



Comune
di Modena

PUA

PIANO

PARTICOLAREGGIATO

di iniziativa pubblica

EX MERCATO

BESTIAME

Zona Elementare 880 aree 01-04

tav **O**

RELAZIONE GEOLOGICA E ANALISI GEOTECNICA DEL TERRENO

**Assessorato Urbanistica, Pianificazione per lo sviluppo
sostenibile, Politiche abitative**

Dirigente

Settore Pianificazione e Sostenibilità Urbana

Ing. Maria Sergio

Dirigente

Servizio Progetti Urbani Complessi e Politiche Abitative

Ing. Michele Tropea

**Servizio progetti Complessi e Politiche Abitative
Gruppo di lavoro**

Gruppo di Progettazione:

Ing. Filippo Bonazzi

Geom. Nilva Bulgarelli

Arch. Lorenzo Gaio Gastaldello

Arch. Giovanna Palazzi (fino al 10/01/22)

Arch. Andrea Reggianini

Dott.ssa Silvia Sitton

Arch. Isabella Turchi

Elaborazioni grafiche:

Istrutt. Tecnico Elena Alietti

Istrutt. Tecnico Anna Tavoni

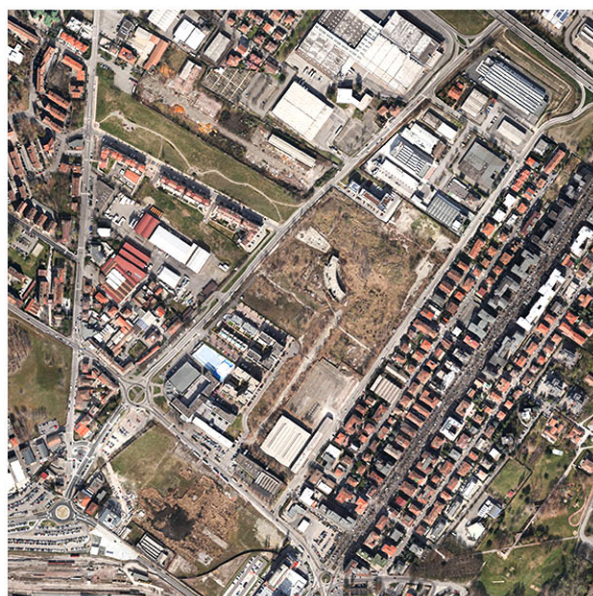
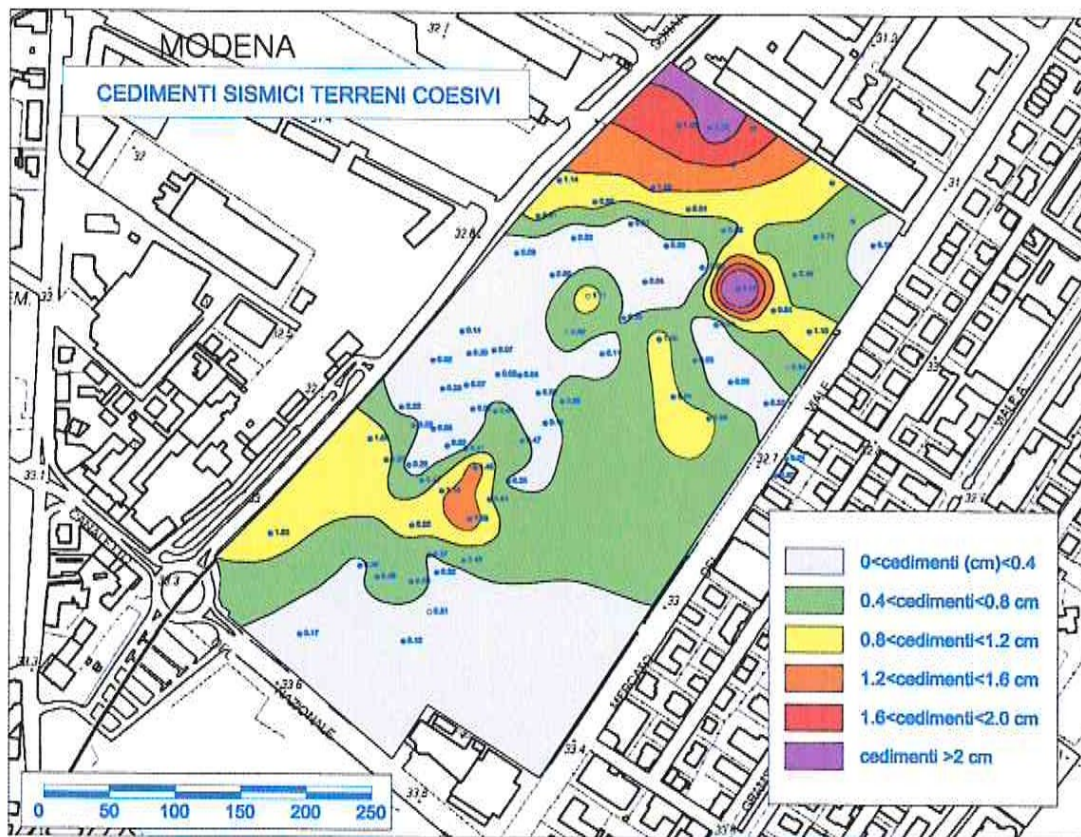


Figura 70: MAPPA CEDIMENTI SISMICI TERRENI COESIVI



13 PROPOSTE DI GESTIONE DEL RISCHIO SISMICO DEL COMPARTO

Le analisi effettuate hanno consentito nel comparto oggetto di studio una migliore caratterizzazione e determinazione delle aree stabili e instabili in prospettiva sismica come riportato nella Figura 71.

Figura 71: MAPPA ZONE STABILI E INSTABILI IN PROSPETTIVA SISMICA

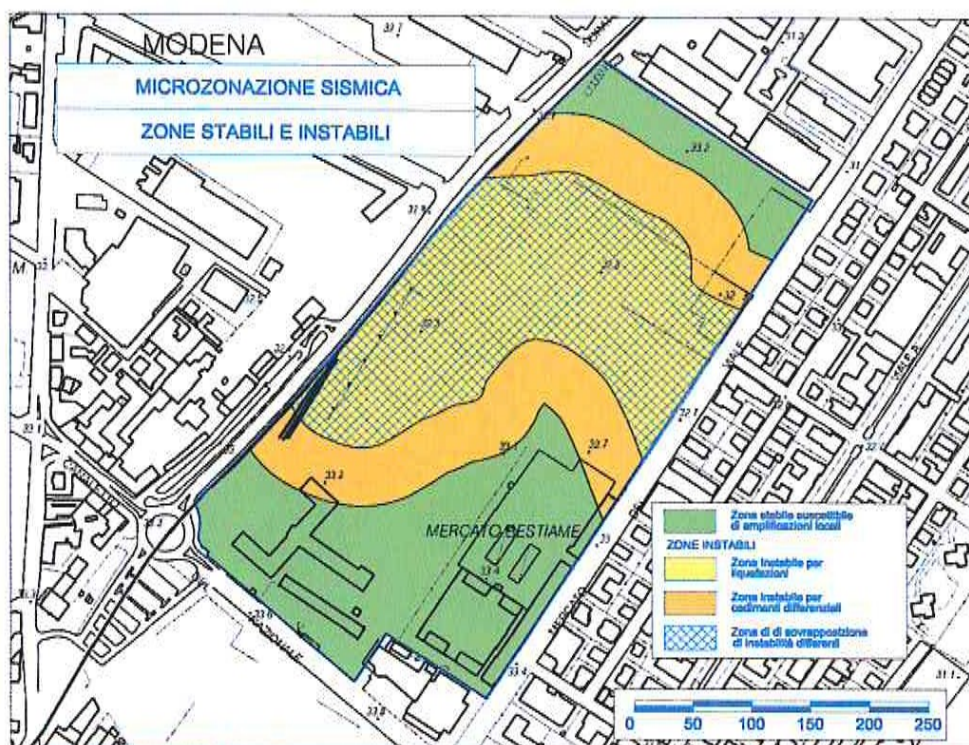


FIGURA 18: MAPPA DELLE MASSIME INTENSITA' MACROSISMICHE OSSERVATE NEI COMUNI ITALIANI - PARTICOLARE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA	22
FIGURA 19: DIAGRAMMA RAPPRESENTANTE LA STORIA SISMICA DEL COMUNE DI MODENA.....	23
FIGURA 20: ESTRATTO DELLA CARTA I LIVELLO DI APPROFONDIMENTO – MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA DEL COMUNE DI MODENA.....	27
FIGURA 21: CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DELLA PGA	29
FIGURA 22: CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DELLE INTENSITA' DI HOUSNER INTERVALLO 0.1-0.5 S.....	30
FIGURA 23: CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DELLE INTENSITA' DI HOUSNER INTERVALLO 0.5-1.0 S.....	31
FIGURA 24: UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE	32
FIGURA 25: ANDAMENTO DELLE TRACCE REGISTRATE DURANTE LA PROCEDURA DI ACQUISIZIONE M.A.S.W.	33
FIGURA 26: SPETTRO VELOCITA' DI FASE – FREQUENZE (VISTA 3D)	33
FIGURA 27: PICKING DEFINITO PER LA DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI DISPERSIONE	34
FIGURA 28: SPETTRO VELOCITA' DI FASE - FREQUENZE	34
FIGURA 29: SPETTRO VELOCITA' – FREQUENZE DERIVANTE DAL PROCESSO DI INVERSIONE	35
FIGURA 30: ANDAMENTO DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO CON LA PROFONDITA'	36
FIGURA 31: ANDAMENTO DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO E DISADATTAMENTO.....	36
FIGURA 32: DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA SISMICA ATTIVA - PASSIVA (MASW - E.S.A.C.) – BASE SISMICA SSW-ENE...	37
FIGURA 33: DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA SISMICA PASSIVA (E.S.A.C.) – BASE SISMICA ESE-NNW.....	37
FIGURA 34: DISPOSIZIONE SPAZIALE RILIEVO M.A.S.W. - E.S.A.C.....	38
FIGURA 35: TRACCE ACQUISITE DAL RILIEVO E.S.A.C.....	38
FIGURA 36: CURVA DI DISPERSIONE EFFETTIVA MASW (ROSSO) E.S.A.C. (VERDE CHIARO) E SELEZIONE DEI PUNTI INTERPRETATIVI PER LA MODELLAZIONE DIRETTA (PUNTI VERDE SCURO CON INTERVALLO DI INCERTEZZA).....	39
FIGURA 37: CONFRONTO TRA IL PICKING DELLA CURVA EFFETTIVA SPERIMENTALE E LE CURVA EFFETTIVA E APPARENTE SINTETICHE (CURVE ROSSA E BLU) (DISCREPANZA PARI AL 6%) E MODI VIBRAZIONALI RIFERIBILI AL MODELLO DI PROFILO DI VELOCITA' (CURVE IN CIANO)	40
FIGURA 38: PROFILO DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO (INCERTEZZA 0,1)	40
FIGURA 39: TABELLA DATI RIASSUNTIVI RELATIVI AL MODELLO DI PROFILO VERTICALE DI VELOCITA'.....	41
FIGURA 40: UBICAZIONE PROVE HVSR.....	41
FIGURA 41: HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO	43
FIGURA 42: CARTA DELLE ISOBATE DEL TETTO DELLE GHIAIE.....	52
FIGURA 43: CARTA DEGLI SPESSORI CUMULATIVI DEI TERRENI SABBIOSI E SABBIOSO-LIMOSI.....	53
FIGURA 44: SEZIONE DA PROGETTO CARG	54
FIGURA 45: PROFILI DI VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO.....	55
FIGURA 46: MAPPA DI PERICOLOSITA' SISMICA DEL COMUNE DI MODENA.....	56
FIGURA 47: SPETTRO NORMALIZZATO RER.....	57
FIGURA 48: ACCELEROGRAMMA 000046XA	57
FIGURA 49: ACCELEROGRAMMA 000126XA	58
FIGURA 50: ACCELEROGRAMMA 0000354XA	58
FIGURA 51: SPETTRO MEDIO DI RIFERIMENTO SUOLO A	58
FIGURA 52: VARIAZIONE DI G E D - ARGILLA -(VUCETIC – P.I. 50).....	59
FIGURA 53: VARIAZIONE DI G E D - SABBIE - (SEED & IDRIS - MEDIA)	59
FIGURA 54: VARIAZIONE DI G E D GHIAIE (ROLLINS ET ALII 1998).....	59
FIGURA 55: DATI DI INPUT EERA - PROFILO A	60
FIGURA 56: SPETTRI DI RISPOSTA (PERIODO DI RITORNO DI 475 ANNI CON SMORZAMENTO PARI A 5%)- PROFILO A	61
FIGURA 57: AMPLIFICAZIONE (1 OUTCROP – 14 OUTCROP) – PROFILO A	61
FIGURA 58: SPETTRI IN PSEUDO VELOCITA' – PROFILO A	62
FIGURA 59: SPETTRI DI RISPOSTA (PERIODO DI RITORNO DI 475 ANNI CON SMORZAMENTO PARI A 5%) - PROFILO B	63
FIGURA 60: AMPLIFICAZIONE (1 OUTCROP – 14 OUTCROP) – PROFILO B	63
FIGURA 61: SPETTRI IN PSEUDO VELOCITA' – PROFILO B	64
FIGURA 62: MAPPA PGA ATTESA	65
FIGURA 63: MAPPA $F_{A_{PGA}}$	65
FIGURA 64: MAPPA $F_{A_{IS}}$ (0.1-0.5 s)	66
FIGURA 65: MAPPA $F_{A_{IS}}$ (0.5-1.0 s)	66
FIGURA 66: MAPPA INDICE DI POTENZIALE LIQUEFAZIONE IL	71
FIGURA 67: CALCOLO CEDIMENTI IN TERRENI SATURI (ZHANG ET ALL, 2002)	72
FIGURA 68: CALCOLO CEDIMENTI IN TERRENI GRANULARI NON SATURI (KRINITZSKY ET ALL, 1993)	73
FIGURA 69: MAPPA CEDIMENTI SISMICI SABBIE SATURE	75
FIGURA 70: MAPPA CEDIMENTI SISMICI TERRENI COESIVI.....	76
FIGURA 71: MAPPA ZONE STABILI E INSTABILI IN PROSPETTIVA SISMICA.....	76

ELENCO ELABORATI

ELABORATO 000: RELAZIONE TECNICA GENERALE

ELABORATO 001: INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE REPERITE IN BIBLIOGRAFIA

ELABORATO 002: VERIFICHE ALLA LIQUEFAZIONE E CEDIMENTI INDOTTI

ELABORATO 003: CARTA DELLE INDAGINI E PERIMETRAZIONE DEL COMPARTO

ELABORATO 004: CARTA DELLA PROFONDITA' DEL PRIMO LIVELLO GHIAIOSO

ELABORATO 005: CARTA DELLA PROFONDITA' DEL PRIMO LIVELLO GHIAIOSO

ELABORATO 006: MAPPA PGA ATTESA (g)

ELABORATO 007: MAPPA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE PGA/PGA0

ELABORATO 008: MAPPA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SI/SI0 - (INTERVALLO 0.1-0.5 s)

ELABORATO 009: MAPPA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SI/SI0 - (INTERVALLO 0.5-1.0 s)

ELABORATO 010: CARTA DELL'INDICE DI POTENZIALE LIQUEFAZIONE "IL" - (MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO)

ELABORATO 011: CARTA DEI CEDIMENTI SISMICI - SABBIE SATURE - (MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO)

ELABORATO 012: CARTA DEI CEDIMENTI SISMICI - TERRENI COESIVI - (MICROZONAZIONE SISMICA DI III° LIVELLO)

ELABORATO 013: CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA - (ZONA STABILI E INSTABILI)

1 PREMESSA

Per incarico ricevuto dalla Amministrazione Comunale di Modena mediante Contratto Appalto di Servizi – Settore Pianificazione e Rigenerazione Urbana – Via Scudari, 30 – Modena avente per oggetto Approfondimenti di III° livello, secondo le indicazioni della DGR 2193/215 del 21/12/2015 sulla base dei dati già esistenti nel database comunale nel comparto ex Mercato Bestiame, la ditta GEO-XPert ITALIA SRL ha effettuato il sito gli approfondimenti richiesti mentre l'interpretazione dei risultati ottenuti e analisi di Microzonazione Sismica di III ° Livello è stata effettuata dal Dott. Giorgio Masotti, geologo libero professionista regolarmente iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna con il nr. 588 – Sez. A con la collaborazione del Dott. Geol. Alberto Fiori iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna con il nr. 483 – Sez. A.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

La presente relazione è stata redatta con riferimento ai seguenti strumenti normativi:

Normativa Nazionale

- R.D. 30 dicembre 1923 n. 3267

Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e terreni montani

- R.D. 16 maggio 1926 n. 1126

Regolamento per l'applicazione de R.D. 30 dicembre 1923, n. 3267

- Legge 25.11.1962

Provvedimenti per l'edilizia, con particolari prescrizioni per le zone sismiche (pubblicato nella Gazzetta Ufficiale del 22.12.1962, n. 326 – Supplemento Ordinario n. 1);

- Legge 02.02.1974, n. 64

Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche (G.U. 21.03.1974, n. 76);

- Decreto Legge 27.06.1985, n. 312

Disposizioni urgenti per la tutela delle zone di particolare interesse ambientale (G.U. 29.06.1985, n. 152);

- Legge 08.08.1985, n. 431

Conversione in legge con modificazioni del D.L. 27.06.1985, n. 312, concernente disposizioni urgenti per la tutela delle zone di particolare interesse ambientale (G.U. 08.08.1985, n. 431);

- Decreto Ministeriale 11.03.1988

Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione (G.U. 01.06.1988, n. 127);

- Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 24.09.1988, n. 30483

Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione (G.U. 01.06.1988, n. 127);

- Decreto Ministero LL.PP. del 14.02.1992

Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche (G.U. 18.03.1992, n. 65);

- D.M. 09.01.1996

Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche (G.U. 05.02.1996, n. 29);

- Circolare Ministero LL. PP. del 09.01.1996, n. 218

Istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica (G.U. 29.01.1996, n. 50)

- D.M. 16.01.1996

Norme Tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi;

- Decreto Ministero LL.PP. 16.01.1996

Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche (G.U. 05.02.1996, n. 29 – S.O. n. 19);

- Circolare Ministero LL.PP. 15.10.1996, n. 252 AA.GG./S.T.C.

Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche di cui al D.M. 09.01.1996;

- Circolare Ministero LL. PP. del 10.04.1997, n. 65/AA.GG – prot. n. 0

Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al D.M. 16.01.96 (G.U. 28.04.1997, n. 97);

- Eurocodice 7 del 30.04.1997

Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali;

- Eurocodice 8 del 28.02.1998

Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici;

- Decreto del Presidente della Repubblica del 06.06.2001, n. 380

Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia (Testo A) (G.U. 20.10.2001 n. 245 – S.O. n. 239);

- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20.03.2003, n. 3274

Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica (G.U. 08.05.2003, n. 105 – S.O. n. 72);

- Ordinanza P.C.M. del 02.10.2003, n. 3316

Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza P.C.M. del 20.03.2003 n. 3274 (G.U. 10.10.2003, n. 236);

- Decreto P.C.M. 21.10.2003, n. 3316

Disposizioni attuative dell'art. 2, commi 2, 3 e 4, dell'Ordinanza P.C.M. del 20.03.2003 n. 3274 (G.U. 29.10.2003, n. 252);

- Ordinanza del P.C.M. del 03.05.2005, n. 3431

Ulteriori modifiche ed integrazioni all'Ordinanza P.C.M. del 20.03.2003 n. 3274 (G.U. 10.05.2005, n. 107);

- Decreto Ministeriale del 14.09.2005

Norme tecniche per le costruzioni (G.U. 23.09.2005, n. 222 – S.O. n. 159);

- Ordinanza del P.C.M. del 28.04.2006, n. 3519

Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone;

- D. Lgs. n. 152 del 03/04/2006

"Norme in materia ambientale"

- Decreto Ministeriale del 14.01.2008

Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni (G.U. 04.02.2008, n. 29 – S.O. n. 30);

- Decreto Ministeriale nr. 161/2012

Regolamento recante la disciplina dell'utilizzazione delle terre e rocce da scavo

- Legge 98/2013

Disposizioni urgenti per il rilancio dell'economia

- Decreto Ministeriale del 17.01.2018

Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni (G.U. 20.02.2018 – S.O. n. 42);

Normativa Regionale

- Legge Regionale Emilia-Romagna del 24.03.2000, n. 20

Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio;

- Delibera della Giunta Regionale Emilia-Romagna del 24.10.2005 n. 1677

Prime indicazioni applicative in merito al D.M. 14.09.2005 recante "Norme tecniche per le costruzioni";

- * Delibera Assemblea legislativa Regione Emilia-Romagna del 02.05.2007 progr. n. 112 – oggetto n. 3121

Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica".

