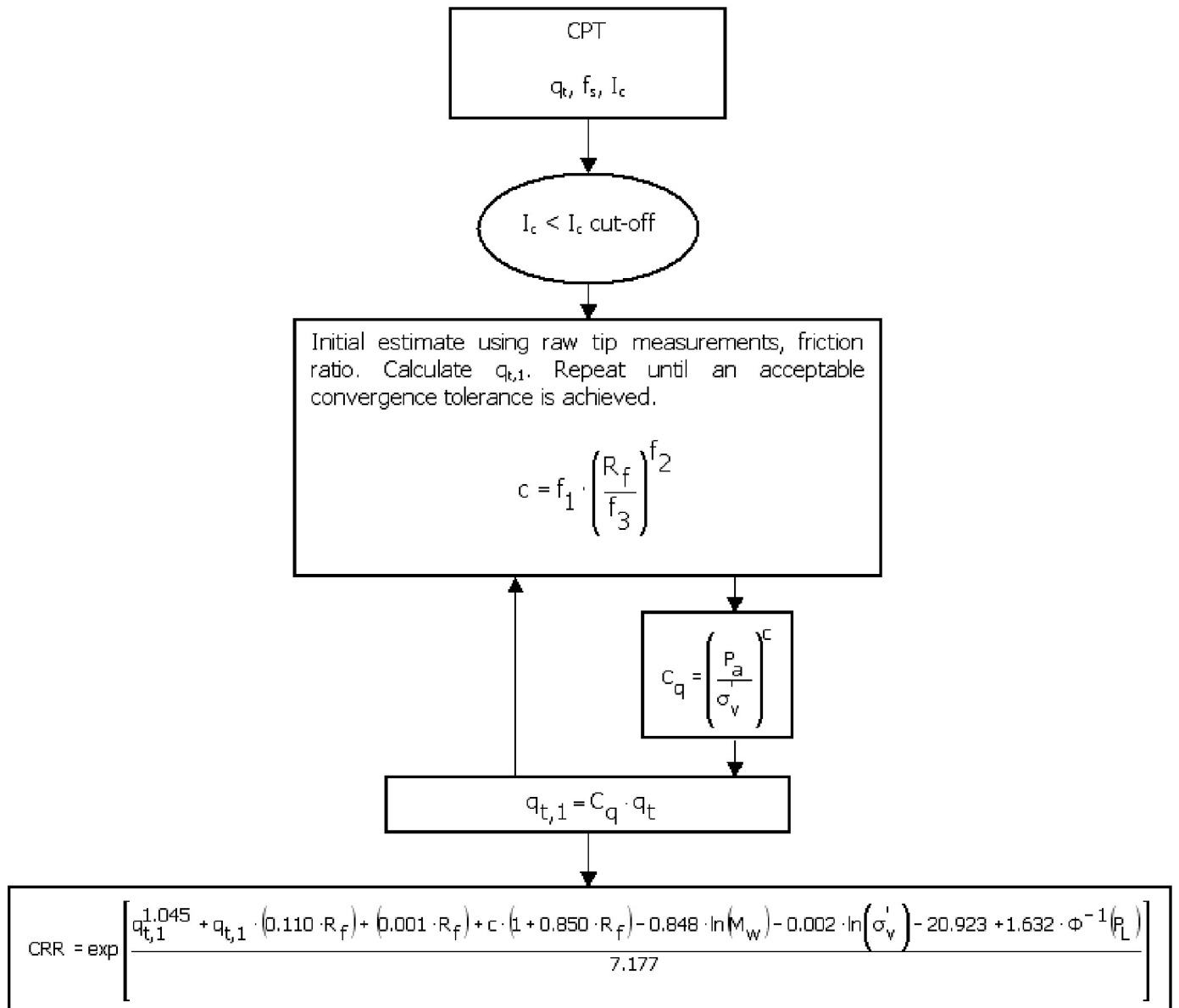


¹ P.K. Robertson, 2009. "Performance based earthquake design using the CPT", Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009