- Deliberazione Della Giunta Regionale 21 Dicembre 2015. N. 2193

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

Normativa Provinciale

- Deliberazione di Consiglio Provinciale della Provincia di Modena n. 46 del 18/03/09

Approvazione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale della Provincia di Modena in vigore dal 08.04.2009

3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Le zona oggetto di studio si colloca nel territorio comunale di **Modena (MO)**, immediatamente a nord del centro storico di Modena tra la tangenziale e la linea ferroviaria e delimitabile come segue:

NE: comparto industriale artigianale

SE: Via del mercato

SW: Strada Nazionale Canaletto sud

NW: Viale Marcello Finzi

Geograficamente le aree oggetto di approfondimento sono comprese nella seguente documentazione cartografica:

Cartografia Regionale:

- Foglio n. 201 denominato "MODENA" – scala 1:50.000
- Carta Topografica n. 201-SE denominata "MODENA" – scala 1:25.000
- Sezione n. 201120 denominata "MODENA NORD-EST" – scala 1:10.000
- Elementi n. 201123 denominato "MODENA NORD-EST" – scala 1:5.000

Figura 1: ESTRATTO DI CARTA TOPOGRAFICA R.E.R. NR. 201SE DENOMINATA "MODENA" - SCALA 1:25.000



Figura 2: ESTRATTO DI CARTA TECNICA REGIONALE N. 201123 "MODENA NORD-EST" - SCALA 1:5.000

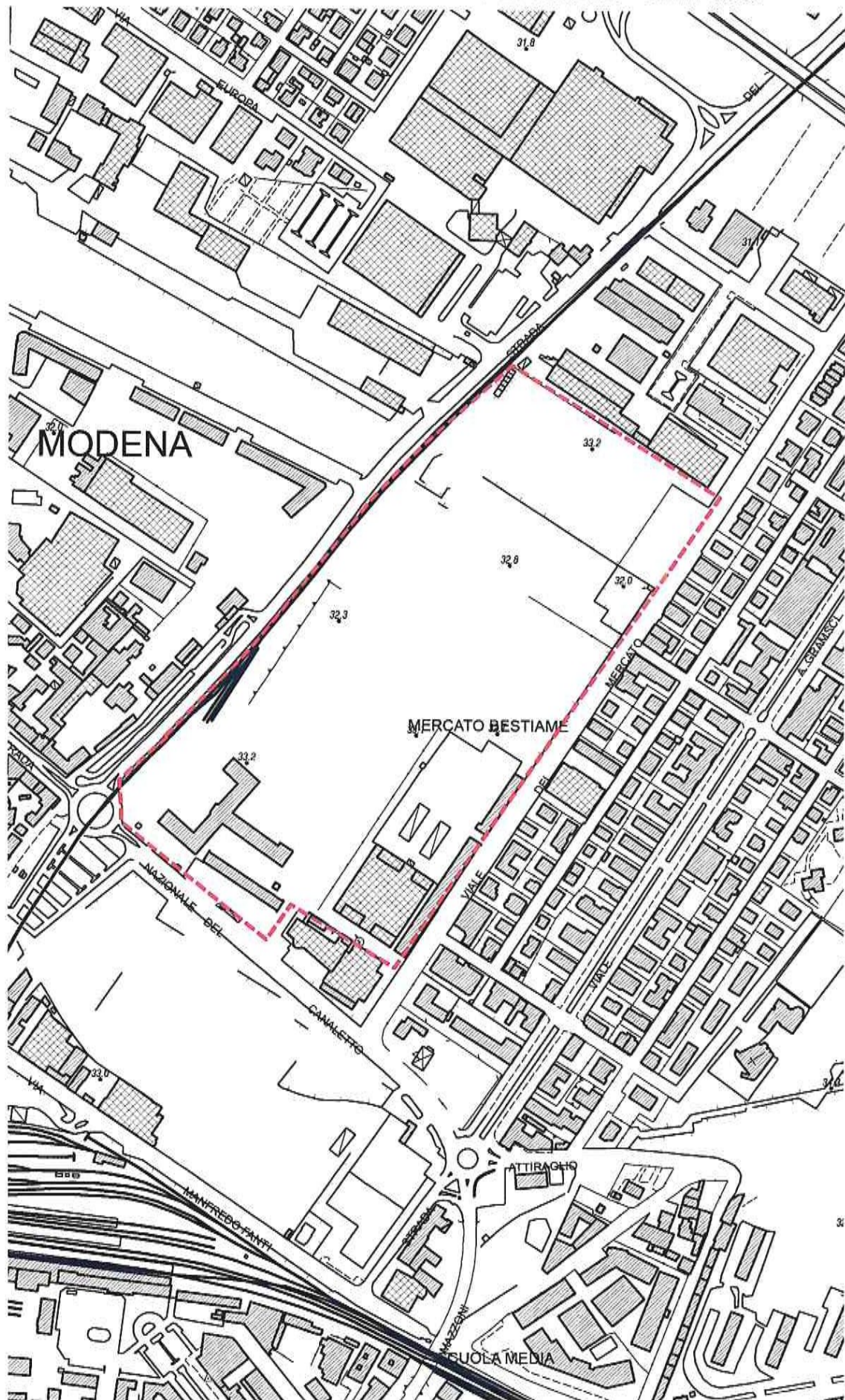
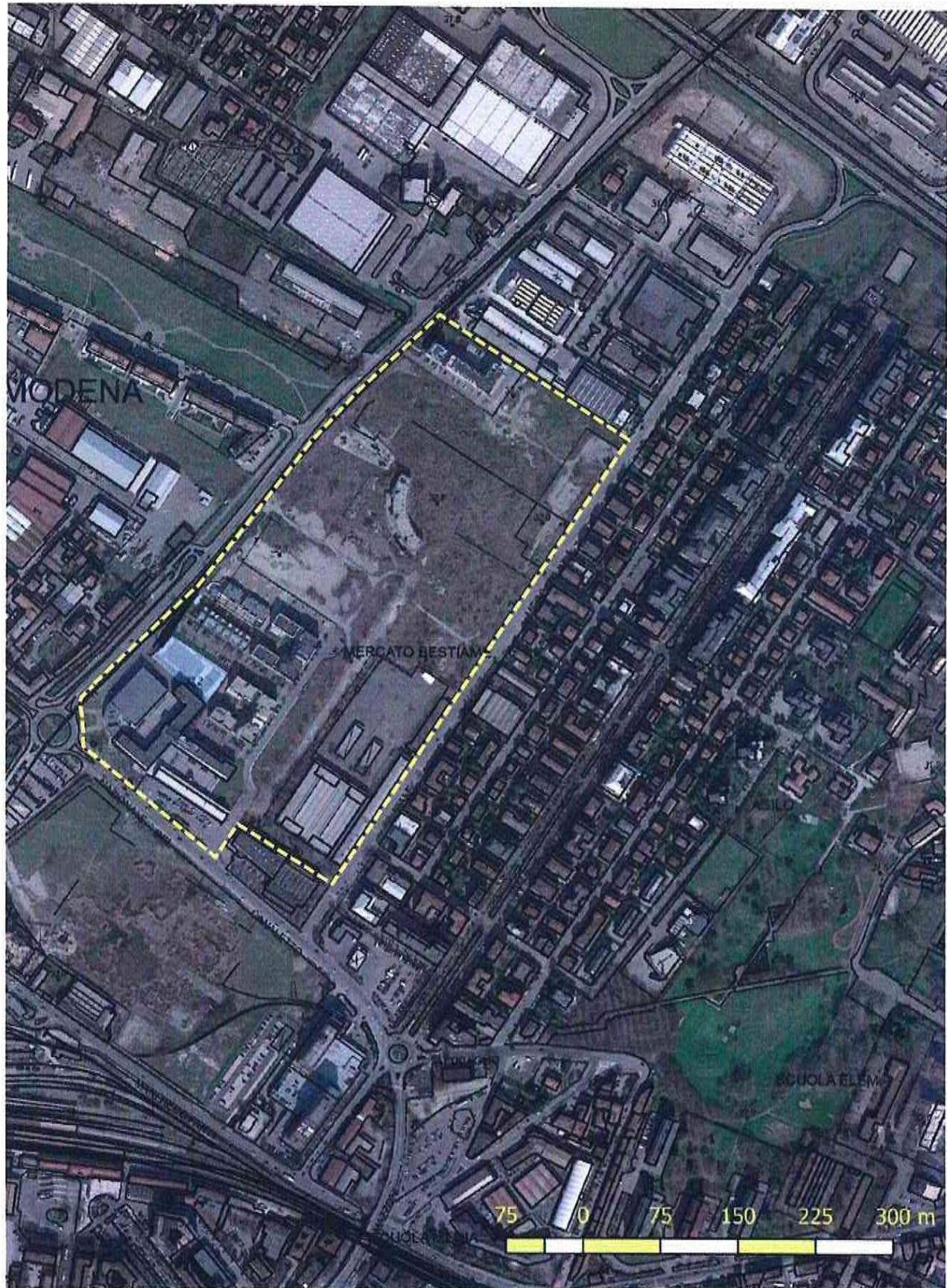


Figura 3: ESTRATTO DI IMMAGINE SATELLITARE DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO



4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOLITOLOGICO

Il territorio del Comune di Modena risulta interamente compreso nella Pianura Padana. La rete idrografica, oltre ai fiumi principali Secchia e Panaro, è rappresentata da una serie di torrenti appenninici minori tra cui la fossa di Spezzano, affluente del F. Secchia, il Cerca-Naviglio, il Grizzaga e il Tiepido affluenti del Fiume Panaro. Da un punto di vista geomorfologico ricomprende un tratto dell'alta pianura, per poi svilupparsi a valle nella media e bassa pianura regolarmente inclinate verso NE. Le due zone sono caratterizzate da differenti gradienti della superficie topografica (Figura 4 e Figura 5); l'alta pianura presenta pendenze dell'ordine di 0.5-0.6%, mentre la media e bassa pianura del 0.1-0.2%, con la fascia di transizione compresa tra le isoipse 35 e 45 m sul l.m.m.

Figura 4: CURVE DI LIVELLO CON EQUIDISTANZA PARI A 1 METRO.

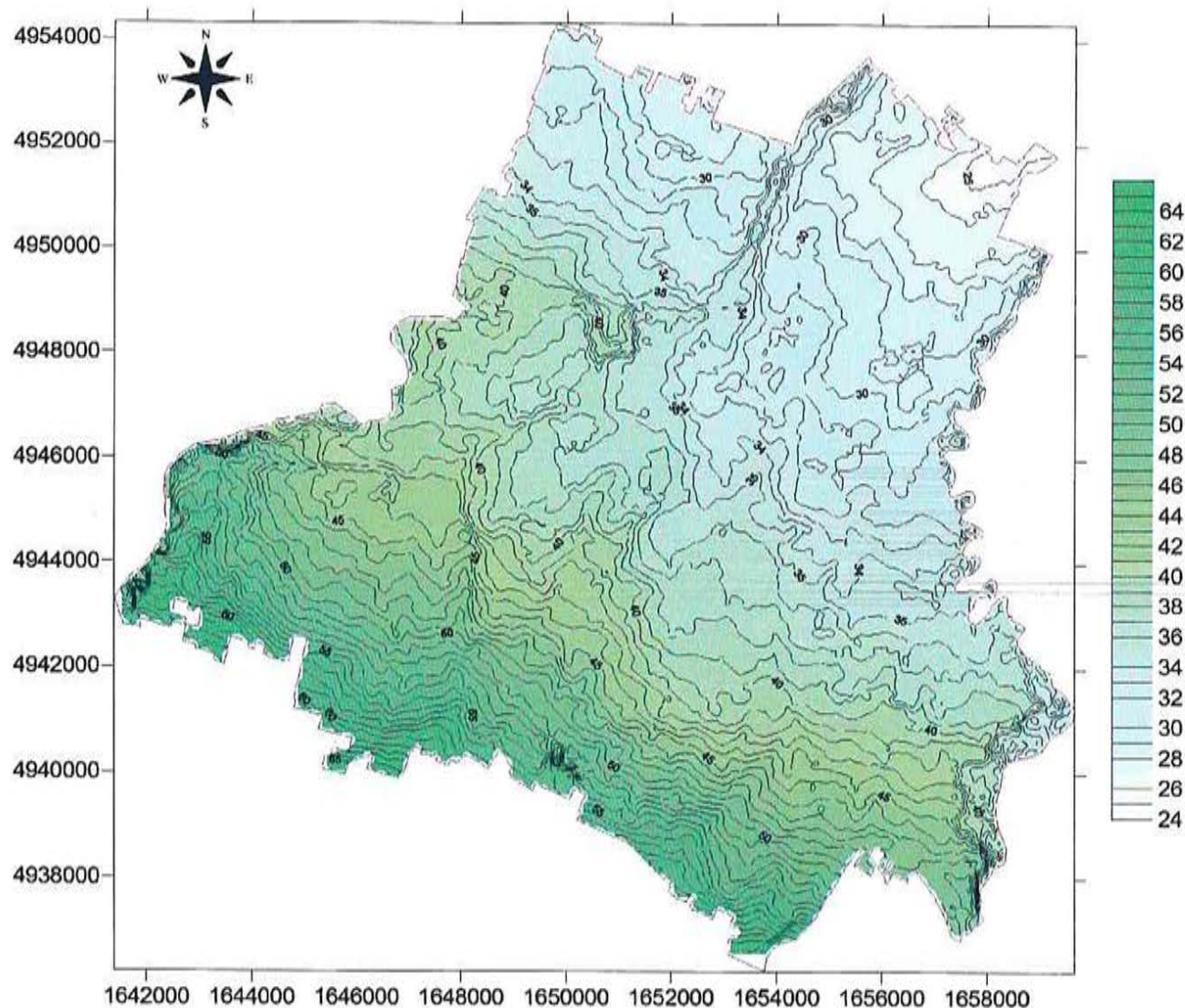
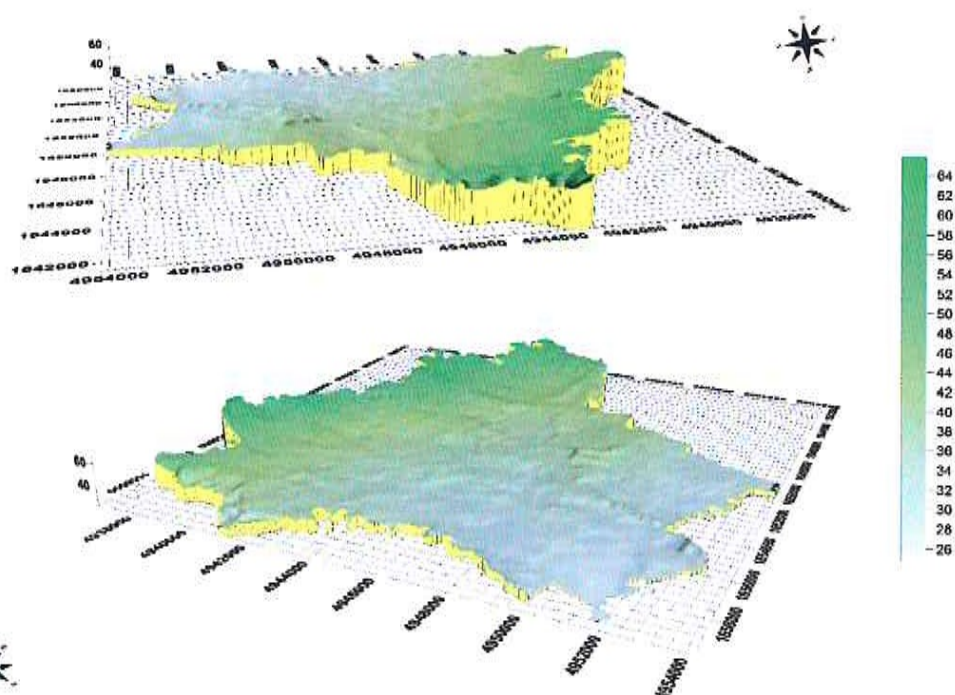
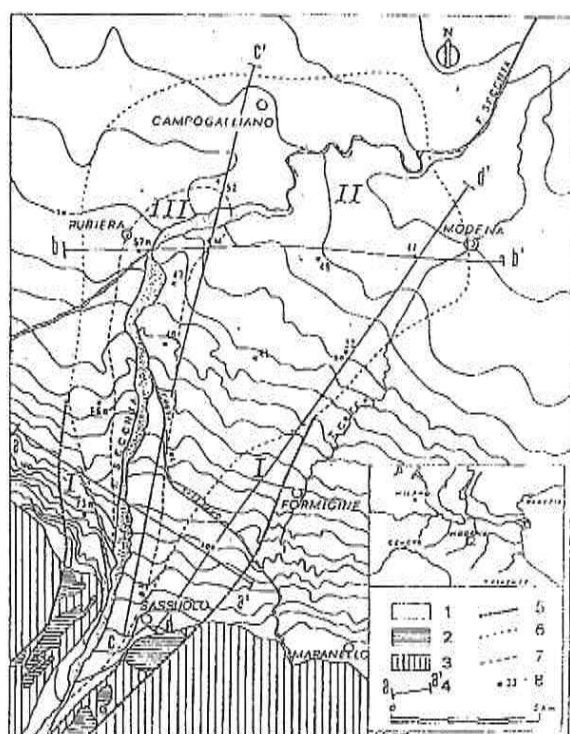


Figura 5: MODELLO D.T.M. DEL TERRITORIO COMUNALE



Da un punto di vista geomorfologico di evidenziano forme caratteristiche costituite nella zona di alta pianura dalle conoidi alluvionali dei corsi d'acqua principali, di cui quella del F. Secchia ricomprende un esteso settore del territorio Comunale, e in cui si distingue una conoide attuale, recente e antica (Figura 6).

Figura 6: PLANIMETRIA DEL FIUME SECCHIA

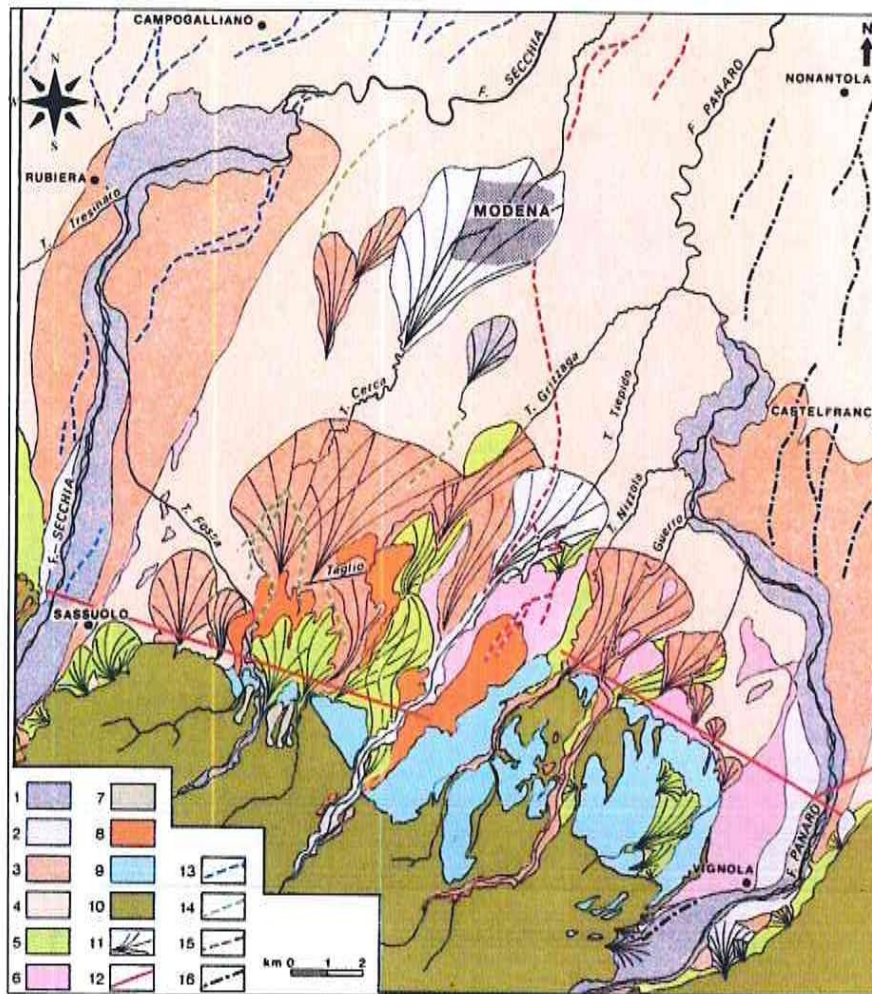


- 1) Alta e media pianura costituita da ghiaia, sabbie, limi e argille;
- 2) Terrazzi collinari di vario ordine con suolo ocraceo;
- 3) Formazioni limo-argillose Plio-quaternarie del margine collinare;
- 4) tracce sezioni litostratigrafiche;
- 5) limite della conoide antica (I);
- 6) limiti della conoide recente (II);
- 7) limiti della conoide attuale (III);
- 8) numero d'ordine pozzi con litostratigrafie.

Nella media e bassa pianura si riconoscono numerosi paleoalvei (Figura 7), che morfologicamente costituiscono una forma rilevata ("dosso") che si eleva di qualche metro rispetto alle quote circostanti e allungate anche di chilometri, disposte parallelamente

all'idrografia principale, oltre a conoidi alluvionali dei corsi d'acqua minori, tra cui si evidenzia quella del torrente Cerca-Fossa di Spezzano, che è responsabile del sovralluvionamento medioevale della Modena romana ("Mutina").

Figura 7: CARTA GEOLOGICA DEL TERRITORIO MODENESE E AREE LIMITROFE (DA GASPERI, 1987)



- 1, 2, 3 Unità dei corsi d'acqua minori e principali (depositi 1 - tra il XV e XX sec, 2 durante il medioevo, 3 - tra il neolitico e l'età romana);
 4 - Pianura alluvionale (neolitico-medioevo);
 5- Unità di Maranello e Savignano (Pre-neolitico);
 6 - Unità di Vignola (Pleistocene sup.);
 7 - Unità di Spezzano (Pleistocene m.);
 8 - Unità di Ubersetto (Pleistocene m.);
 9 - Unità Cà di Sola (tardo Pleistocene inf. - Pleistocene m.);
 10 - Unità marine Pre-Pleistoceniche medie;
 11 - Conoidi alluvionali dei corsi d'acqua minori;
 Faglie; 13-16 (13 del F. Secchia, 14 del Torrente Fossa, 15 del Torrente tiepido, 16 del Fiume Panaro).

Da un punto di vista geologico il territorio del Comune di Modena appartiene al bacino sedimentario della Pianura padana, formatosi, a partire dal Miocene, con l'avanzata delle falde appenniniche che ha determinato sprofondamenti flessurali nell'antistante avampaese padano, con il formarsi di un bacino subsidente. In termini stratigrafici (Figura 8), a partire dal Pleistocene, inizia un ciclo sedimentario (Qm in Ricci Lucchi et alii, 1982), che porta al colmamento del bacino padano e che si chiude con depositi sabbioso-ciottolosi di spiaggia noti come "Sabbie gialle".

Si evidenzia come il bacino padano sia fortemente coinvolto dalla tettonica appenninica, che porta alla formazione di sistemi di thrust (Castellarin e altri, 1985), a sviluppo planimetrico arcuato, che delimitano strutture positive antiformi (Arco delle pieghe emiliane,

Al di sopra del quaternario marino si sviluppano i depositi quaternari continentali, che costituiscono un supersistema denominato "Emiliano-Romagnolo" a sua volta suddiviso in due sistemi (*Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore* e *Sistema Emiliano Romagnolo Superiore*) separati da una discontinuità rilevabile nelle aree marginali della pianura legata a una fase tettonica di importanza regionale di sollevamento delle strutture appenniniche, che ha determinato un forte incremento della deposizione grossolana.