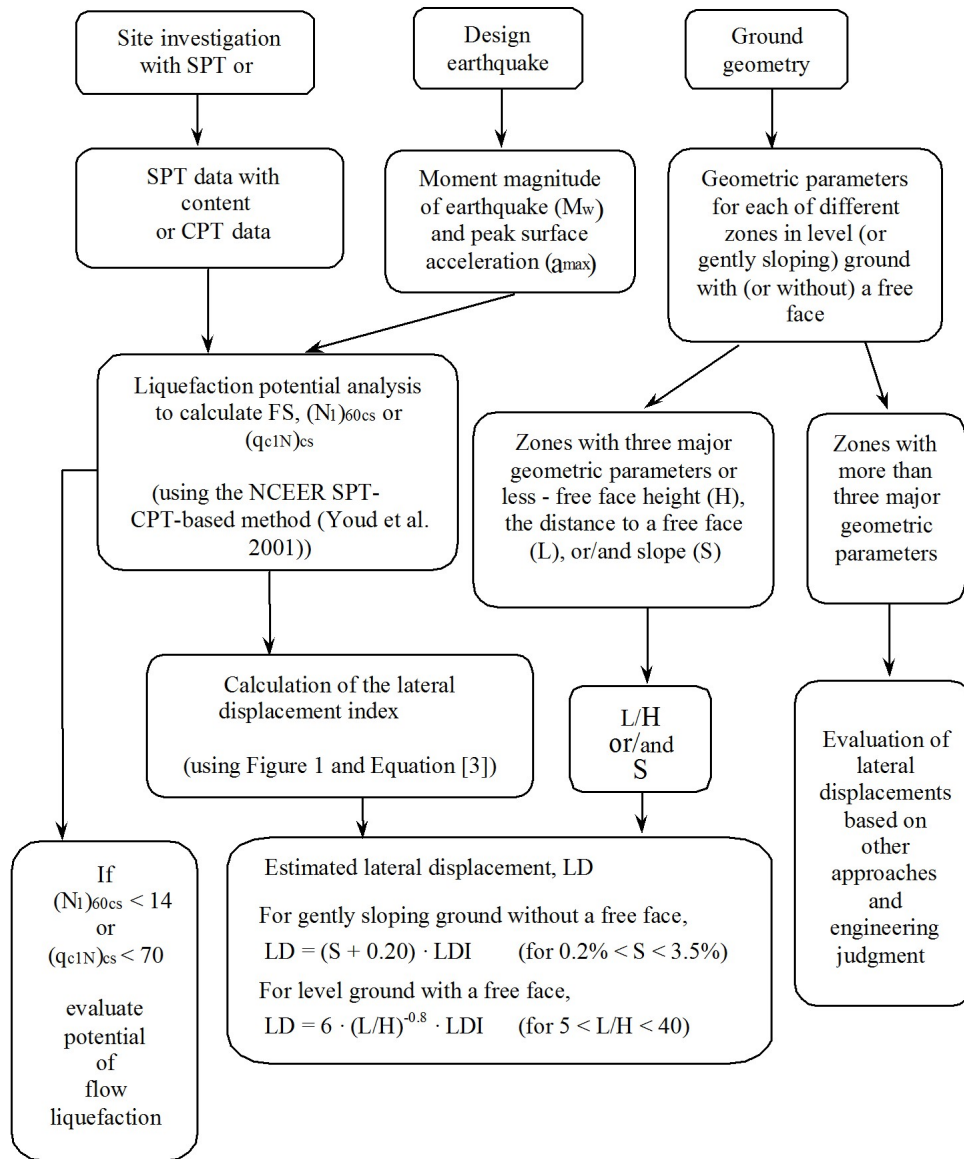
Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance, Idriss & Boulanger (2008)



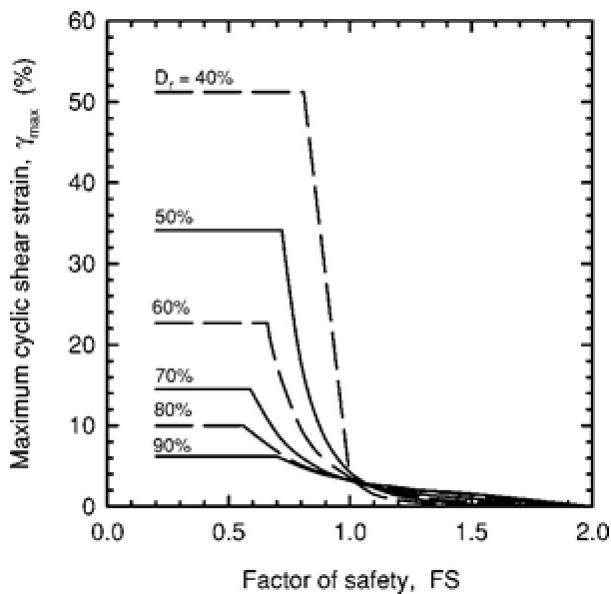
Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance (sandy soils), Moss et al. (2006)



Procedure for the evaluation of liquefaction-induced lateral spreading displacements



¹ Flow chart illustrating major steps in estimating liquefaction-induced lateral spreading displacements using the proposed approach



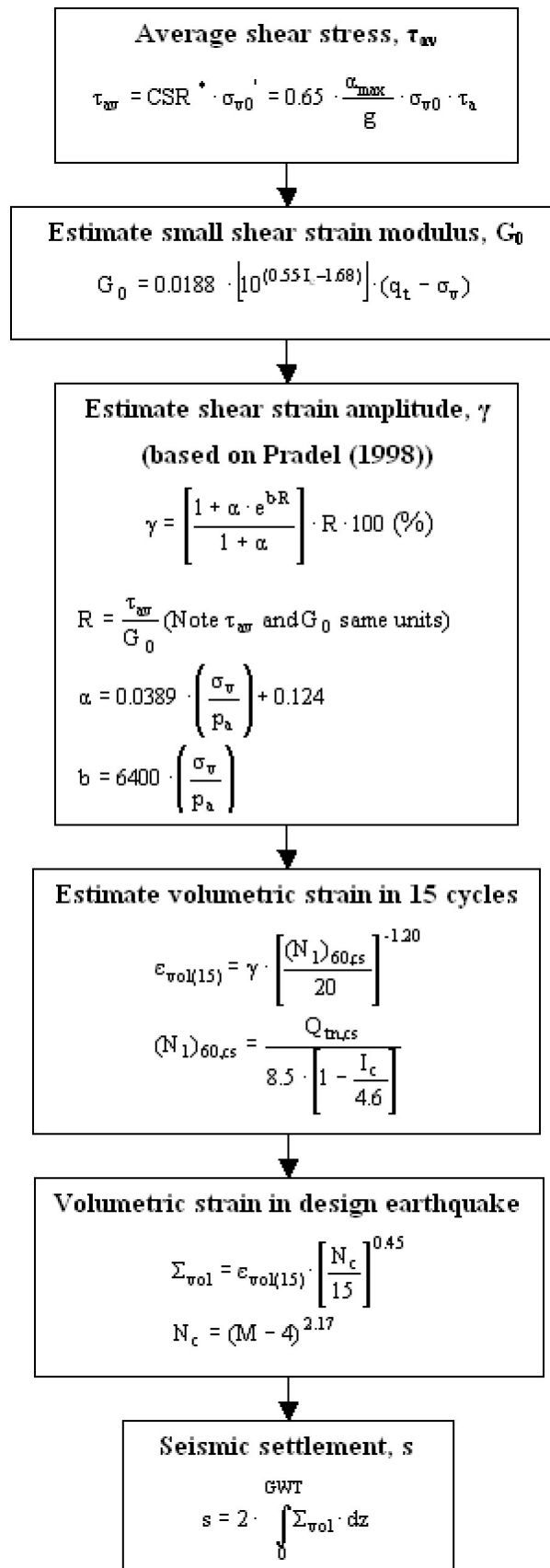
¹ Figure 1

$$LDI = \int_0^{Z_{max}} \gamma_{max} dz$$

¹ Equation [3]

¹ "Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground", G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman

Procedure for the estimation of seismic induced settlements in dry sands



Robertson, P.K. and Lisheng, S., 2010, "Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT" FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, San Diego, CA

Liquefaction Potential Index (LPI) calculation procedure

Calculation of the Liquefaction Potential Index (LPI) is used to interpret the liquefaction assessment calculations in terms of severity over depth. The calculation procedure is based on the methodology developed by Iwasaki (1982) and is adopted by AFPS.