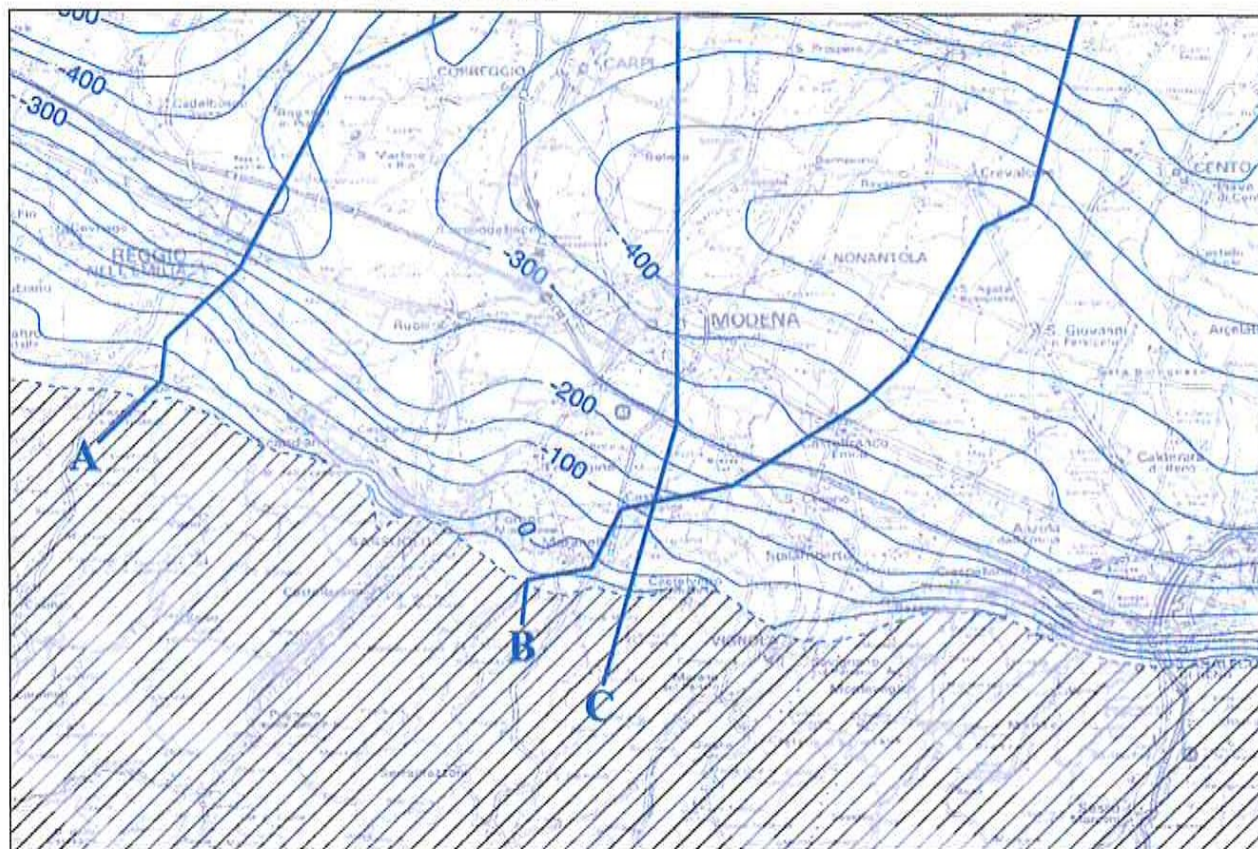
In tale Sistema si individuano cicli deposizionali ("subsistemi") che presentano una porzione inferiore costituita da litologie prevalentemente fini, per lo più argillose e le ghiaie e sabbie, quando presenti, sono spesso canalizzate e comunque molto meno estese di quelle che caratterizzano la parte superiore. Al di sopra di questa, la porzione superiore è caratterizzata da granulometrie più grossolane, limi e sabbie e ghiaie; le ghiaie hanno tetto tabulare e sono molto più estese e potenti rispetto a quelle presenti nella porzione inferiore.

Sono unità cicliche caratterizzate dall'alternarsi di due litologie; le discontinuità che dividono i subsistemi sono rappresentate nelle aree di alta pianura da paleosuoli ben sviluppati legati a periodi di interruzione della sedimentazione talora molto ampia, che hanno consentito la pedogenesi della parte sommitale dei depositi ghiaioso sabbiosi; più a valle la superficie di separazione tra due subsistemi non è più contrassegnata da paleosuoli e la superficie di separazione può essere seguita solo basandosi sulla differenza litologica.

Il sistema emiliano romagnolo inferiore è costituito prevalentemente da depositi fini con gli intervalli ghiaioso sabbiosi confinati a sud della via Emilia, mentre il sistema Emiliano Romagnolo superiore presenta alternanze di sedimenti grossolani e fini che si spingono a nord ben oltre la Via Emilia.

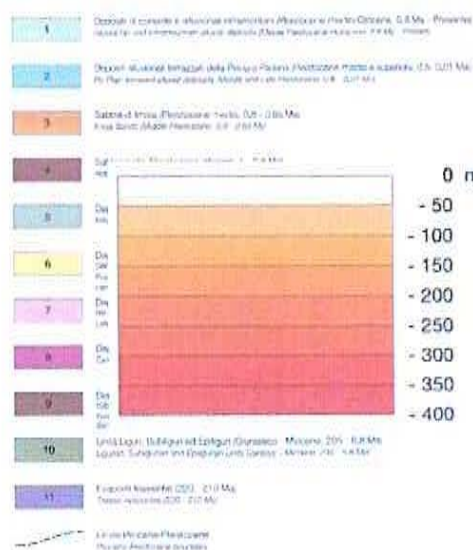
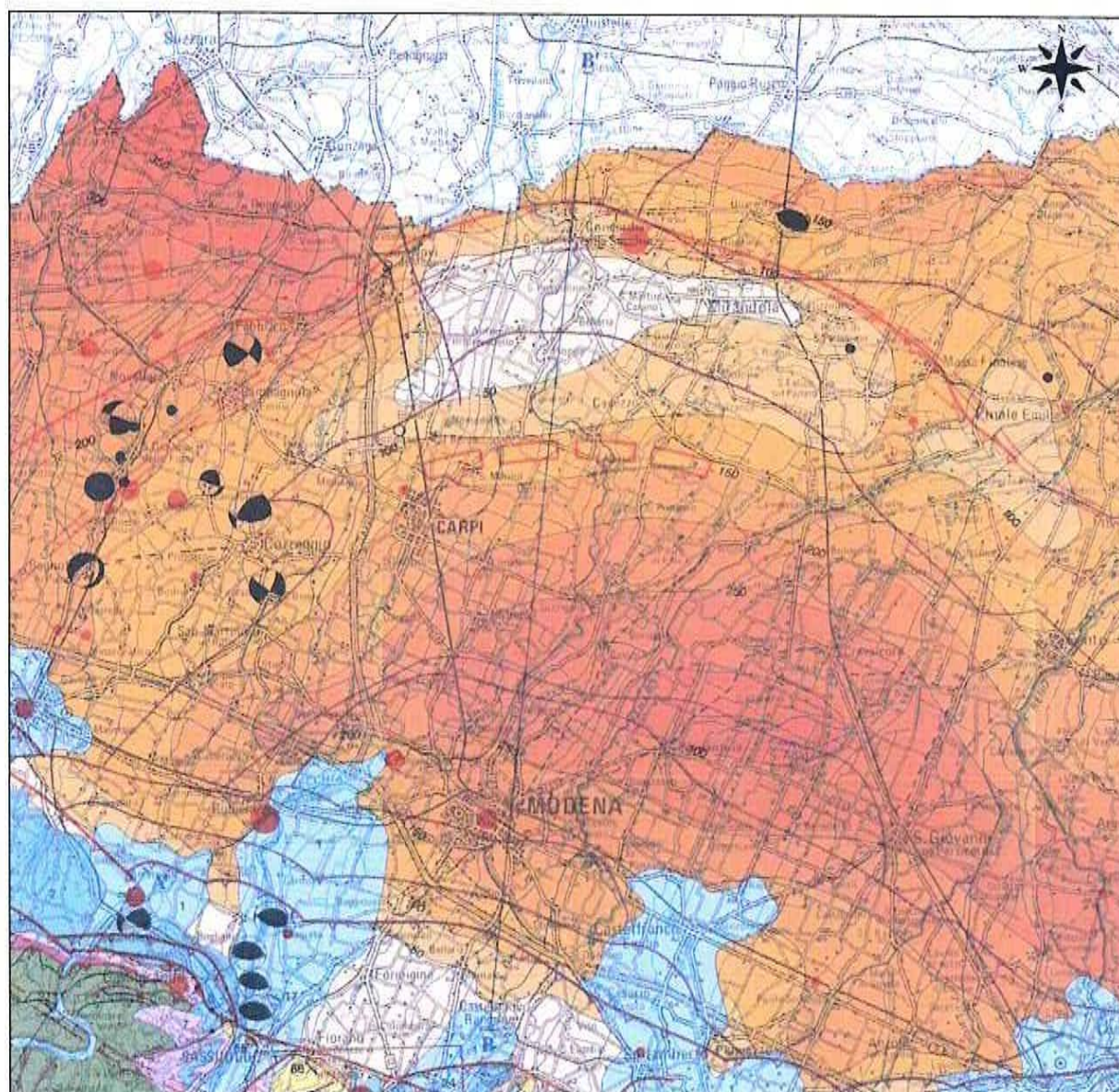
La Figura 10 individua la profondità in m. s.l.m del limite basale dei depositi continentali, con spessori di conseguenza variabili spostandosi da Sud verso Nord del territorio Comunale da circa 250 a oltre 450 metri.

Figura 10: PROFONDITÀ (IN M S.L.M.) DEL LIMITE BASALE DEI SEDIMENTI CONTINENTALI (DA NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA FOGLIO 201 MODENA)



Per quanto concerne la base del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore, quest'ultimo, come si evidenzia nella Figura 11, è collocato a profondità variabili da -100 m s.l.m. nel settore meridionale a circa -250/-300 in quello settentrionale.

Figura 11: CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA A CURA DEL SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI DELLA R.E.R. (2004) - SCALA 1: 250.000 A CURA DI MARIO BOCCALETTI E LUCA MARTELLI



0 m s.l.m.

Ma = milioni di anni
My = millions of years

Isobate della base del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore (depositi della Pianura Padana di età 0,45 Ma - Presente) riferita al livello del mare
Isobathes of the base of the Emilia-Romagna Upper System (Pliocene deposits 0,45 My - Present in age) referred to the sea level

Nel territorio Comunale affiorano i depositi del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore, di cui in Figura 12 viene riportato lo schema stratigrafico.

Figura 12: SCHEMA STRATIGRAFICO DEL SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE

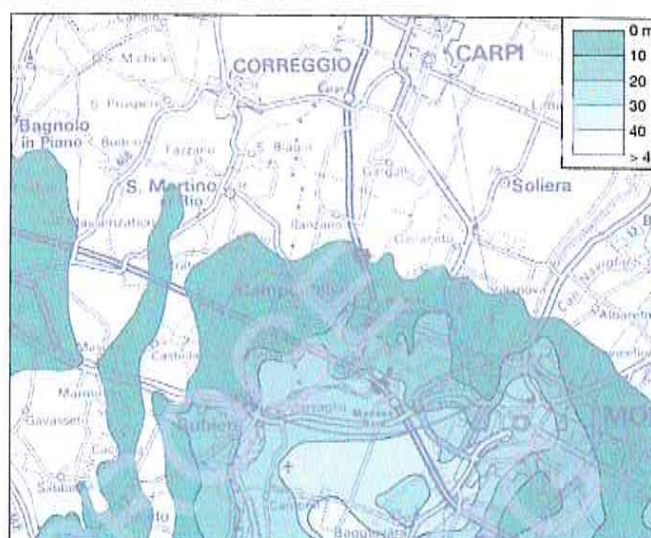
DEPOSITI QUATERNARI DEL MARGINE PADANO-ADRIATICO		
SUPERSINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO		
SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE		
☐	AES8a	SUBSINTEMA DI RAVENNA: UNITÀ DI MODENA Ghiaie, sabbie e limi. <i>Olocene</i>
☐	AES8	SUBSINTEMA DI RAVENNA Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene sup. - Olocene</i>
☐	AES7	SUBSINTEMA DI VILLA VERRUCCHIO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene sup.</i>
☐	AES7b	SUBSINTEMA DI VILLA VERRUCCHIO: UNITÀ DI VIGNOLA Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene sup.</i>
☐	AES7a	SUBSINTEMA DI VILLA VERRUCCHIO: UNITÀ DI NIVIANO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene sup.</i>
☐	AES6	SUBSINTEMA DI BAZZANO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio - sup.</i>
☐	AES5	SUBSINTEMA DI TORRE STAGNI Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio</i>
☐	AES4	SUBSINTEMA DI LIANO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio</i>
☐	AES3	SUBSINTEMA DI AGAZZANO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio</i>
☐	AES2	SUBSINTEMA DI MALATICO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio</i>
☐	AES2b	SUBSINTEMA DI MALATICO: UNITÀ DI FICO ROSSO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio</i>
☐	AES2a	SUBSINTEMA DI MALATICO: UNITÀ DI MIANO Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio</i>
☐	AES1	SUBSINTEMA DI MONTERLINZANA (<i>Sintema di Compiano</i>) Ghiaie, sabbie e limi. <i>Pleistocene medio</i>

In particolare, si individuano terreni appartenenti all'unità di Vignola (AES7b), al Subsintema di Ravenna (AES8), e all'unità di Modena (AES8a), di cui si riporta di seguito una descrizione estratta dalle note illustrative della Carta Geologica d'Italia Foglio 201 "Modena" a cura di G. Gasperi e M. Pizzolo, 2009.

Subsintema di Villa Verucchio (AES7)

E' facilmente riconoscibile nel sottosuolo a causa del corpo ghiaioso tabulare presente al tetto, alterato nelle zone di alta pianura in un suolo molto evoluto (*alfisuolo*): costituisce il gruppo di depositi terrazzati più estesi e facilmente riconoscibili delle aree pedecollinari. Potenza da 0 a 70 metri circa. L'età è pleistocenica compresa tra 120.000 anni b.p. e i 15.000 anni circa, età della più antica datazione attribuibile al subsintema di Ravenna.

Figura 13: SPESSORE GHIAIE DELLA CONOIDE DEL F. SECCHIA



Il subsistema di Villa Verucchio è costituito da limi prevalenti con subordinate ghiaie e sabbie nella porzione inferiore e da depositi prevalentemente ghiaioso-sabbiosi di conoide del fiume Secchia. Nelle aree meridionali, in prossimità del fiume Secchia l'intera unità è costituita da ghiaie. Una ulteriore suddivisione in unità di rango inferiore sono l'unità di Vignola, che comprende la parte superiore a granulometria grossolana con sedimentazione caratteristica dell'ultima fase glaciale e l'unità di Niviano, che ne rappresenta la porzione inferiore generalmente più fine che rappresenta il deposito del penultimo interglaciale. La base dell'unità è caratterizzata nel sottosuolo dall'inizio della deposizione fine susseguente alle ghiaie che caratterizzano la sommità del subsistema di Bazzano.

Il limite superiore del subsistema di Villa Verucchio è posto in corrispondenza del passaggio tra le ghiaie presenti al tetto dell'unità e i depositi prevalentemente limoso argillosi che caratterizzano la parte inferiore del successivo subsistema di Ravenna. Nelle zone meridionali le ghiaie sono intensamente pedogenizzate sino a costituire un suolo molto evoluto, testimoniando una prolungata lacuna nella sedimentazione.

Lo spessore complessivo delle ghiaie relative alla conoide del fiume Secchia raggiunge i valori massimi a sud di Modena (>40 m) e diminuisce rapidamente verso Nord e verso est e ovest della paleoconoide (Figura 13).

UNITA' DI VIGNOLA (AES7b)

E' riconoscibile soprattutto nelle aree di alta pianura ove vi è continuità laterale dei corpi ghiaiosi e il loro tetto è tabulare. E' formata da ghiaie a matrice limo-sabbiosa della conoide del fiume Secchia, che passano distalmente e lateralmente a limi e limi-sabbiosi con rare ghiaie, di ambiente di interconoide e ancora a valle a limi e limi-argillosi di piana alluvionale. La conoide del fiume Secchia è quella maggiormente cartografabile. In essa le ghiaie, ai bordi e verso valle della conoide, passano a ghiaie e sabbie e quindi a sabbie, ma meno estese delle ghiaie, e più distalmente ancora ai depositi limoso-argillosi di piana inondabile. A est della paleoconoide del Secchia sono presenti le estreme propaggini occidentali della conoide del Panaro. Per quanto concerne gli spessori delle ghiaie i massimi si hanno a sud di Modena, con oltre 20 metri, mentre spostandosi a nord e lateralmente, pur aumentando la potenza dell'unità considerata i depositi grossolani sono intercalati a quelli fini in alternanze plurimetriche e lo spessore complessivo delle ghiaie diminuisce. Nelle aree prossimali della conoide del Secchia al tetto dell'unità è presente un paleosuolo (Magreta nel Comune limitrofo di Formigine), che presenta un fronte di alterazione di circa 1.2-1.5 metri, che costituisce il limite con il sovrastante Subsistema di Ravenna. Nelle aree distali di conoide questo manca e il tetto dell'unità è posto al passaggio tra le ghiaie ed i sovrastanti depositi fini attribuiti al Subsistema di Ravenna. A valle della conoide mancano del tutto le ghiaie e non è possibile tracciare con sicurezza il limite superiore dell'unità, e viene collocato dove si verificano variazioni granulometriche, cioè dai livelli sabbiosi sottostanti si passa a livelli prevalentemente limo-argillosi. Le ghiaie dell'unità di Vignola hanno una estensione superiore a quella del sub sistema di Ravenna: infatti i depositi ghiaiosi della conoide del fiume Secchia appartenenti all'unità di Vignola si estendono sino a valle della città di Modena,

ove si rinvenivano alla profondità di 20-30 m. L'età della base è superiore a 30.000 anni B.P; l'età del tetto è più antica dei 15.000 anni B.P. La deposizione dell'Unità di Vignola sembra legata a condizioni idrauliche e climatiche diverse da quelle che caratterizzano il successivo sub sistema di Ravenna e comunque caratterizzate da maggiori portate, da maggiore carico solido e da un diverso pattern di distribuzione delle ghiaie rispetto all'attuale, e i può ipotizzare che la deposizione di tale unità sia avvenuta nel corso dell'ultima glaciazione e, forse, anche durante il periodo immediatamente successivo.

Subsistema di Ravenna (AES8)

Tale Subsistema si sviluppa in condizioni di piana inondabile, e rappresenta l'intero spessore dei sedimenti, prevalentemente fini, depositi nell'ultimo postglaciale, in parte al di sopra dell'esteso corpo ghiaioso attribuito all'unità di Vignola. La base è caratterizzata nell'area tipo da una superficie di discontinuità corrispondente ad una lacuna stratigrafica di entità variabile e marcata da un netto da un netto contrasto di facies: i depositi alluvionali dei età pleistocenica (parte sommitale di Villa Verucchio) sono sovrastati da depositi di ambiente paralico e marino-marginale riconducibili all'ultimo ciclo trasgressivo-regressivo di età olocenica. Nella zona emiliana la base del sub sistema non è facilmente riconoscibile. Nella zona di Magreta la base affiora in alcune cave, in cui limi e limi-argillosi poggiano con un contatto netto sulle ghiaie e limi di colore bruno-rossastro alterati dal paleosuolo a tetto dell'unità di Vignola.

Verso la pianura ed allontanandosi dall'asse principale dei fiumi, questo paleosuolo non è più presente, ma sono presenti solo ghiaie inalterate ed il limite inferiore del sub sistema viene posto convenzionalmente al tetto dei corpi ghiaioso-sabbiosi ad elevata estensione laterale che caratterizzano la porzione sommitale di Villa Verucchio. Ancora più a nord mancano le ghiaie ed il limite con l'unità di Vignola non è più contrassegnato da un netto cambiamento litologico, perché presumibilmente qui la sedimentazione si è sviluppata con continuità e senza grandi variazioni. In queste aree la base del sub sistema è contrassegnata da alcuni metri di argille più o meno limose alle quali sono intercalati, a profondità variabili tra 15 e 25 metri, livelli centimetrici o decimetrici di sostanza organica. Il limite superiore del sub sistema coincidente sempre con la superficie topografica, è caratterizzato dalla presenza di suoli a basso grado di alterazione con profilo di alterazione inferiore ai 150 cm.

La risalita del livello del mare dopo l'ultima fase glaciale non deve essere stata di breve durata, come sembrano indicare lo spessore relativamente potente (circa 5 metri) dei sedimenti argillosi, la frequente presenza in essi di resti organici vegetali discontinui di spessore relativamente modesto, e infine le datazioni radiometriche effettuate su questi livelli torbosi che hanno fornito età variabili tra 15.130 e 9.935 anni B.P. La sedimentazione della porzione basale del sub sistema di Ravenna di sarebbe sviluppata su una piana alluvionale mal drenata caratterizzata da estese paludi, in un arco di tempo di almeno 5000 anni.

All'intervallo basale ricco di sostanza organica segue una sedimentazione prevalentemente fine, più o meno spessa. A profondità variabili a seconda delle zone è presente un secondo livello nerastro, torboso, assai esteso lateralmente, con datato tra i 4580 e 3.970 anni B.P (7.5 – 11.6 m di profondità).

I depositi del Subsistema di Ravenna, affioranti estesamente nella parte Sud-Occidentale del territorio Comunale, sono granulometricamente fini, e vanno dalla sabbia media all'argilla, depositi in ambienti di piana alluvionale sviluppata a valle delle conoidi. Solo nelle aree a sud dell'autostrada A1 presso il fiume Secchia sono presenti i depositi ghiaiosi di conoide. A valle delle conoidi il territorio presenta una uniforme inclinazione verso NNE interrotta da blande ondulazioni positive allungate in senso N-S e NNE-SSO, rilevabili con cartografia con isoipse di 1 metro.

I depositi di questo subsistema sono il prodotto della sedimentazione prevalentemente verticale dovuta a processi di tracimazione di corsi d'acqua sinuosi, che si sviluppano a valle dei corsi d'acqua braided caratteristici delle conoidi pedemontane. I processi deposizionali hanno portato alla formazione di argini naturali prevalentemente sabbiosi, crevasse e piane inondabili limose e argillose, mentre la migrazione dei menadi e delle barre di mendo ha condotto alla deposizione di corpi sabbiosi nastriformi allungati nel senso di scorrimento delle acque.

La parte superiore del Subsistema, sino al piano di campagna, è caratterizzata da maggiore frequenza di livelli sabbioso limosi o limoso argillosi con frequenti intercalazioni sabbiose, a testimonianza di un aumento areale degli ambienti di argille e di rotta fluviale legati ad una maggiore dinamica dei corsi d'acqua.

La sedimentazione grossolana, ghiaiosa che si rinviene alla base dell'unità in eteropia con i livelli argillosi torbosi, è localizzata nelle aree prossime al fiume Secchia, e nel suo insieme si presenta drasticamente più ridotta rispetto a quella dell'Unità di Vignola.

La potenza massima del sub sistema supera i 20 metri. Lo spessore aumenta, oltre che allontanandosi dalla catena, anche lateralmente agli assi vallivi principali; a Magreta si registrano spessori di 3.5 m, spostandosi verso est superano i 10 metri. Infatti il sub sistema aggrada su una topografia più articolata dell'attuale, legata alla precedente fase deposizionale prevalentemente ghiaiosa e a morfologia convessa dell'Unità di Vignola. L'età è pleistocenica superiore-olocenica. Le datazioni della base oscillano tra i 15.000 e 9.000 circa BP.