To estimate the severity of liquefaction extent at a given site, LPI is calculated based on the following equation:

$$LPI = \int_0^{20} (10 - 0,5z) \times F_L \times d_z$$

where:

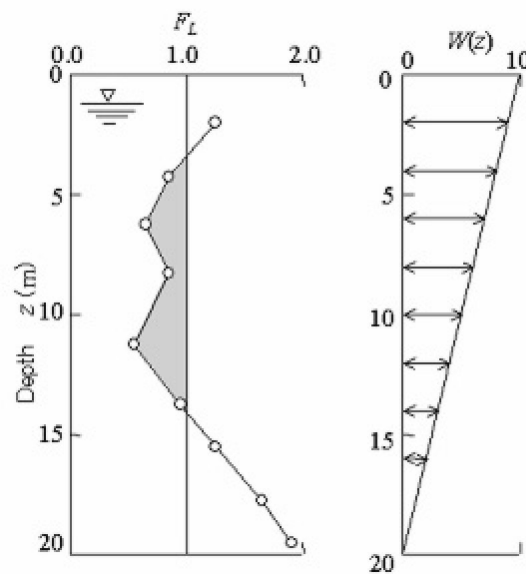
$F_L = 1 - F.S.$ when F.S. less than 1

$F_L = 0$ when F.S. greater than 1

z depth of measurement in meters

Values of LPI range between zero (0) when no test point is characterized as liquefiable and 100 when all points are characterized as susceptible to liquefaction. Iwasaki proposed four (4) discrete categories based on the numeric value of LPI:

- $LPI = 0$: Liquefaction risk is very low
- $0 < LPI \leq 5$: Liquefaction risk is low
- $5 < LPI \leq 15$: Liquefaction risk is high
- $LPI > 15$: Liquefaction risk is very high