Unità di Modena (AES8a)

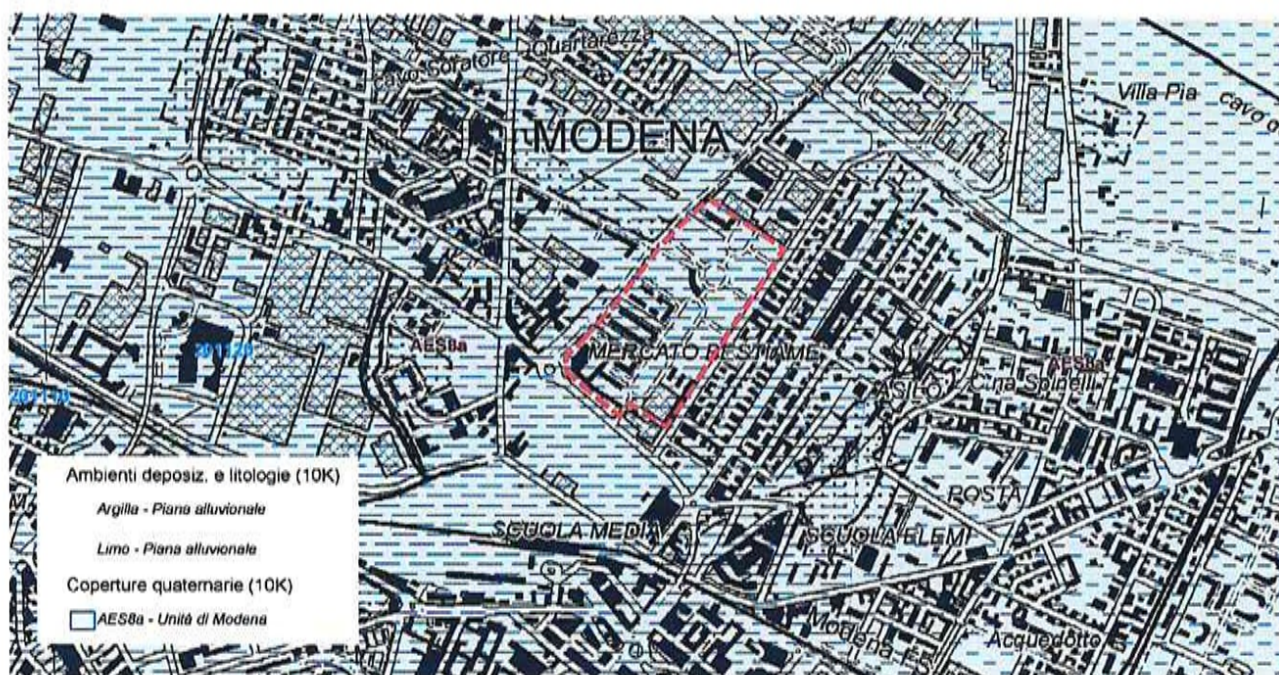
Tale unità, affiorante estesamente su tutto il territorio comunale, è caratterizzata dalla presenza al tetto di un suolo a bassissimo grado di alterazione con profilo di alterazione inferiore a 100 cm. Ad essa appartengono i sedimenti depositi dopo l'età romana (post V secolo d.C.). La base dell'unità è ben riconoscibile dalla presenza di un suolo evoluto al tetto del subsistema di Ravenna. L'unità di Modena è suddivisa ulteriormente in base alla granulometria dei depositi affioranti; le ghiaie affiorano nelle aree circostanti il fiume Secchia, le sabbie sono poco diffuse mentre limi e le argille costituiscono la litologia prevalente.

Nel sottosuolo della città al di sopra delle ghiaie dell'unità di Vignola abbiamo il subsistema di Ravenna che qui appare a costituzione relativamente omogenea, essendo formata da argille con la presenza sporadica di piccoli corpi lenticolari limo-sabbiosi. A profondità tra i 5 e 8 metri dal piano campagna è presente l'unità di Modena; la litologia è prevalentemente argillosa, frequenti vi si intercalano lenti estese anche oltre la decina di metri, limose e sabbiose, evidentemente legate a corsi d'acqua, che si ripetono spesso sulla stessa verticale. Frequenti sono pure le lenti torbose che nella periferia sud della città appaiono costituire, alla profondità di 2 metri, un corpo esteso con spessori anche superiori ai 3 metri. Nel sottosuolo della città sono caratteristici della unità valori modesti di consistenza di solito molto inferiori rispetto a quelli che caratterizzano il sottostante Subsistema di Ravenna. La base è molto irregolare e sembra colmare precedenti solchi di canali e torrenti.

I fenomeni alluvionali che seppellirono Modena sembrano legati prevalentemente a un torrente, denominato fossa di Spezzano, deviato in Secchia tra il XV e il XVI secolo a monte della città poiché con le sue piene inondava frequentemente la periferia della città, che precedentemente proseguiva a valle della deviazione secondo l'attuale Rio Corlo.

Lo spessore può raggiungere gli 8 metri, profondità alla quale si rinviene il piano archeologico romano in alcune aree della città di Modena. L'età è post V sec - Attuale.

Figura 14: ESTRATTO DI CARTA GEOLOGICA REDATTA DAL SERVIZIO GEOLOGICO DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA - SCALA 1:10.000

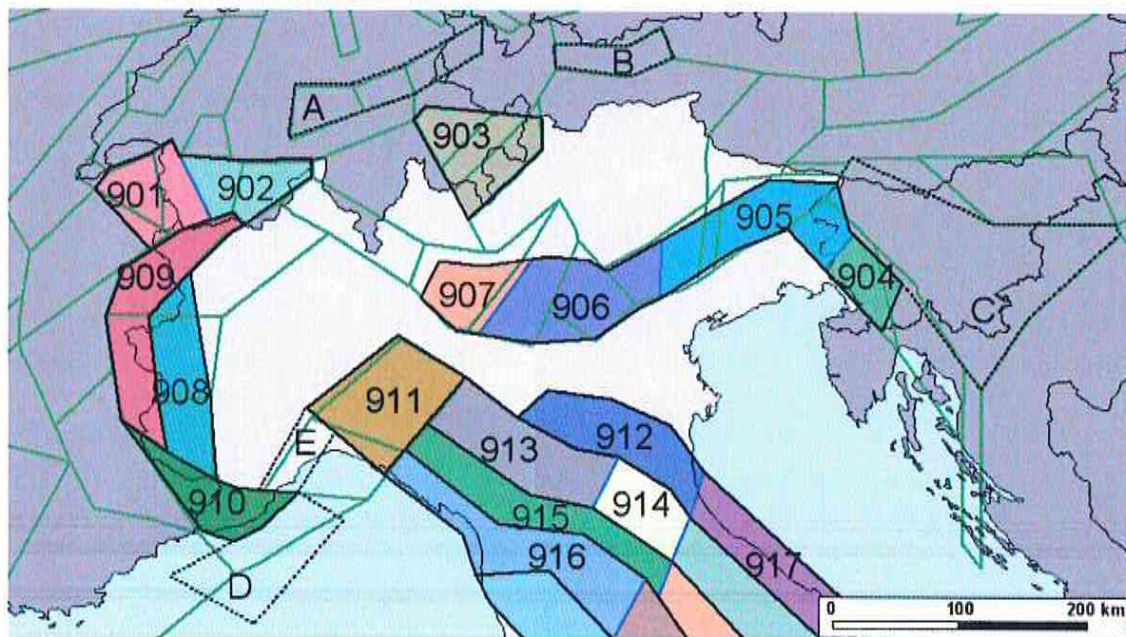


5 SISMICITA'

5.1 ZONIZZAZIONE SISMICA NAZIONALE E REGIONALE

Il punto di riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica è rappresentato dalla zonazione sismogenetica ZS9 (Scandone et al. 1996 - 2000) che rappresenta la traduzione operativa del modello sismotettonico riassunto in Meletti et al. (2000). In seguito all'emanazione dell'O.P.C.M. 20.3.2003, n. 3274 è stato redatto, a cura di un gruppo di lavoro dell'INGV, un documento denominato "Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall' O.P.C.M. 20-3-2003, n. 3274. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici".

Figura 15: ZONIZZAZIONE SIMOGENETICA ZS9



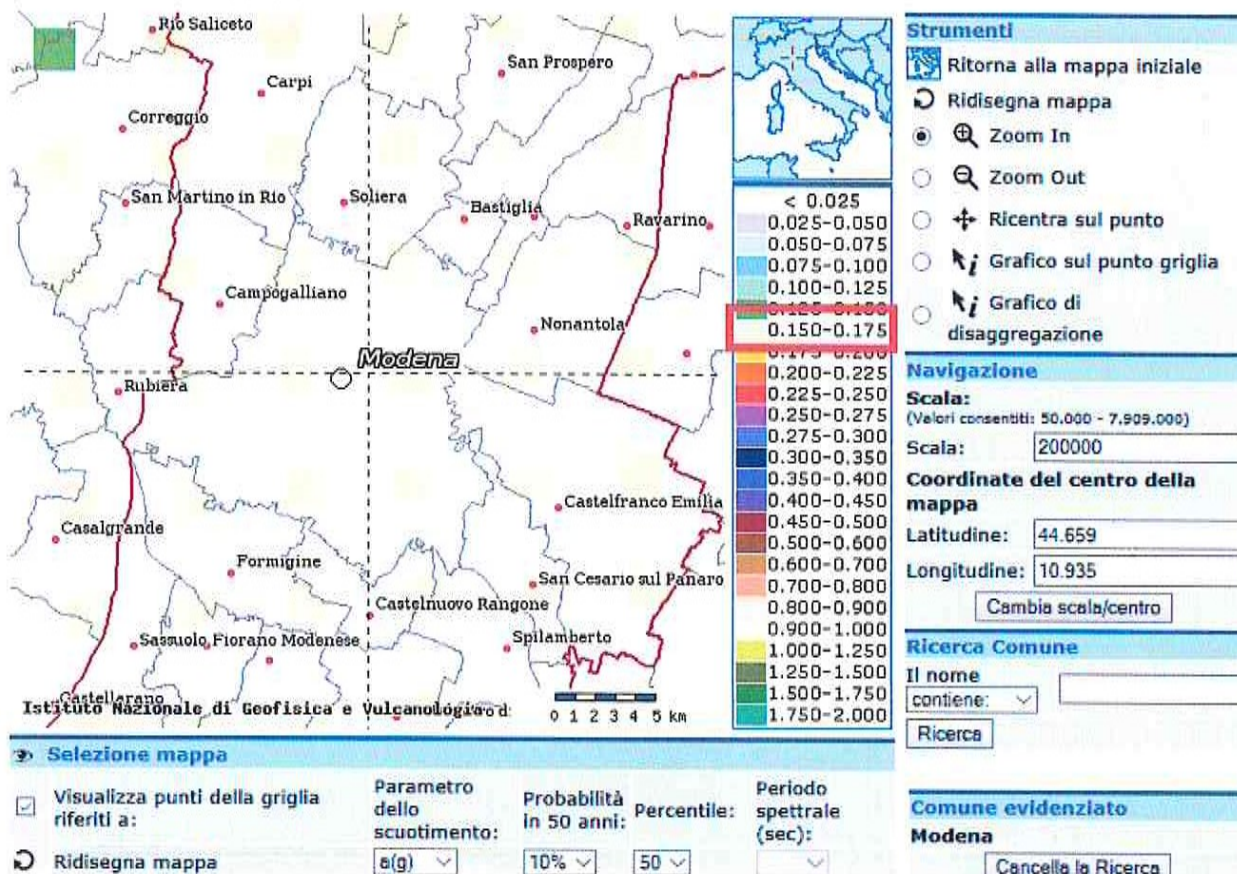
Tale modello ha utilizzato come base di partenza la precedente zonazione, con inserimento delle nuove conoscenze relative alla tettonica attiva della penisola italiana con anche le indicazioni derivanti da episodi sismici più recenti. La zonizzazione è stata costruita, pertanto, mediante l'analisi cinematica degli elementi geologici, cenozoici e quaternari, coinvolti nella dinamica delle strutture litosferiche profonde e della crosta superficiale. Il confronto tra le informazioni ha permesso di costruire la carta del modello geodinamico e la sismicità osservata utilizzata per la costruzione della carta nazionale delle zone sismogenetiche. I dati relativi alla sismicità osservata sono stati desunti dal catalogo storico il quale contiene 2.488 eventi degli ultimi 1.000 anni con intensità epicentrali maggiore o uguale al V – VI grado MCS con magnitudo pari o maggiore a 4.

Per ogni zona sismogenetica è stata effettuata la caratterizzazione da un definito modello cinematico basato sulle relazioni di attenuazioni stimate delle misure accelerometriche rilevate sia sul territorio nazionale che europeo, con conseguente sviluppo delle carte di pericolosità sismica.

Il risultato finale raggiunto è rappresentato da una stima del rischio sismico espresso in termini probabilistici per ogni comune del territorio italiano. Il valore della pericolosità sismica di riferimento, PGA (Peak Ground Acceleration), ipotizza un substrato omogeneo roccioso associato ad un periodo di ritorno di 475 anni, valore convenzionale in quanto rappresenta l'accelerazione associata alla probabilità del 90% di non superamento considerato un tempo di ritorno di 50 anni.

La zona oggetto di studio si posiziona internamente alla zona sismogenetica nr. 912, che appartiene al complesso "Dorsale Ferrarese" per la quale è stato assegnato un valore di magnitudo massima pari a $Mw_{max} = 6,14$.

Figura 16: CARTA DELLA PERICOLOSITA' SISMICA ESPRESSA IN ACCELERAZIONE ORIZZONTALE DI PICCO PGA CON TEMPO DI RITORNO 475 ANNI



Con riferimento all'O.P.C.M. del 20.03.2003 n. 3274 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e successive modifiche (O.P.C.M. del 02.10.2003 n. 3316 e O.P.C.M. del 03.05.2005 n. 3431) e all'O.P.C.M. del 28.04.2006 n. 3519, vengono definiti i criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche. Le "Norme tecniche" suddividono il territorio nazionale in 4 zone sismiche, caratterizzate da 4 diversi valori di accelerazione orizzontale massima convenzionale (a_g) su suolo di tipo A, alle quali viene ancorato lo spettro di risposta elastico. Ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo (a_g), con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30} > 800$ m/sec.

Zona	Accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni $[a_g]$	Accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico $[a_g]$
1	$0,25 < a_g \leq 0,35$ g	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25$ g	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15$ g	0,15 g
4	$\leq 0,05$ g	0,05 g

Di seguito si riporta la zonizzazione relativa al territorio della Regione Emilia-Romagna

Figura 17: MAPPA DELLA RICLASSIFICAZIONE SISMICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA – ORDINANZA DEL PCM N. 3247/2003 – AGGIORNAMENTO LUGLIO 2018

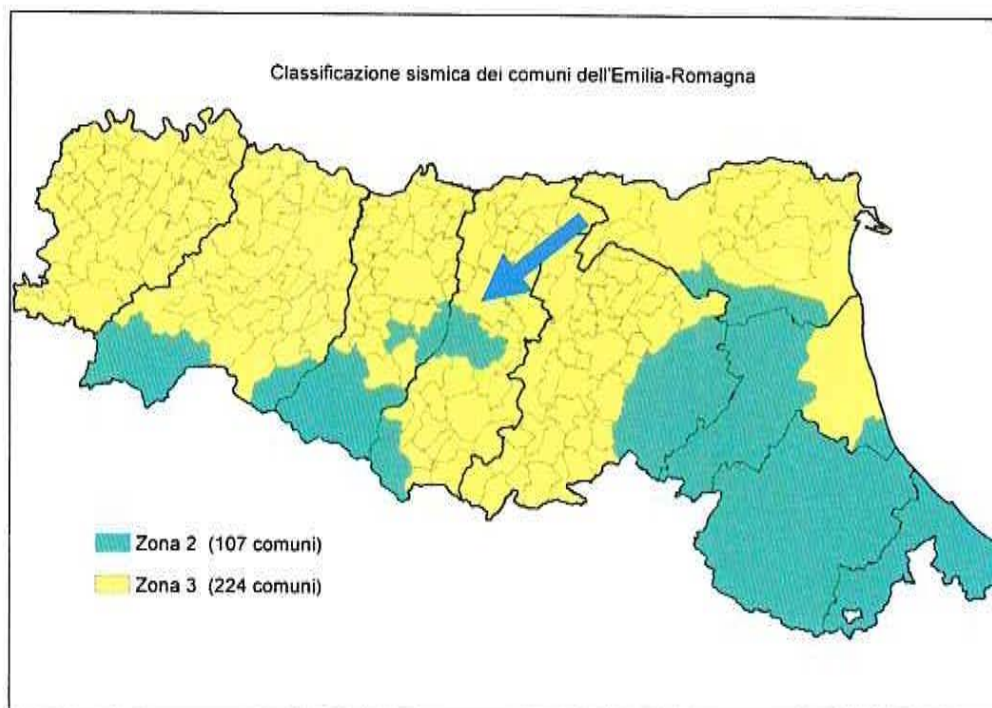
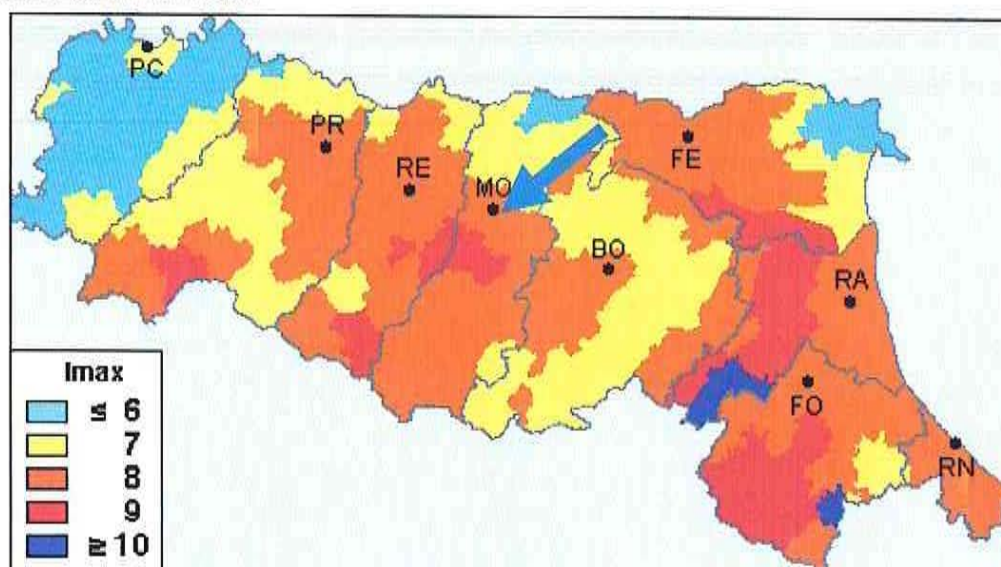


Figura 18: MAPPA DELLE MASSIME INTENSITA' MACROSISMICHE OSSERVATE NEI COMUNI ITALIANI - PARTICOLARE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA



Con riferimento all'O.P.C.M. del 20.03.2003 n. 3274 il **Comune di Modena (MO)** ricade in zona sismica 3.

Con riferimento all'O.P.C.M. del 28.04.2006 n. 3519 al **Comune di Modena (MO)** è attribuito un valore di pericolosità sismica compreso tra 0,150 e 0,175.

Per quanto riguarda l'aspetto macrosismico della zona in esame, dallo studio effettuato da D. Molin, M. Stucchi e G. Valensise (1996) per conto del Dipartimento della Protezione Civile con l'utilizzo della banca dati del GNDT e il Catalogo dei Forti Terremoti Italiani di ING/SGA, il **Comune di Modena (MO)** presenta un'intensità macrosismica I_{max} pari a 8.

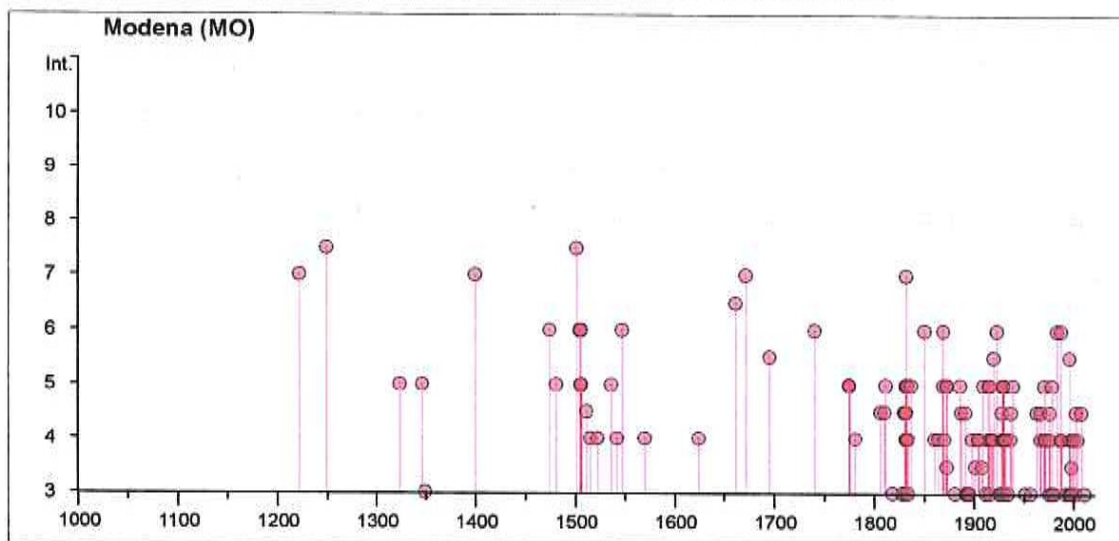
5.2 SISMICITA' STORICA

La sismicità storica del **Comune di Modena (MO)** è stata desunta mediante la consultazione del database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPT15 (Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>)

Il database è stato realizzato nell'ambito delle attività del TTC (Tema Trasversale Coordinato) "Banche dati e metodi macrosismici" dell'INGV, con il contributo parziale del Dipartimento della Protezione Civile.

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 - Database Macrosismico Italiano 2015	
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	
Seismic history of	Modena
PlaceID	IT_38628
Coordinates (lat, lon)	44.647, 10.926
Municipality (ISTAT 2015)	Modena
Province	Modena
Region	Emilia-Romagna
No. of reported earthquakes	169

Figura 19: DIAGRAMMA RAPPRESENTANTE LA STORIA SISMICA DEL COMUNE DI MODENA



Nelle tabelle riportate nelle pagine successive sono elencati gli eventi sismici che hanno interessato l'area del Comune di Modena

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
7	1222 12 25 12 30	Bresciano-Veronese	18	7-8	5.68
7-8	1249 09	Modena	2	6-7	4.86
5	1323 02 25 19	Bologna	2	5	4.16
5	1346 02 08	Modena	1	5	4.16
HF	1348 01 25	Alpi Giulie	89	9	6.63
3	1349 09 09 08 15	Viterbese	9		
7	1399 07 20 23	Appennino modenese	6	7	5.1
6	1474 03 11 20 30	Modena	3	5	4.16
5	1481 02 07 22 45	Pianura emiliana	2	5	4.16
7-8	1501 06 05 10	Modenese	17	9	6.05
6	1504 12 31 04	Bolognese	15	6	5.02
6	1505 01 03 02	Bolognese	31	8	5.62
5	1505 01 20 23 50	Bolognese	11	5-6	4.76
5	1505 01 27 02 40	Bolognese	2	5	4.16
4-5	1511 03 26 15 30	Friuli-Slovenia	120	9	6.32
4	1515 10 25 12 35	Pianura Padana	5		
4	1522 10 05 00 10	Pianura Padana	6	5	4.71
5	1536 08 17 00 05	Appennino settentrionale	10	6-7	5.12
4	1542 06 13 02 15	Mugello	46	9	6.02
6	1547 02 10 13 20	Reggiano	7	7	5.1
F	1561 11 24 01 25	Ferrarese	3	5-6	4.4
4	1570 11 17 19 10	Ferrarese	58	7-8	5.44
F	1608 01 06 22 20	Reggio nell'Emilia	2	5-6	4.4
4	1624 03 19	Argenta	18	7-8	5.43
6-7	1661 03 21 23	Modenese	4	6-7	4.86
F	1661 03 22 12 50	Appennino forlivese	79	9	6.05
7	1671 06 20 10	Modenese-Reggiano	8	7	5.27
5-6	1695 02 25 05 30	Asolano	107	10	6.4
6	1740 03 06 05 40	Garfagnana	32	8	5.64
5	1775 01 04 18	Appennino emiliano	6	4	4.43
5	1775 01 05 22 45	Appennino emiliano	7	5	4.55
F	1779 07 14 19 30	Bolognese	17		
F	1779 11 23 18 30	Bolognese	14	5	4.7
F	1779 12 24 17	Appennino pistoiese	9	5-6	4.59
4	1781 04 04 21 20	Faentino	96	9-10	6.12
4-5	1806 02 12	Reggiano	28	7	5.21
4-5	1810 12 25 00 45	Pianura emiliana	33	6	5.06
5	1811 07 15 22 44	Modenese-Reggiano	19	6-7	5.13
3	1818 12 09 18 55	Parmense	26	7	5.24
3	1828 10 09 02 20	Oltrepò Pavese	110	8	5.72
4-5	1830 01 26 04 30	Alto Reno	11	5	4.53
3	1831 07 14 15 30	Reggiano	8	5-6	4.6
4-5	1831 09 11 18 15	Pianura emiliana	25	7-8	5.48
4	1832 03 11 06 45	Carpi	14	5	4.51
4-5	1832 03 11 08 45	Parmense	14		
4	1832 03 12 08 45	Reggiano	7		
7	1832 03 13 03 30	Reggiano	97	7-8	5.51
5	1832 03 14 04 40	Reggiano	5		
5	1832 03 14 07 41	Reggiano	7		
4	1832 04 19 14 14	Reggiano	5		
4	1834 02 14 13 15	Val di Taro-Lunigiana	112	9	5.96
3	1834 07 04 00 45	Val di Taro-Lunigiana	24	6-7	5.08
5	1834 10 04 19	Bolognese	12	6	4.71
5	1837 04 11 17	Lunigiana	60	9	5.94
F	1846 08 14 12	Colline Pisane	121	9	6.04
6	1850 09 18 06 20	Modenese	7	5	4.16
F	1854 06 16 13 25	Imola	9	5	4.57

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
F	1857 02 01	Parmense-Reggiano	22	6-7	5.11
4	1860 07 17 13 43 31.00	Reggiano	5	4-5	3.93
4	1864 03 15	Zocca	13	6-7	4.84
6	1869 06 25 13 58	Appennino bolognese	18	7-8	5.43
5	1869 12 13 02 53	Sassuolo	13	5	4.57
4	1870 10 30 18 34	Forlivese	41	8	5.61
F	1871 01 22 21 30	Pianura romagnola	8	6	4.95
2-3	1873 03 12 20 04	Appennino marchigiano	196	8	5.85
5	1873 05 16 19 35	Reggiano	15	6-7	5.01
5	1873 06 29 03 58	Alpago Cansiglio	197	9-10	6.29
3-4	1873 09 17	Appennino tosco-ligure	64	6-7	5.26
F	1874 10 07	Imolese	60	7	4.96
3	1881 01 24 16 14	Bolognese	38	7	5.22
F	1885 02 26 20 48	Pianura Padana	78	6	5.01
5	1886 10 15 02 20	Collecchio	44	6	4.7
4-5	1887 02 23 05 21 50.00	Liguria occidentale	1511	9	6.27
4-5	1891 06 07 01 06 14.00	Valle d'Ilasi	403	8-9	5.87
NF	1891 08 01 13 32 22.00	Lugo	15	4-5	4.36
3	1892 01 05	Garda occidentale	93	6-7	4.96
3	1892 05 17 03 08 15.00	Carpineti	28	5	4.28
NF	1894 02 09 12 48 05.00	Valle d'Ilasi	116	6	4.74
3	1894 11 27 05 07	Bresciano	183	6	4.89
3	1895 05 18 19 55 12.00	Fiorentino	401	8	5.5
3	1895 08 07 19 49 32.00	Appennino tosco-emiliano	84	5	4.67
4	1898 03 04 21 05	Parmense	313	7-8	5.37
2	1899 06 26 23 17 22.00	Valle del Bisenzio	138	7	5.02
3-4	1901 10 30 14 49 58.00	Garda occidentale	289	7-8	5.44
F	1902 08 04 22 36 10.00	Lunigiana	60	6	4.78
F	1902 12 04 16 35 01.00	Lunigiana	36	5	4.35
NF	1903 07 27 03 46	Lunigiana	79	7-8	5.19
4	1904 02 25 18 47 50.00	Reggiano	62	6	4.81
4	1904 06 10 11 15 28.00	Frignano	101	6	4.82
NF	1904 11 17 05 02	Pistoiese	204	7	5.1
3-4	1908 06 02 22 30	Frignano	18	4-5	4.5
5	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
NF	1910 03 22 23 29	Bassa modenese	15	5	4.16
2	1911 02 19 07 18 30.00	Forlivese	181	7	5.26
3	1912 09 12 21 15	Carpi	13	4	3.76
5	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5.63
4	1915 01 13 06 52 43.00	Marsica	1041	11	7.08
4	1915 10 10 23 10	Reggiano	30	6	4.87
3	1916 05 17 12 50	Riminense	132	8	5.82
F	1916 07 27 18 38	Garfagnana	22	5-6	4.56
5	1916 08 16 07 06 14.00	Riminense	257	8	5.82
4	1918 05 06 08 05	Reggiano	8	5-6	4.41
4	1918 11 10 15 12 28.00	Appennino forlivese	187	9	5.96
4	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	565	10	6.38
5-6	1920 09 07 05 55 40.00	Garfagnana	750	10	6.53
NF	1920 10 06 22 47	Mantovano	19	4-5	4.14
6	1923 06 28 15 12	Modenese	22	6	5.04
3	1926 01 01 18 04 03.00	Carniola interna	63	7-8	5.72
3	1927 11 20 10 24 12.00	Appennino reggiano	16	5	4.29
4	1928 06 13 08	Carpi	35	6	4.67
4-5	1928 07 25 01 25	Carpi	3	4-5	3.93
4	1929 04 10 05 44	Bolognese	87	6	5.05
NF	1929 04 12 00 32	Bolognese	7	4	4.82
5	1929 04 19 04 16	Bolognese	82	6-7	5.13

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
5	1929 04 20 01 10	Bolognese	109	7	5.36
4	1929 04 22 08 26	Bolognese	41	6-7	5.1
5	1929 04 29 18 36	Bolognese	45	6	5.2
5	1929 05 11 19 23	Bolognese	64	6-7	5.29
4	1930 10 24 00 52	Appennino tosc-emiliano	12	4	3.97
3	1930 10 26 07 14	Appennino tosc-emiliano	14	4	4.21
4	1930 10 26 07 31	Modenese	11	4	4.12
4	1931 06 10 17 02	Modenese	14	4	4.59
4	1932 04 19 00 17	Modenese	9	4	3.63
3	1934 06 13 09 06	Val di Taro-Lunigiana	29	6	5.14
4	1936 10 18 03 10	Alpago Cansiglio	269	9	6.06
4-5	1937 12 10 18 04	Frignano	28	6	5.3
5	1939 10 15 14 05	Garfagnana	62	6-7	4.96
2	1939 10 31 06 47	Lunigiana	19	5-6	4.85
3	1951 05 15 22 54	Lodigiano	179	6-7	5.17
3	1957 08 27 11 54	Appennino modenese	58	5	4.73
4-5	1963 11 04 15 46	Bassa modenese	5	5	4.16
NF	1965 11 09 15 35	Appennino reggiano	32	5	4.17
4-5	1967 04 03 16 36 18.00	Reggiano	45	5	4.44
4	1967 12 30 04 19	Emilia Romagna orientale	40	6	5.05
5	1971 07 15 01 33 23.00	Parmense	228	8	5.51
4	1971 09 11 23 18 12.00	Pianura emiliana	15	5	4.19
4	1972 10 25 21 56 11.31	Appennino settentrionale	198	5	4.87
4-5	1976 05 06 20	Friuli	770	9-10	6.45
3	1976 09 11 16 35 02.44	Friuli	40	7-8	5.6
4	1976 09 15 09 21 19.01	Friuli	54	8-9	5.95
3	1978 12 05 15 39 04.00	Romagna	34	4-5	4.61
5	1978 12 25 22 53 41.00	Bassa modenese	28	5	4.39
NF	1980 11 23 18 34 52.00	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
3	1980 12 23 12 01 06.00	Piacentino	69	6-7	4.57
6	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	850	6-7	5.04
NF	1984 04 29 05 02 59.00	Umbria settentrionale	709	7	5.62
2-3	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	604	6	4.43
6	1987 05 02 20 43 53.32	Reggiano	802	6	4.71
4	1987 05 08 11 10 27.88	Bassa modenese	24	6	4.44
2	1988 02 08 11 24 46.14	Garfagnana	75	6	4.34
4	1988 03 15 12 03 16.17	Reggiano	160	6	4.57
3	1992 04 17 11 59 07.29	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
3	1995 08 24 17 27 33.00	Appennino pistoiese	56	6	4.45
2-3	1995 10 10 06 54 21.72	Lunigiana	341	7	4.82
5-6	1996 10 15 09 55 59.95	Pianura emiliana	135	7	5.38
4	1996 10 26 04 56 54.10	Pianura emiliana	63	5-6	3.94
4	1996 12 16 09 09 53.08	Pianura emiliana	115	5-6	4.06
3	1997 05 12 22 13 52.50	Pianura emiliana	56	4-5	3.68
3	1997 09 26 09 40 26.60	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
3-4	1998 02 21 02 21 13.30	Pianura emiliana	104	5	3.93
3	1998 03 26 16 26 17.03	Appennino umbro-marchigiano	409		5.26
4	1999 07 07 17 16 12.59	Frignano	32	5	4.67
4	2000 06 18 07 42 07.68	Pianura emiliana	304	5-6	4.4
3	2002 06 08 20 13 07.10	Frignano	115	4	4.23
NF	2002 06 18 22 23 38.10	Frignano	186	4	4.3
4-5	2003 09 14 21 42 53.18	Appennino bolognese	133	6	5.24
4	2004 11 24 22 59 38.55	Garda occidentale	176	7-8	4.99
4-5	2008 12 23 15 24 21.77	Parmense	291	6-7	5.36
3	2011 07 17 18 30 27.31	Pianura lombardo-veneta	73	5	4.79

5.3 MICROZONAZIONE SISMICA DI II° LIVELLO

Dall'analisi dello studio di microzonazione sismica del Comune di Modena, l'area in esame si colloca internamente alle seguenti zone:

3070: zone instabili per sovrapposizione di instabilità differenti (liquefazioni e cedimenti differenziali)

3080: zone instabili per liquefazione

Per tali zone dallo studio di microzonazione sismica gli effetti sismici attesi ricomprendono l'amplificazione stratigrafica, la potenziale liquefazione e cedimenti differenziali.

Lo studio di Microzonazione sismica prevede approfondimenti di III livello per la stima dei cedimenti differenziali e per la valutazione della suscettività alla liquefazione

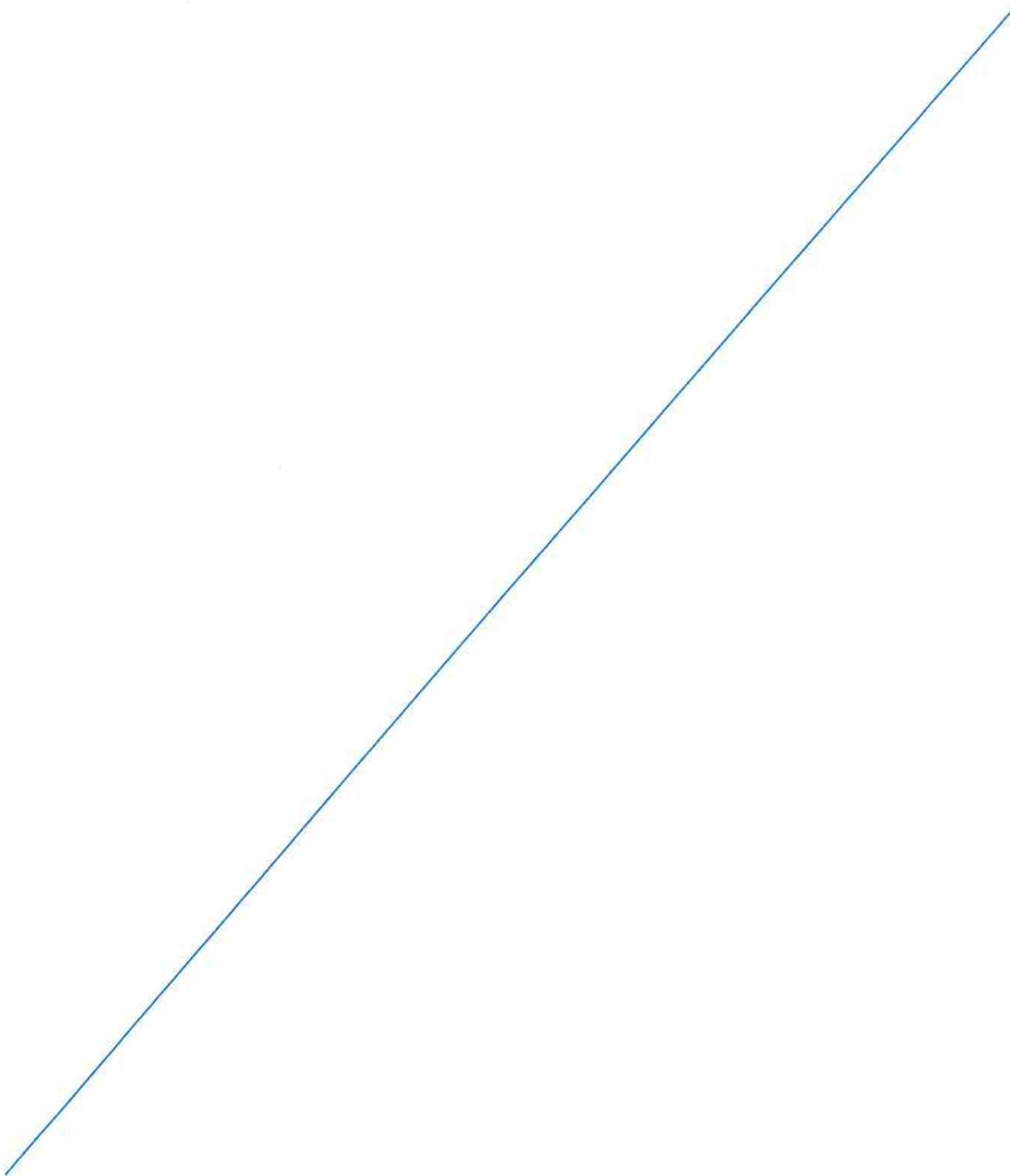
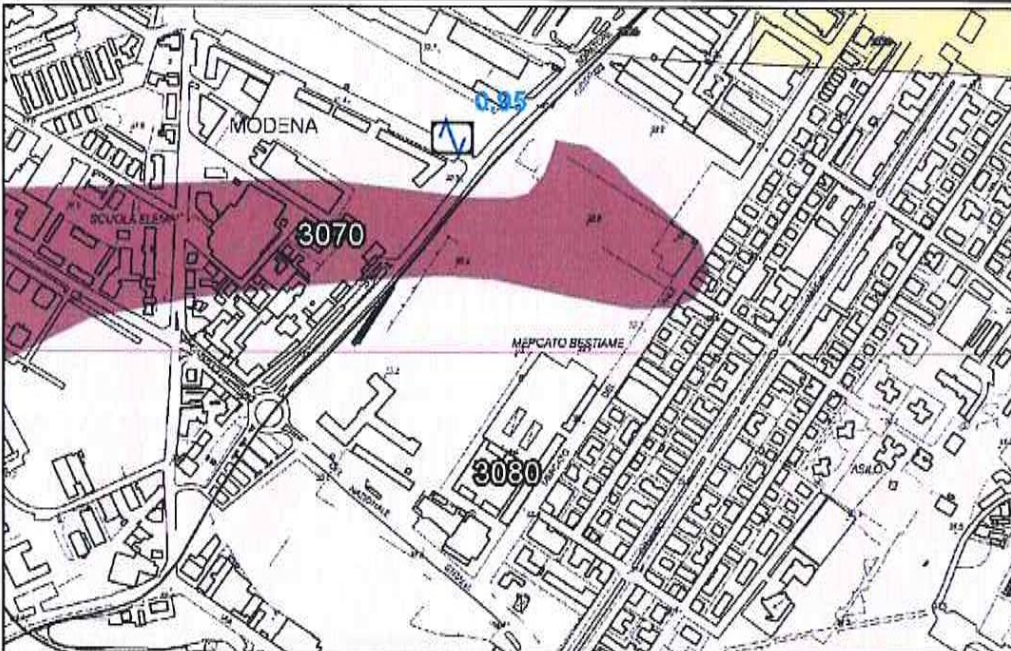


Figura 20: ESTRATTO DELLA CARTA I LIVELLO DI APPROFONDIMENTO – MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA DEL COMUNE DI MODENA

Provincia di Modena

MOP



Provincia di Modena

Inquadramento
territoriale



Scala 1:5000

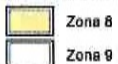
SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

Provincia di Modena

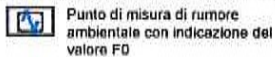
MOP

Legenda

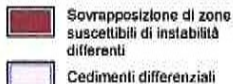
Zone stabili suscettibili di



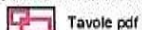
Punti di misura di rumore ambientale



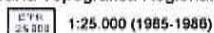
Zone suscettibili di instabilità



Quadro d'unione delle tavole



Carta Topografica Regionale

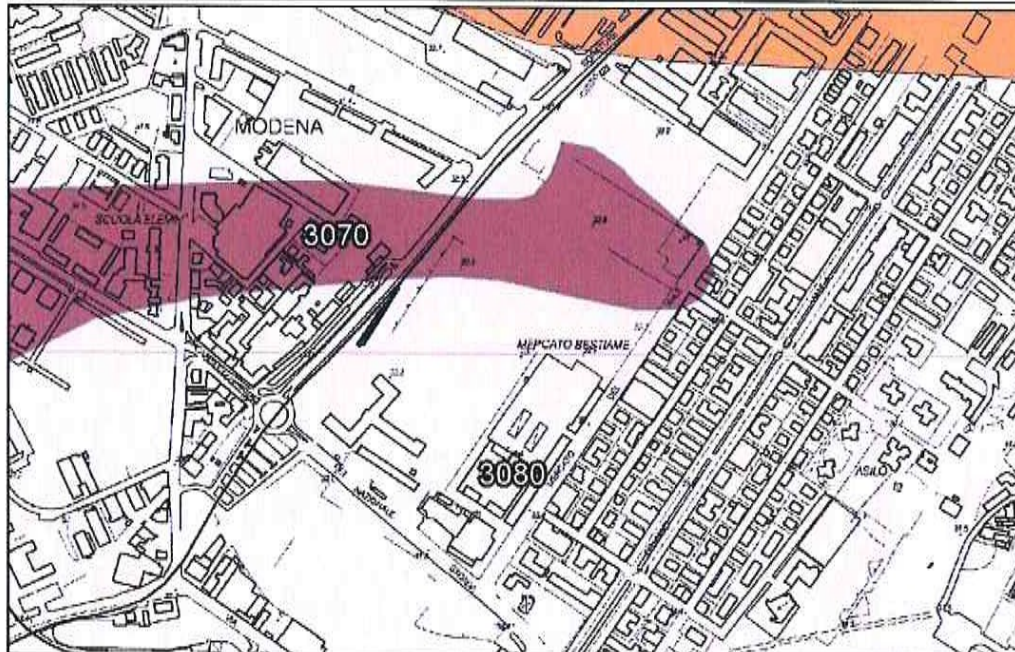


SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

Figura 21: CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DELLA PGA

Provincia di Modena

FA-PGA



Provincia di Modena

Inquadramento
territoriale



Scala 1:5000

SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

Provincia di Modena

FA-PGA

Legenda

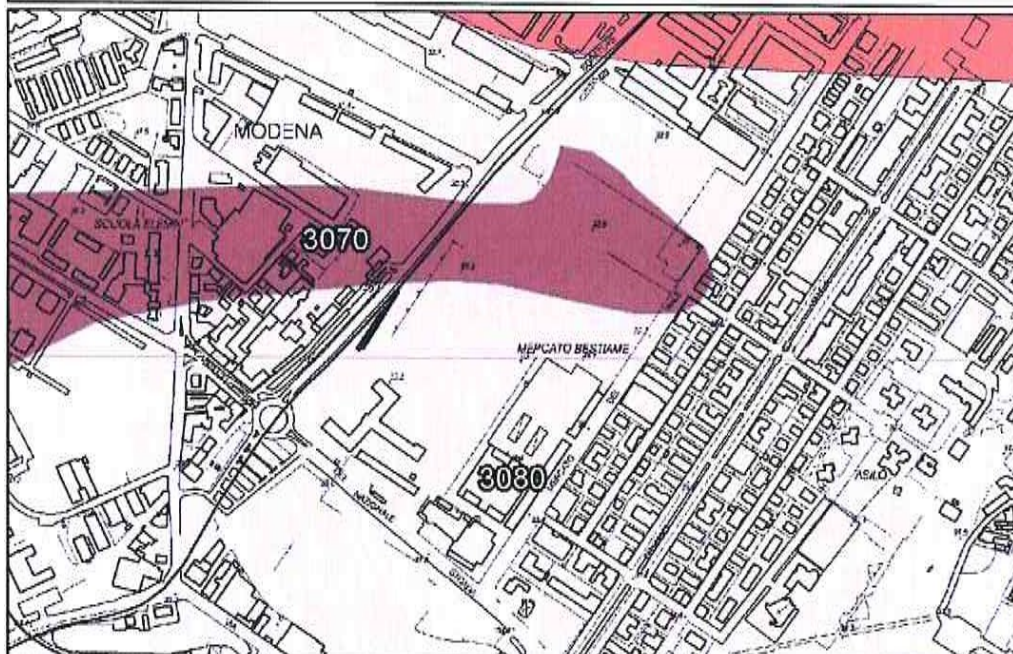
- Zone stabili suscettibili di
 - Fa PGA = 1,7-1,8
- Zone di attenzione per instabilità
 - Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti
 - Cedimenti differenziali
- Inquadramento
 - Tavole pdf
- Carta Topografica Regionale
 - 1:25.000 (1985-1988)

SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

Figura 22: CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DELLE INTENSITA' DI HOUSNER INTERVALLO 0.1-0.5 S

Provincia di Modena

FA IS (0.1-0.5S)



Provincia di Modena

Inquadramento
territoriale

Scala 1:5000

SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

Provincia di Modena

FA IS (0.1-0.5S)

Legenda

Zone stabili suscettibili di

 Fa IS (0.1-0.5) = 1.9-2.0

Zone di attenzione per instabilità

-  Cedimenti differenziali
-  Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti

Inquadramento

 Tavole pdf

Carta Topografica Regionale

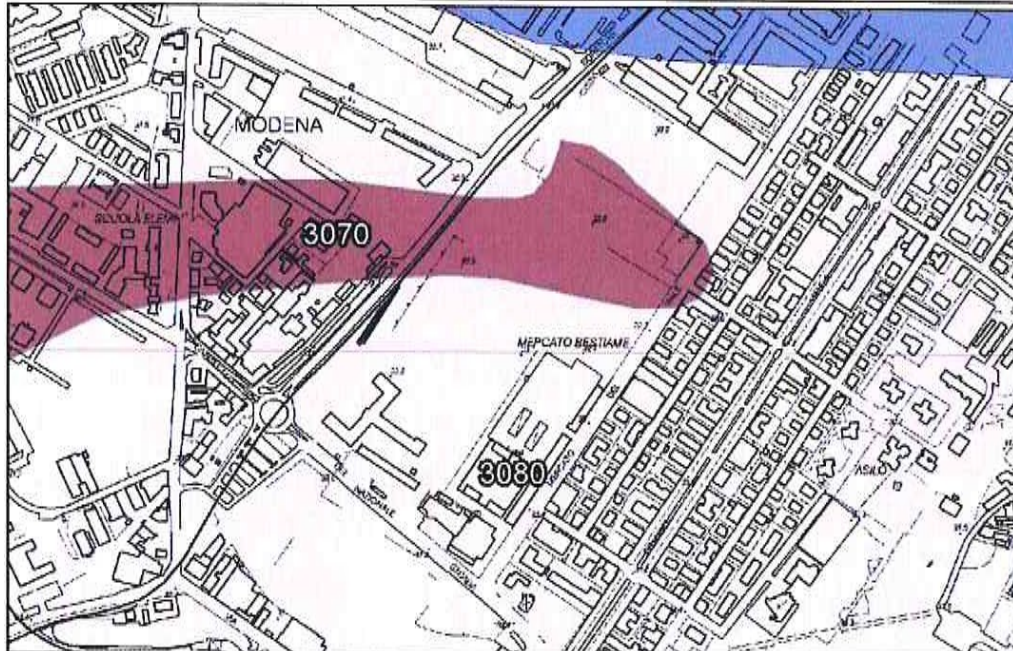
 1:25.000 (1985-1990)

SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

Figura 23: CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DELLE INTENSITA' DI HOUSNER INTERVALLO 0.5-1.0 S

Provincia di Modena

FA IS (0.5-1.0S)



Provincia di Modena

Inquadramento
territoriale



Scala 1:5000

SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

Provincia di Modena

FA IS (0.5-1.0S)

Legenda

Zone stabili suscettibili di

Fa IS (0.5-1.0) ≥ 2.5

Zone di attenzione per instabilità

Sovrapposizione di zone
suscettibili di instabilità
differenti

Cedimenti differenziali

Inquadramento

Tavole pdf

Carta Topografica Regionale

CTR
1:25.000 (1965-1980)

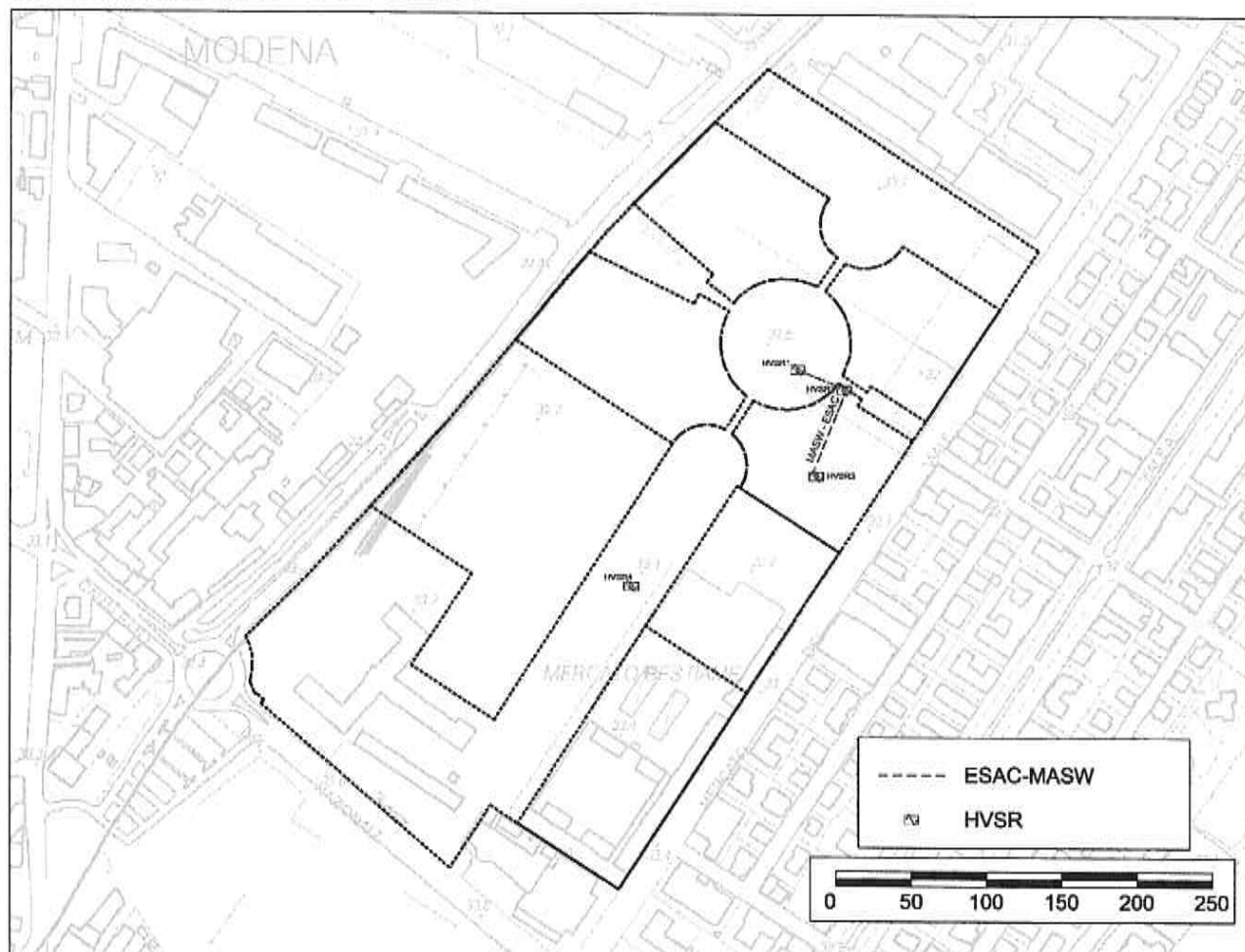
SisTeMoNet - Portale geografico del territorio Modenese - © Provincia di Modena

6 INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE SULL'AREA

La campagna di indagine geofisica eseguita presso l'area oggetto di studio comprende:

- esecuzione di nr. 1 rilievo sismico attivo-passivo (M.A.S.W. - E.S.A.C.)
- esecuzione di nr. 4 rilievi sismici passivi (HVSr)

Figura 24: UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE



6.1 INDAGINI SISMICHE DI TIPO ATTIVO - PASSIVO (M.A.S.W. - E.S.A.C.)

Sono state eseguite in data 07/12/2018 un'acquisizione di sismica attiva con metodologia M.A.S.W. (*Multichannell Analysis of Surface Waves*) e un'acquisizione di sismica passiva in onde di superficie con *array* bidimensionale tipo E.S.A.C. (*Extended Spatial Autocorrelation*). I dati acquisiti dalle indagini geofisiche effettuate sul sito sono stati elaborati ed interpretati in modo congiunto.

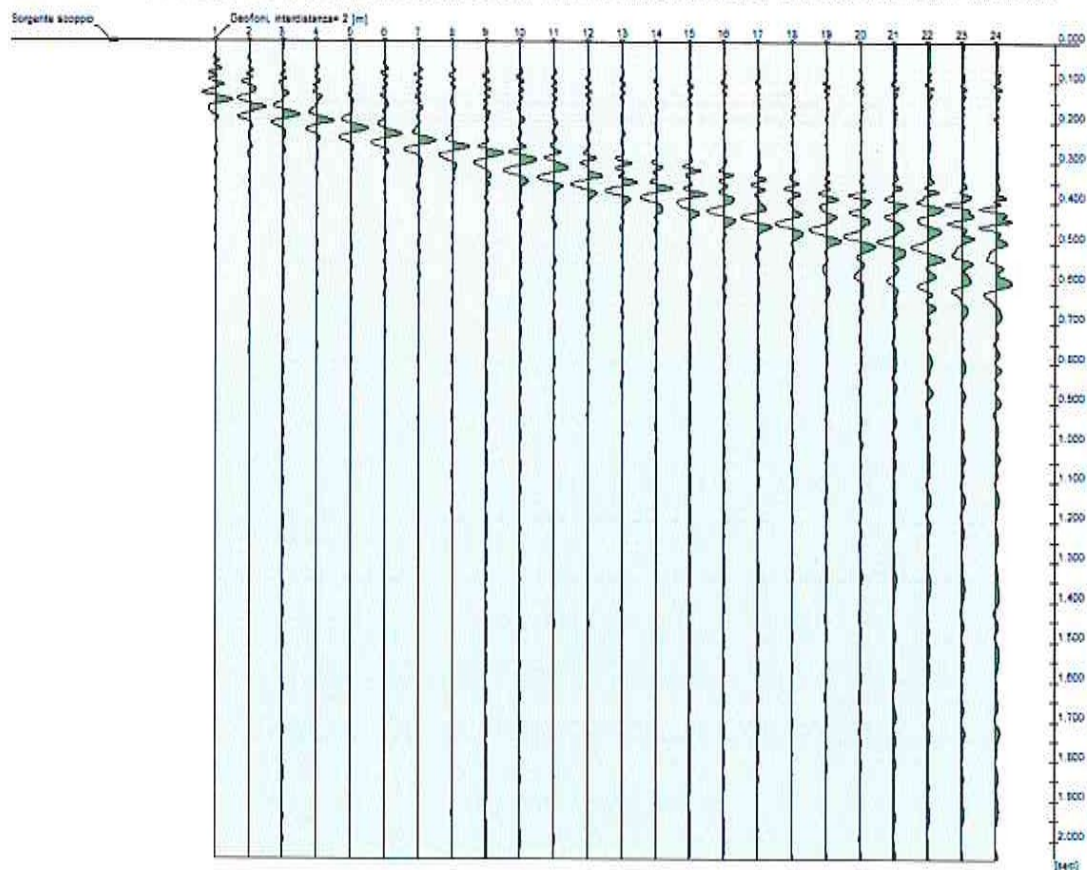
6.2 INDAGINE SISMICA ATTIVA M.A.S.W.

Per l'acquisizione dei dati geofisici è stato impiegato un sismografo digitale PASI, modello GEA 24, dotato di 24 canali, con cavi di collegamento schermati aventi una lunghezza pari a 120 metri cadauno collegati a geofoni verticali aventi una frequenza propria pari a 4,5 Hz, e un geofono *trigger* per l'avvio della registrazione. Per l'indagine sismica M.A.S.W. è stato utilizzato un sistema di energizzazione costituito da un fucile sismico funzionante con cartucce calibro 8 industriale.

PARAMETRI DI ACQUISIZIONE

N. tracce	24
Durata acquisizione [ms]	2048.0
Interdistanza geofoni [m]	2.0
Periodo di campionamento [ms]	0.50

Figura 25: ANDAMENTO DELLE TRACCE REGISTRATE DURANTE LA PROCEDURA DI ACQUISIZIONE M.A.S.W.



PARAMETRI DI ELABORAZIONE DELL'ANALISI SPETTRALE

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	60
Velocità minima di elaborazione [m/s]	1
Velocità massima di elaborazione [m/s]	800
Intervallo velocità [m/s]	1

Figura 26: SPETTRO VELOCITA' DI FASE – FREQUENZE (VISTA 3D)

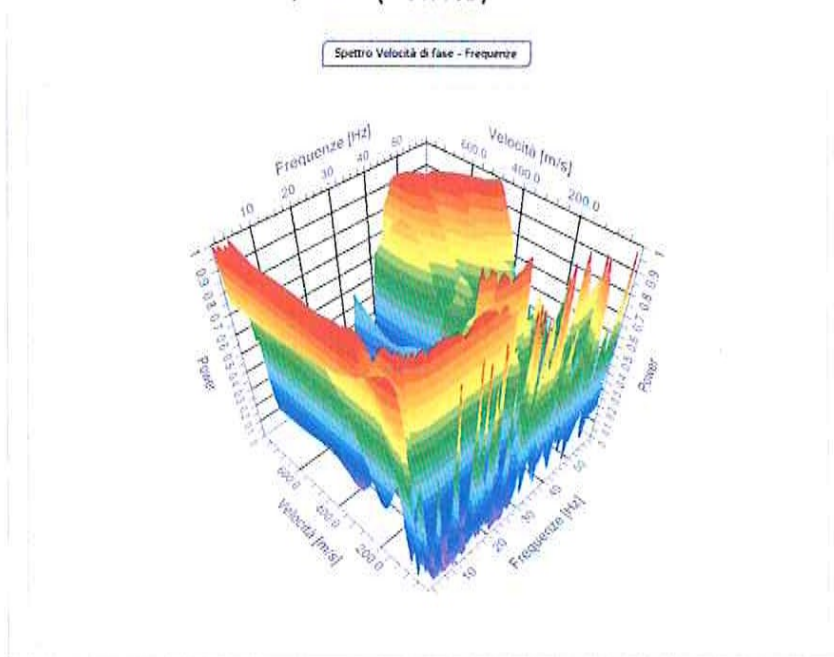
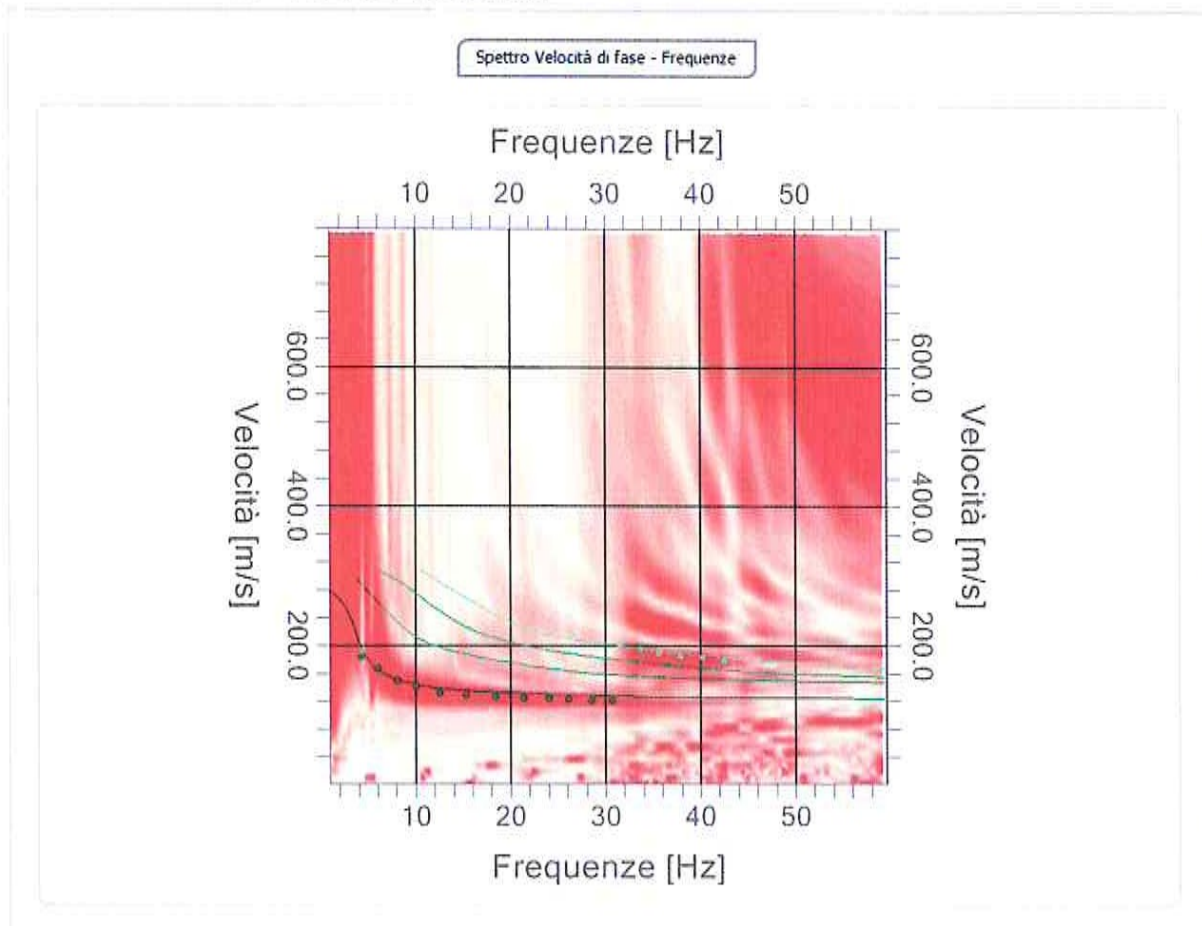


Figura 27: PICKING DEFINITO PER LA DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI DISPERSIONE

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/s]	Modo
1	4.4	184.0	0
2	6.0	166.0	0
3	8.1	149.7	0
4	10.1	141.5	0
5	12.6	131.7	0
6	15.4	128.4	0
7	18.4	125.2	0
8	21.4	123.5	0
9	24.1	123.5	0
10	26.2	121.9	0
11	28.6	120.3	0
12	30.8	120.3	0
13	33.8	193.8	3
14	35.7	188.9	3
15	38.0	184.0	3
16	40.3	182.4	3
17	42.5	177.5	3

Figura 28: SPETTRO VELOCITA' DI FASE - FREQUENZE



PROCESSO DI INVERSIONE

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Falda	Vp [m/s]	Vs [m/s]
1	1.94	1.94	1800.0	0.4	Si	298.8	122.0
2	4.97	3.03	1800.0	0.4	Si	339.7	138.7
3	8.05	3.08	1800.0	0.4	Si	366.0	149.4
4	12.08	4.04	1800.0	0.4	Si	451.9	184.5
5	16.17	4.09	1800.0	0.4	Si	493.8	201.6
6	21.15	4.98	1800.0	0.4	Si	491.8	200.8
7	26.00	4.85	1900.0	0.4	Si	566.2	231.1
8	30.97	4.97	2000.0	0.4	Si	651.5	266.0
9	∞	∞	2000.0	0.4	Si	706.2	288.3

Percentuale di errore

0.012 %

Fattore di disadattamento della soluzione

0.010

Figura 29: SPETTRO VELOCITA' - FREQUENZE DERIVANTE DAL PROCESSO DI INVERSIONE

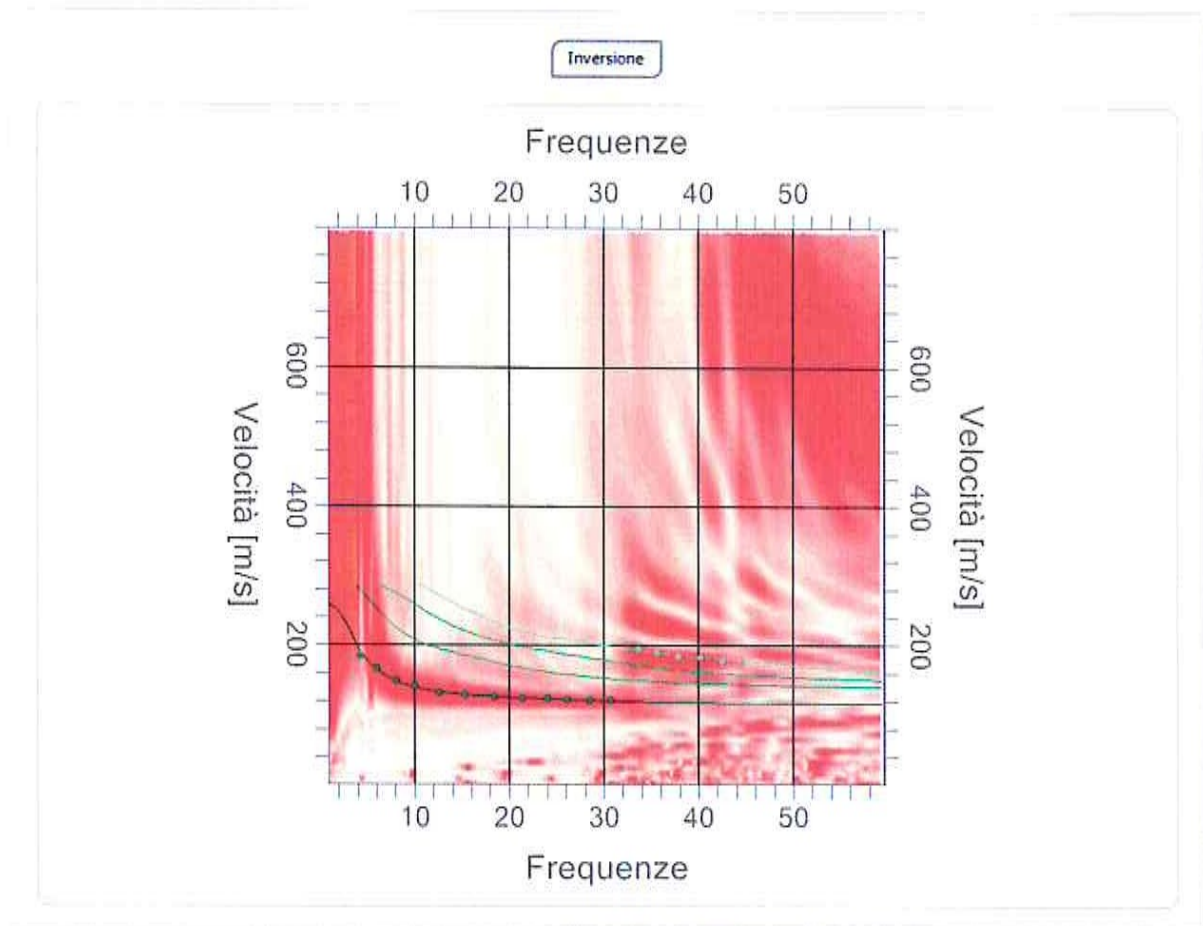


Figura 30: ANDAMENTO DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO CON LA PROFONDITA'