Graphical presentation of the LPI calculation procedure

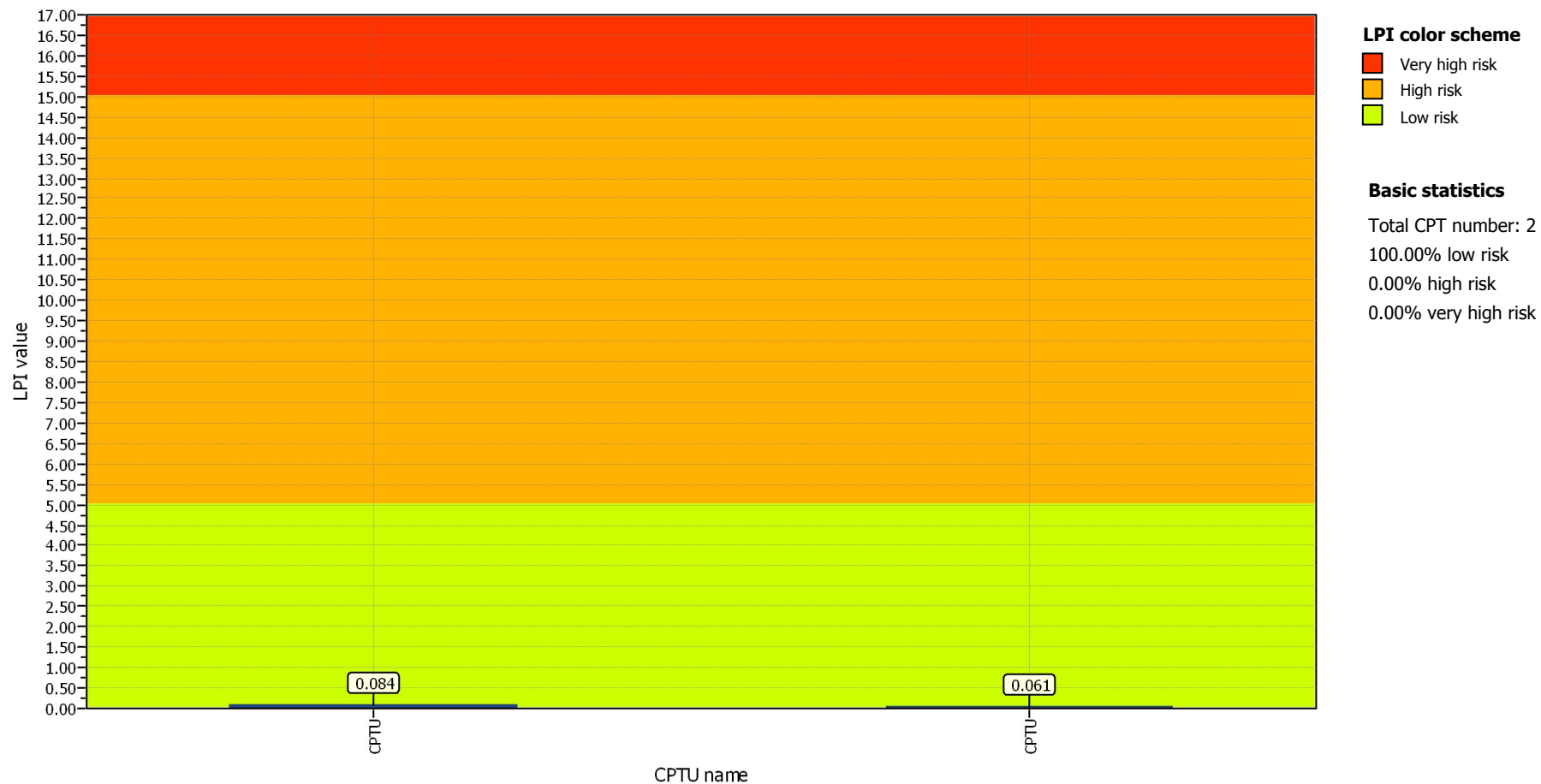
References

- Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M 1997. Cone penetration testing in geotechnical practice, E & FN Spon Routledge, 352 p, ISBN 0-7514-0393-8.
- Boulanger, R.W. and Idriss, I. M., 2007. Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clays. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering June, Vol. 133, No. 6 pp 641-652
- Robertson, P.K. and Cabal, K.L., 2007, Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Available at no cost at <http://www.geologismiki.gr/>
- Robertson, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27 (1), 151-8.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E., 1998. Cyclic Liquefaction and its Evaluation based on the CPT Canadian Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, August.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H., Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833
- Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2002, Estimating Liquefaction Induced Ground Settlements from the CPT, Canadian Geotechnical Journal, 39: pp 1168-1180
- Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2004, Estimating Liquefaction Induced Lateral Displacements using the SPT and CPT, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 8, 861-871
- Pradel, D., 1998, Procedure to Evaluate Earthquake-Induced Settlements in Dry Sandy Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 4, 364-368
- Iwasaki, T., 1986, Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 1, 2-70
- Papathanassiou G., 2008, LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence, Eng. Geol. 96:94–104
- P.K. Robertson, 2009, Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, No. 11, pp 1337-1355
- P.K. Robertson, 2009. "Performance based earthquake design using the CPT", Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009
- Robertson, P.K. and Lisheng, S., 2010, "Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT" FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, *Symposium in honor of professor I. M. Idriss*, SAN diego, CA
- R. E. S. Moss, R. B. Seed, R. E. Kayen, J. P. Stewart, A. Der Kiureghian, K. O. Cetin, CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 8, August 1, 2006
- I. M. Idriss and R. W. Boulanger, Soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute MNO-12

Project title : Comune di Suzzara

Location : Teatro Guido

Overall Liquefaction Potential Index report





Project title : Comune di Suzzara

Location : Teatro Guido

Overall vertical settlements report