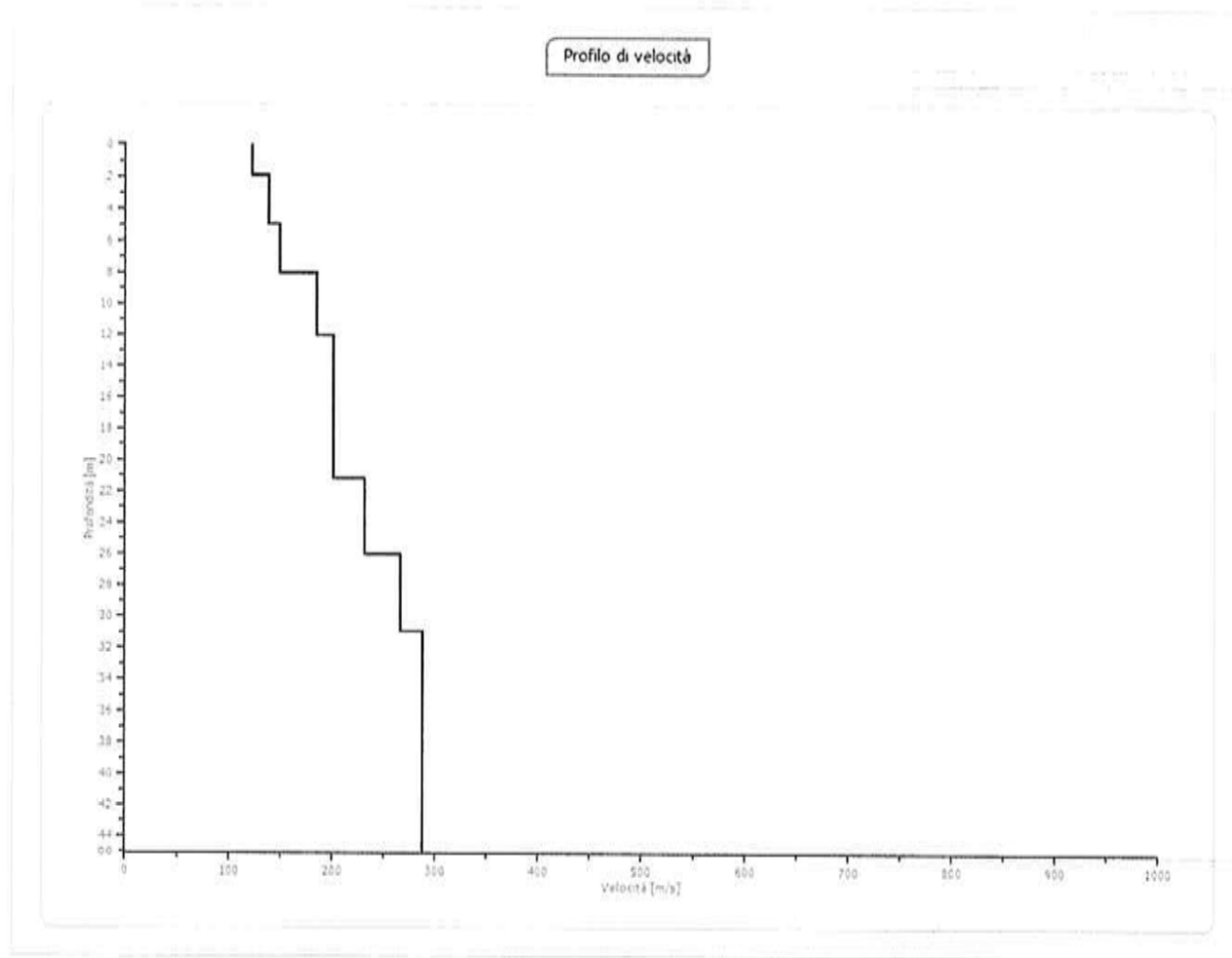
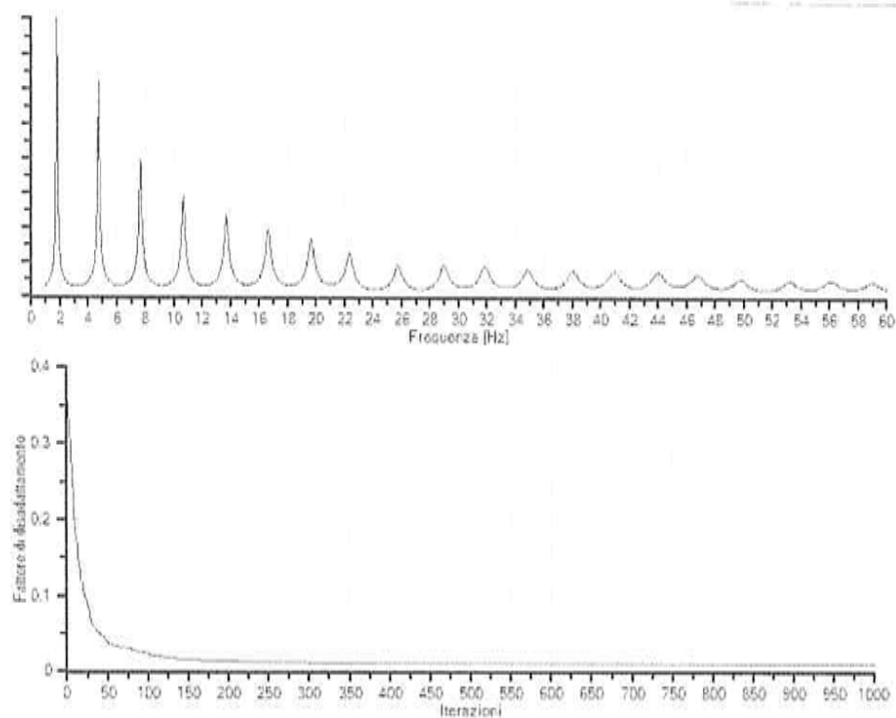


Figura 31: ANDAMENTO DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO E DISADATTAMENTO



6.3 INDAGINE SISMICA PASSIVA E.S.A.C.

Per l'acquisizione dei dati geofisici è stato impiegato un sismografo digitale PASI, modello GEA 24, dotato di 24 canali, con cavi di collegamento schermati aventi una lunghezza pari a 120 metri cadauno collegati a geofoni verticali aventi una frequenza propria pari a 4,5 Hz. Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il software MASW (di "Roma e associati").

Figura 32: DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA SISMICA ATTIVA - PASSIVA (MASW - E.S.A.C.) – BASE SISMICA SSW-ENE



Figura 33: DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA SISMICA PASSIVA (E.S.A.C.) – BASE SISMICA ESE-NNW



6.3.1 GEOMETRIA E PARAMETRI DI ACQUISIZIONE

È stata utilizzata la medesima strumentazione utilizzata per l'acquisizione attiva, disposta secondo uno stendimento a geometria bidimensionale a forma di "L", con lato maggiore lungo 60 m e lato minore 35 m, con i geofoni spazati ad intervalli irregolari lungo i due rami dell'antenna sismica.

Per l'acquisizione delle tracce di sismica passiva è stato adottato una frequenza di campionamento di 4 ms, con una registrazione complessiva della durata di 20 minuti.

A seguito di una prima elaborazione delle tracce è stato eseguito un *pre-processing* consistente in un primo filtraggio, con filtro passa-basso a 60 Hz, in quanto le caratteristiche del sito posto nelle vicinanze di un'area produttiva determinava un rumore ambientale non causale (frequenze prevalenti).

6.3.2 INTERPRETAZIONE DATI ACQUISITI

A supporto dell'interpretazione dei dati acquisiti dalla strumentazione digitale ci si è avvalsi dei dati litostratigrafici e geotecnici derivanti da sondaggi, prove penetrometriche (CPT), prove penetrometriche (CPTU) e dati geofisici MASW, REMI

I dati stratigrafici indicano che il primo sottosuolo è formato da terreni prevalentemente argilloso limosi o sabbiosi fino a circa 20-22 m, seguito in profondità da un banco prevalentemente ghiaioso con base individuata alla profondità di 48 m dal piano di campagna attuale. I dati penetrometrici indicano una condizione di generale saturazione dei terreni presenti a causa della presenza di una falda freatica superficiale

Nella Figura 36 sono riportate le curve di dispersione effettive (ricavate dalla prova MASW e dalla prova E.S.A.C.), nonché la selezione dei punti (*picking*) per la modellazione diretta della soluzione sismostratigrafica. Nella Figura 37 è mostrato il risultato della modellazione (confronto tra curva teorica e curva sperimentale)

Figura 36: CURVA DI DISPERSIONE EFFETTIVA MASW (ROSSO) E.S.A.C. (VERDE CHIARO) E SELEZIONE DEI PUNTI INTERPRETATIVI PER LA MODELLAZIONE DIRETTA (PUNTI VERDE SCURO CON INTERVALLO DI INCERTEZZA).

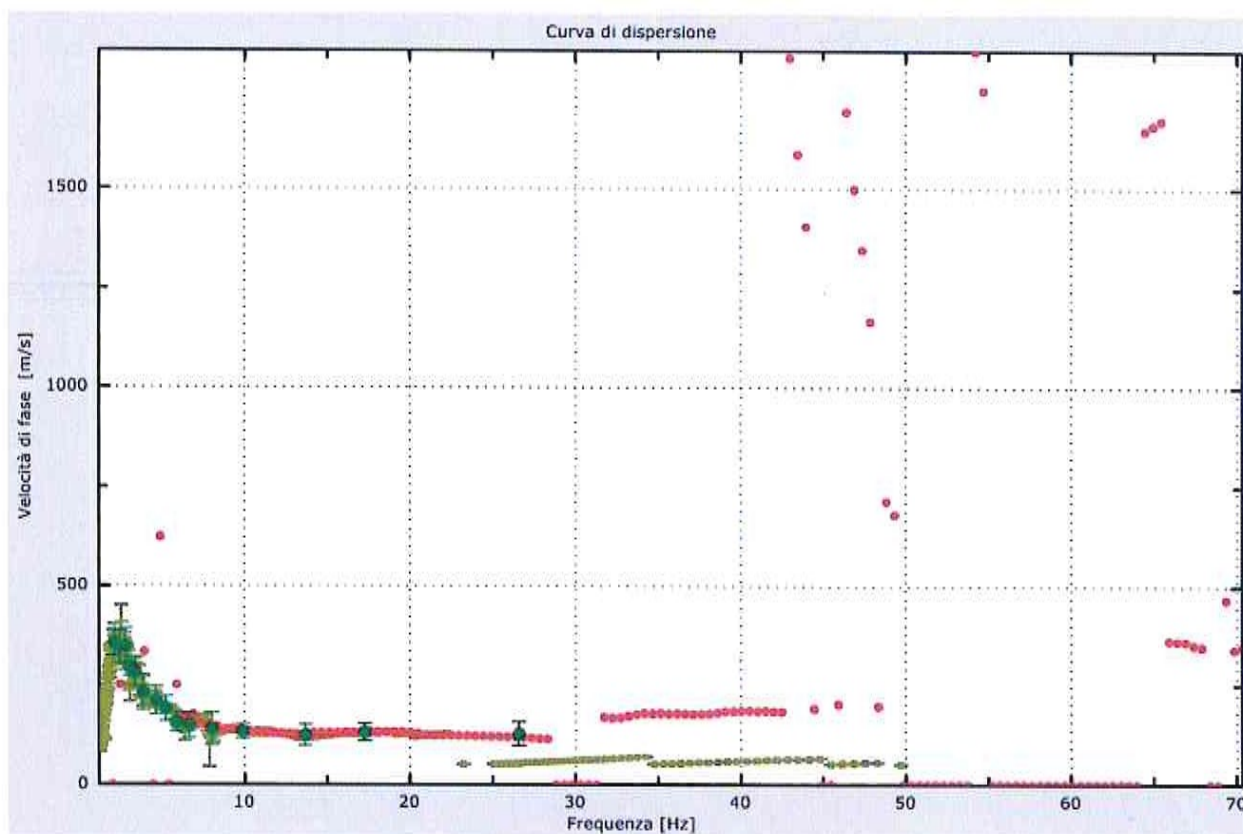
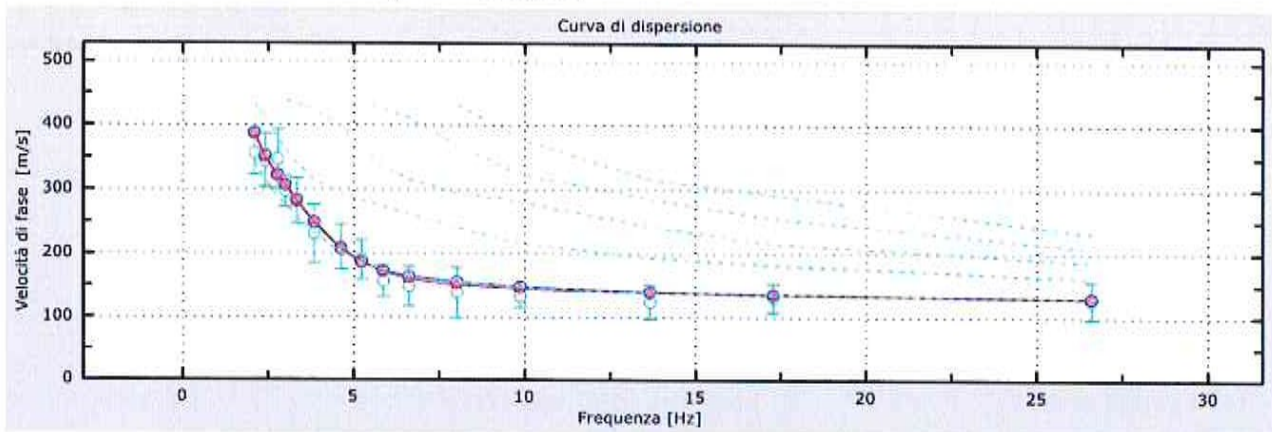


Figura 37: CONFRONTO TRA IL PICKING DELLA CURVA EFFETTIVA SPERIMENTALE E LE CURVA EFFETTIVA E APPARENTE SINTETICHE (CURVE ROSSA E BLU) (DISCREPANZA PARI AL 6%) E MODI VIBRAZIONALI RIFERIBILI AL MODELLO DI PROFILO DI VELOCITÀ (CURVE IN CIANO)



L'andamento della curva effettiva sperimentale mostra valori della velocità di fase relativamente bassi a frequenze superiori a 5,10 Hz, corrispondenti agli strati meno profondi. Con la diminuzione della frequenza corrispondente a profondità maggiori i valori della velocità di fase aumentano con velocità superiori a 300 m/s alla frequenza pari a circa 2.50 Hz corrispondente ad una profondità teorica esplorata dall'indagine di circa 70 m.

Il modello di profilo verticale di velocità (Figura 38 e Figura 39) è stato ricavato per modellazione diretta della curva effettiva MASW/E.S.A.C., considerando un sottosuolo di tipo normal-dispersivo, caratterizzato da bassi valori del Vs (≤ 200 m/s) fino a circa la profondità di 21 m dal p.c., profondità alla quale il modello di velocità mostra un incremento dei valori di Vs che aumentano fino ad un valore dell'ordine di circa 300 m/s (a partire da circa 26 m di profondità).

Figura 38: PROFILO DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO (INCERTEZZA 0,1)

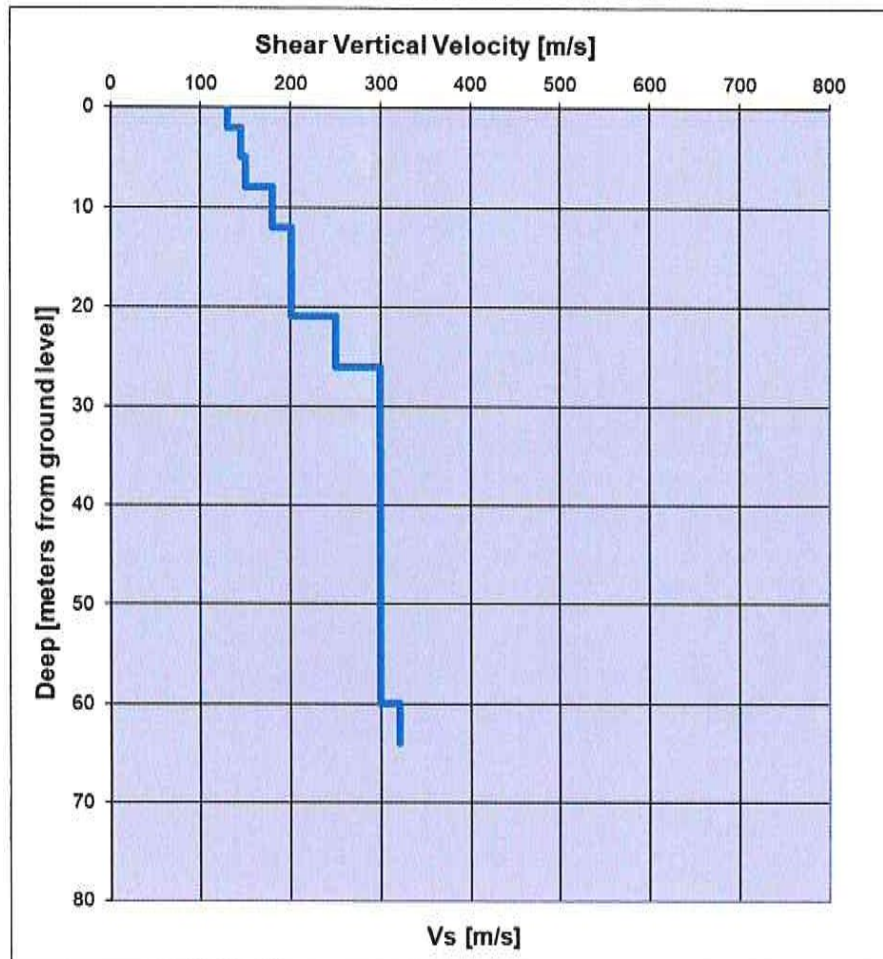


Figura 39: TABELLA DATI RIASSUNTIVI RELATIVI AL MODELLO DI PROFILO VERTICALE DI VELOCITÀ

Descrizione	Spessore (m)	Profondità base (m)	Vs (m/s)
Peliti prevalenti	2	2	130
	3	5	145
	3	8	150
Sabbie prevalenti	4	12	180
	4	16	200
Alternanza di limi e sabbie limose	5	21	200
Banchi ghiaiosi alternati a strati pelitici e sabbiosi)	5	26	250
	22	48	300
Argille	12	60	300
Ghiaie	4	64	320

6.4 INDAGINI GEOFISICHE DI TIPO SISMICO PASSIVO (HVSr)

Sono state eseguite in data 07/12/2018 n° 4 indagini HVSr, di cui le prime tre (HVSr1, HVSr2 e HVSr3) in prossimità dello stendimento MASW-E.S.A.C. e la quarta nel settore meridionale del comparto (HVSr4).

Figura 40: UBICAZIONE PROVE HVSr



Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Il rumore, convenzionalmente suddiviso in microsisma (frequenze < 1Hz, sorgenti naturali lontane) e microtremore (frequenze > 1Hz, sorgenti antropiche locali) è costituito sia da onde di volume (onde P e onde S) sia da onde superficiali in proporzione variabile. Il microsisma è prevalentemente costituito da onde di Rayleigh mentre il microtremore oltre alle onde di volume contiene sia onde di Love sia onde di Rayleigh.

I metodi che si basano sull'acquisizione del rumore sismico si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Nel percorso dalla sorgente "s" al sito "x" le onde elastiche (sia di terremoto che di microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamento per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica di "ray tracking", è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni

relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

La tecnica maggiormente sfruttata per lo studio dei microtremori è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale, conosciuta come HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). In breve, la metodologia dei rapporti spettrali H/V permette di valutare la variazione di ellitticità dell'onda di Rayleigh in funzione della frequenza, permettendo così di ricavare la frequenza fondamentale di un sito. Tale parametro risulta essere legato alla presenza di una superficie di discontinuità con un determinato contrasto di impedenza sismica.

Il valore del picco rilevabile dalla curva H/V risulta essere inversamente proporzionale alla profondità dell'interfaccia e direttamente proporzionale alla velocità di propagazione delle onde S dei materiali sovrastanti l'interfaccia mediante la relazione:

$$f_0 = \frac{V_s}{4H}$$

Questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità che è solitamente disponibile almeno a livello di massima, è in grado di fornire previsioni sullo spessore h degli strati.

Le registrazioni del rumore sismico ambientale sono state effettuate, come precedentemente affermato, tramite tromografo digitale il quale permette sia l'acquisizione digitale in alta risoluzione in modo passivo e non intrusivo, sia il pre-processing dei dati.

È costituito da tre sensori elettrodinamici (velocimetri) ortogonali (N-S, E-W e in senso verticale) con autobloccaggio in fase di non acquisizione.

Considerando il suolo come un corpo visco-elastico, risulta possibile effettuare la misurazione delle frequenze proprie di oscillazione, riconosciute come funzioni delle proprietà meccaniche dei materiali e della morfologia attorno al sito in esame.

Le principali caratteristiche tecniche del tromografo utilizzato sono riportate nella tabella sottostante:

Numero di canali: 3+1 analogici
Amplificatori: tutti canali con input differenziali
Rumore: < 0.5 μ V r.m.s. @128 Hz sampling
Impedenza dell'input: 106 Ohm
Range di frequenze: DC - 360 Hz
Frequenza di campionamento: 16384 Hz per canale
Frequenze di sovracampionamento: 32x, 64x, 128x
Conversione A/D: equivalente a 24 bit
Massimo input analogico: 51.2 mV (781 nV/digit)
Orologio: interno, permanente con datario e allarme, può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
Livella: a bolla d'aria, elevata precisione orizzontale, sensibilità 5' d'arco (0.083°)
Registrazione dati: memoria interna, standard 512 Mb, opzionale fino a 2 Gb
Accoppiamento col terreno: su punte e cuscinetto reologico
Condizioni operative: temperatura - 10 / +70°C, umidità 0-90% senza condensa
Impermeabilità indice di protezione IP = 65 (resistente alla polvere, resistente agli spruzzi)
Sensori: 3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione autobloccaggio quando non in acquisizione

L'elaborazione dei dati rilevati dalla strumentazione è stata effettuata mediante l'utilizzo di un software denominato Grilla in dotazione a TROMINO. In sintesi, il segnale dei velocimetri è acquisito in ciascun sito per un tempo t (20 min), e digitalizzato a 24 bit.

Il software Grilla, per ciascuna delle 3 componenti del moto, effettuate le sotto riportate elaborazioni:

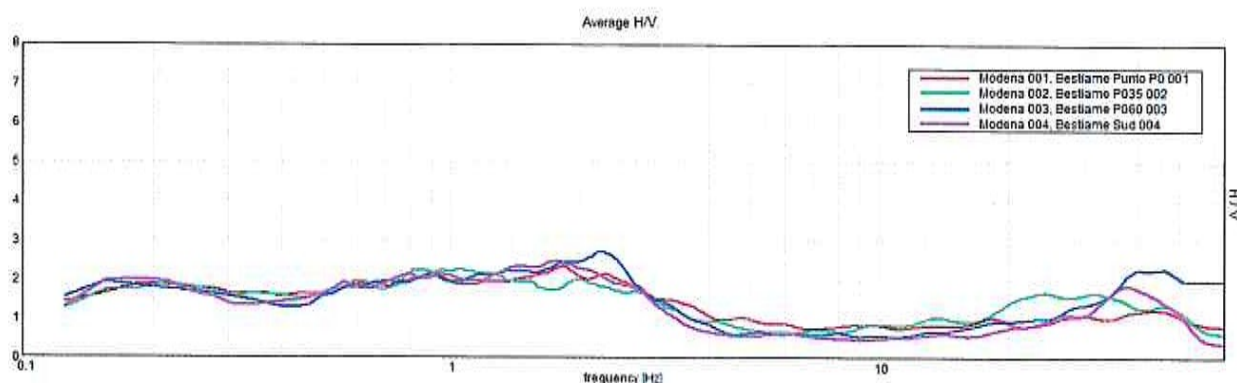
1. Suddivisione del tracciato acquisito in finestre di lunghezza L (in questa elaborazione le finestre temporali hanno un'ampiezza pari a 20 s),
2. procedura di eliminazione del trend da ciascuna finestra,
3. esecuzione dell'operazione di "taper" mediante una finestra Bartlett,
4. esecuzione del "pad" di ciascuna finestra con inserimento di valori pari a 0 "zero",

5. calcolo della trasformata di Fourier (FFT) per ciascuna finestra,
6. calcolo dello spettro di ampiezza per ciascuna finestra,
7. procedura di smoothing dello spettro di ogni finestra finalizzata ad evidenziare i pattern significativi, attenuando il rumore generato dai disturbi ambientali
8. esecuzione del rapporto spettrale HVSR di ogni frequenza, per ciascuna finestra.

La funzione HVSR finale è data dalle media degli HVSR di ciascuna finestra. Per produrre l'HVSR finale le componenti orizzontali sono state mediate tra loro con la media quadratica che successivamente sono divise per la componente verticale. Tutti i grafici presentati in questo lavoro sono stati ottenuti con liscio secondo finestre triangolari con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale.

Nella figura seguente viene riportato l'andamento del rapporto H/V delle diverse prove eseguite.

Figura 41: HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

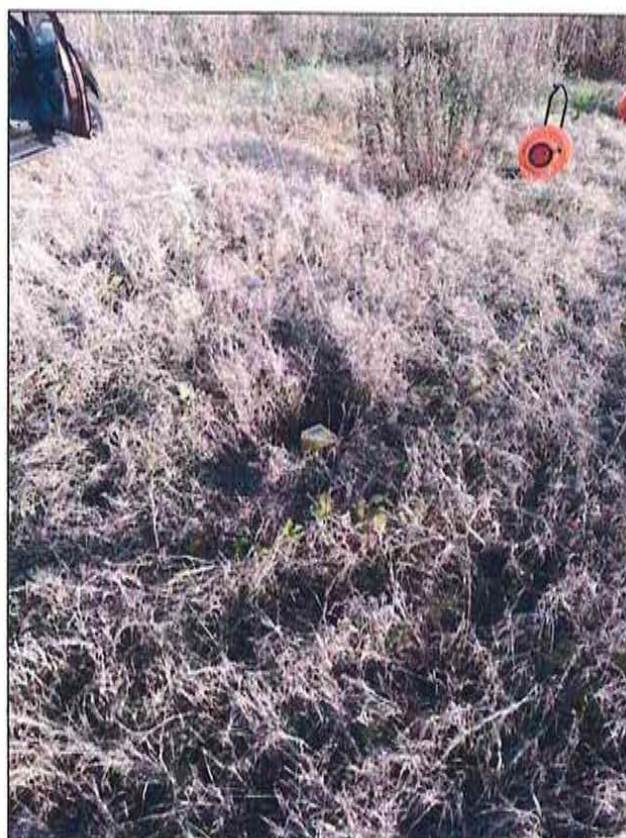


I valori ottenuti indicano la presenza di un significativo contrasto di impedenza di origine stratigrafica ascrivibile al passaggio tra i terreni superficiali e il primo banco ghiaioso. Tale contrasto è stato individuato ad una frequenza variabile da 1.75 a 2.25 Hz con un picco nel rapporto H/V delle prove di sismica passiva HVSR, con una ampiezza compresa tra 2 e 3, che rappresentano pertanto l'intervallo delle frequenze di vibrazione fondamentale dei terreni.

Le indagini tomografiche hanno inoltre evidenziato un picco secondario di origine stratigrafica alla frequenza di circa 0.90-0.95 Hz, che potrebbe essere riconducibile, come peraltro evidenziato dallo studio di microzonazione sismica di II° livello del territorio comunale, alla base del subsistema di Bazzano (AES6), che è possibile collocarlo ad una profondità di poco superiore ai 100 metri dal piano di campagna.

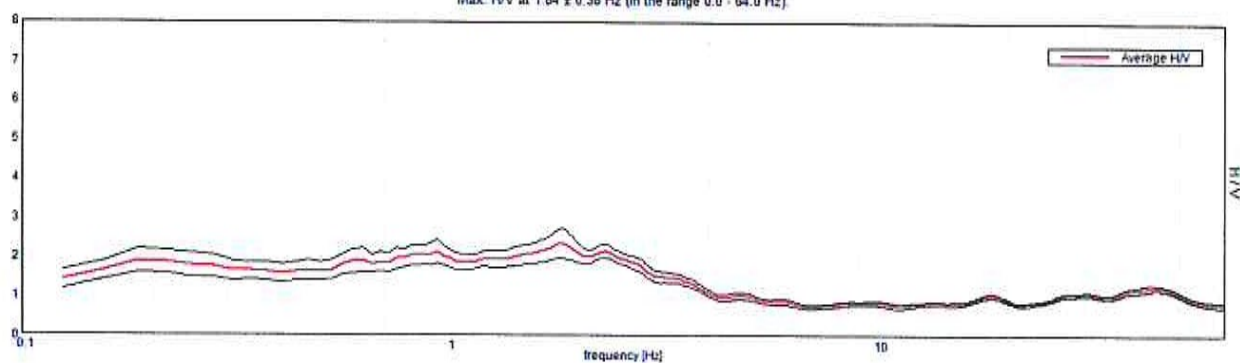
MODENA HVSR1 - EX-MERCATO BESTIAME

Instrument: TRZ-0010/01-09
 Data format: 16 byte
 Full scale [mV]: n.a.
 Coordinate Gauss-Boaga : 1653478 - 4947013
 Start recording: 07/12/18 16:17:50 End recording: 07/12/18 16:37:51
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 73% trace (manual window selection)
 Sampling rate: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing type: Triangular window
 Smoothing: 10%

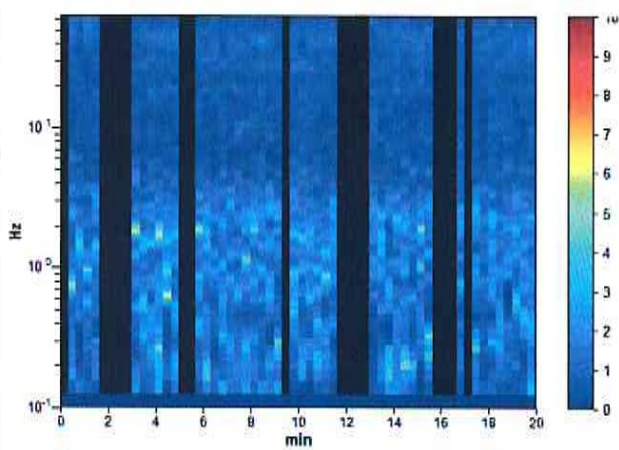


HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

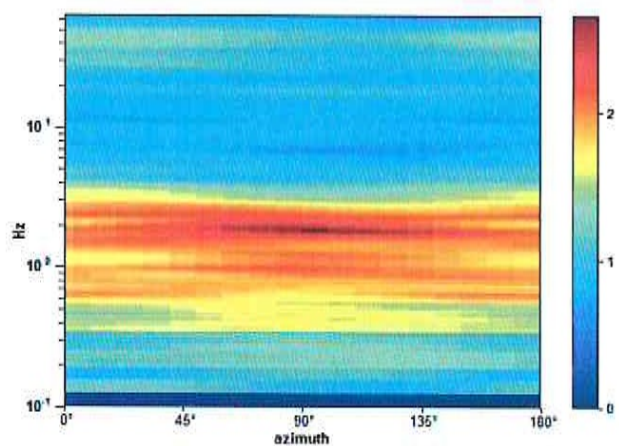
Max. H/V at 1.84 ± 0.36 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz)



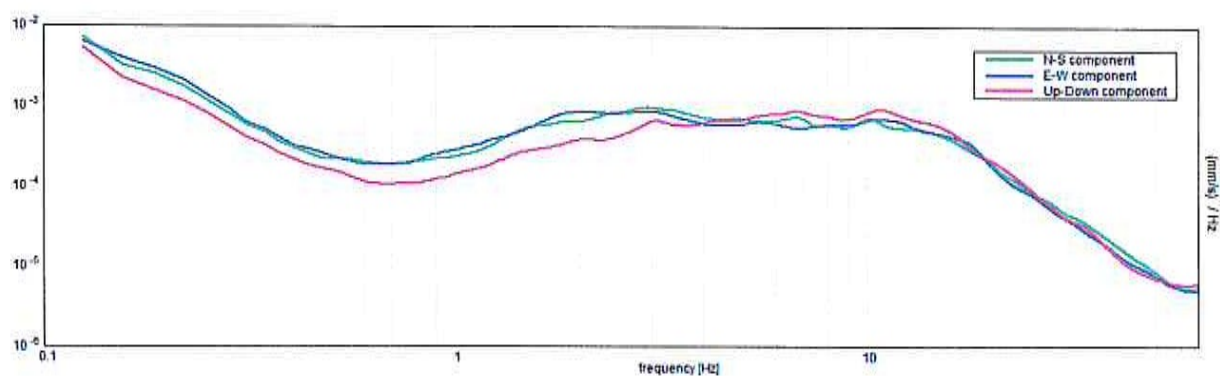
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V

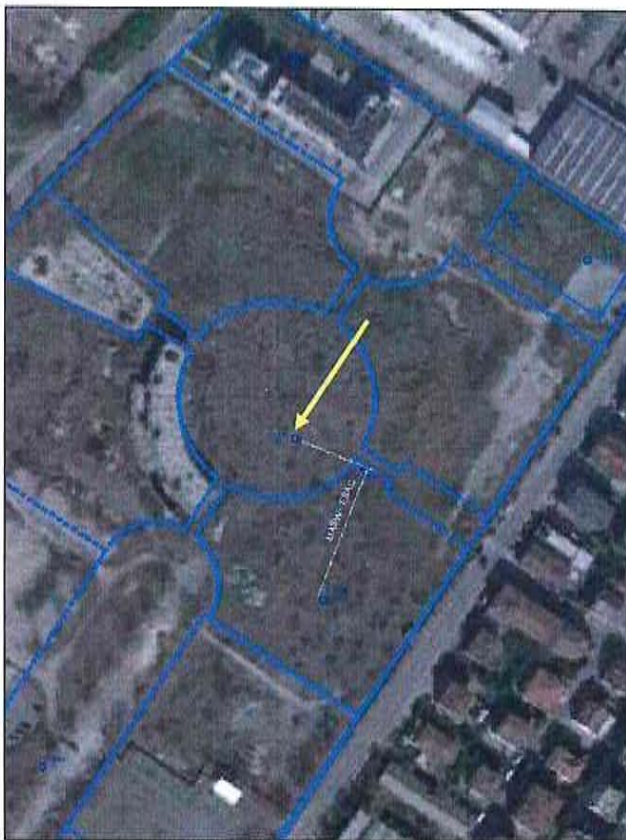


SINGLE COMPONENT SPECTRA



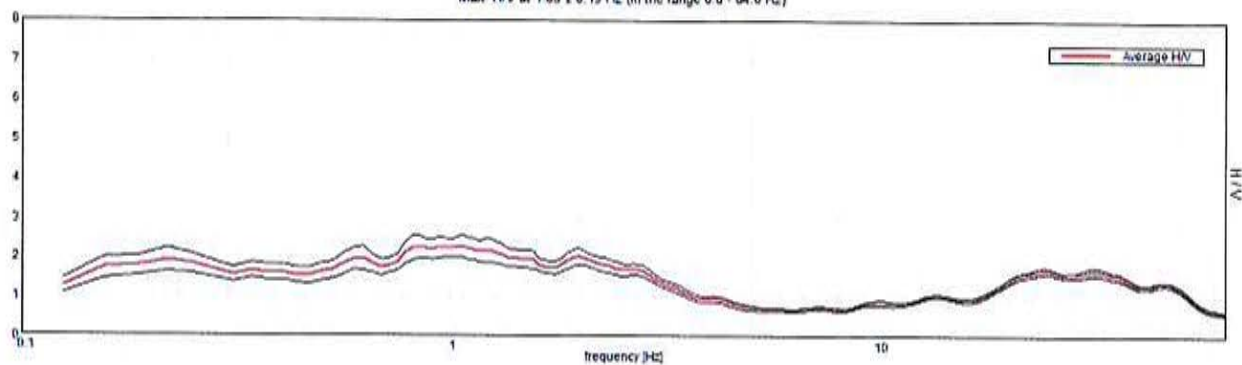
MODENA HVSR2 - EX-MERCATO BESTIAME

Instrument: TRZ-0010/01-09
 Data format: 16 byte
 Full scale [mV]: n.a.
 Coordinate Gauss-Boaga : 1653508 - 4946999
 Start recording: 07/12/18 16:44:38 End recording: 07/12/18 17:04:39
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 80% trace (manual window selection)
 Sampling rate: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing type: Triangular window
 Smoothing: 10%

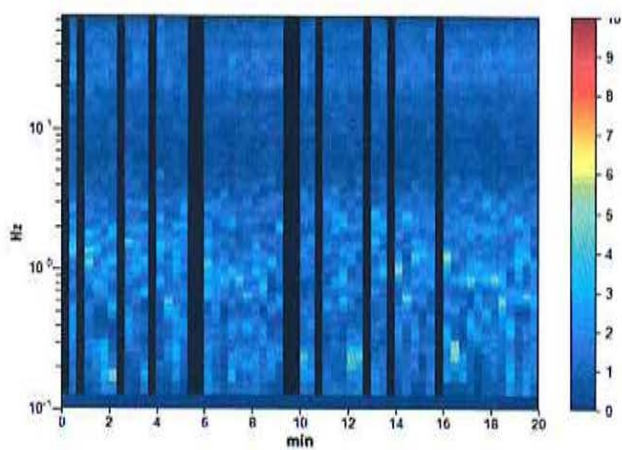


HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

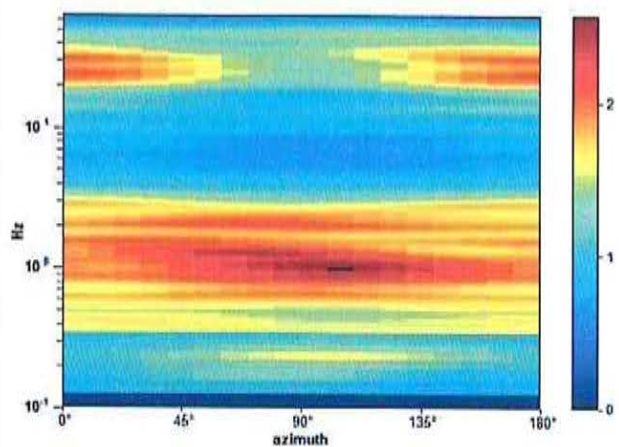
Max. H/V at 1.05 ± 0.19 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz)



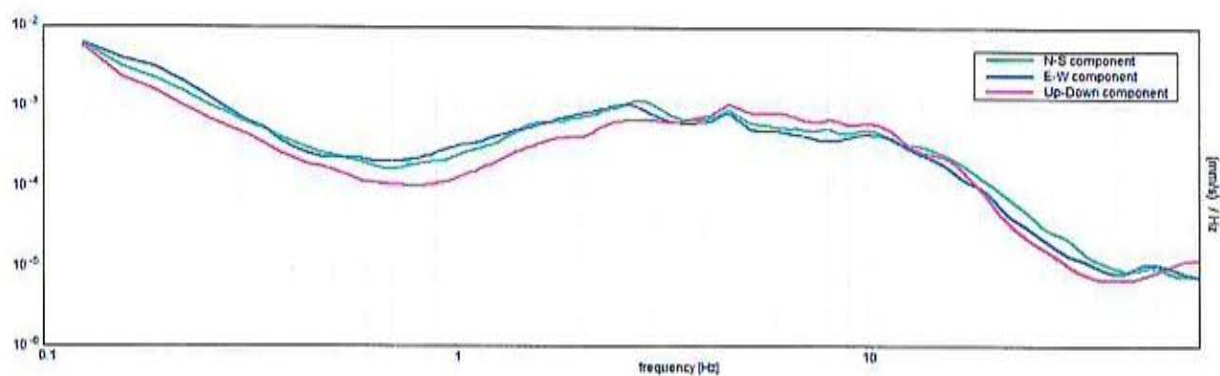
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V

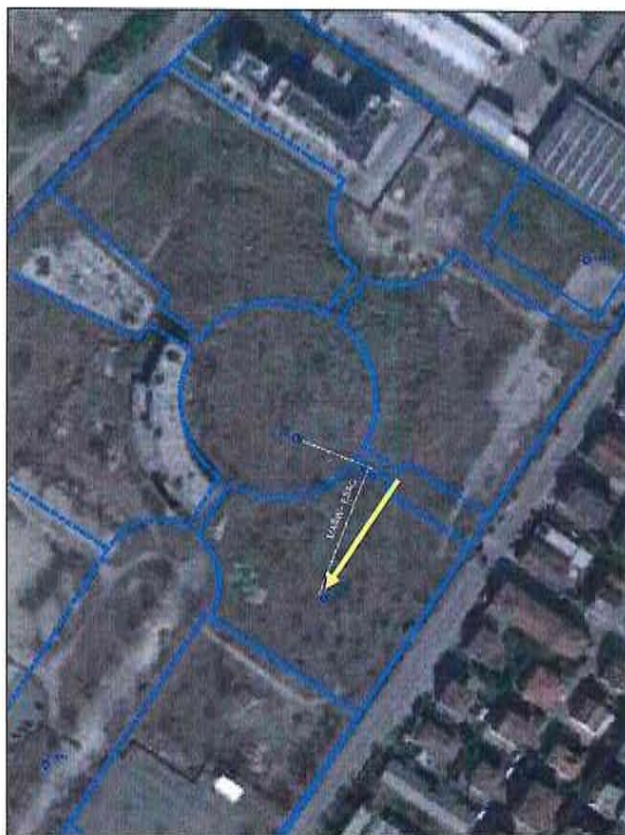


SINGLE COMPONENT SPECTRA



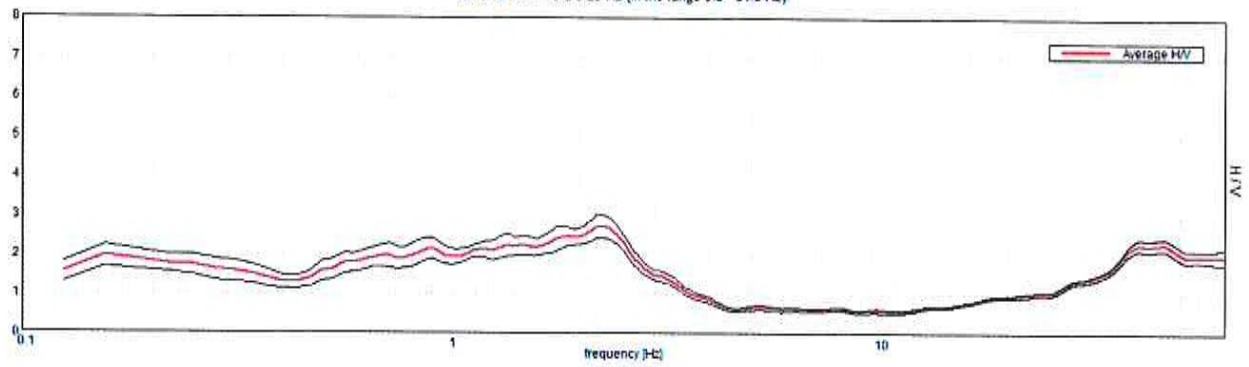
MODENA HVSR3 - EX-MERCATO BESTIAME

Instrument: TRZ-0010/01-09
 Data format: 16 byte
 Full scale [mV]: n.a.
 Coordinate Gauss-Boaga : 1653490 - 4946942
 Start recording: 07/12/18 17:37:18 End recording: 07/12/18 17:57:19
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 77% trace (manual window selection)
 Sampling rate: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing type: Triangular window
 Smoothing: 10%

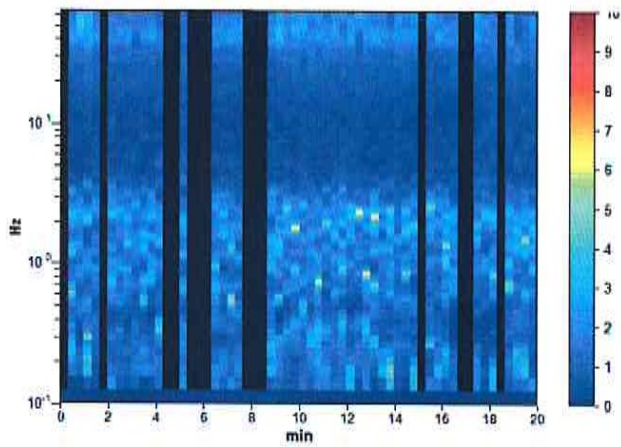


HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

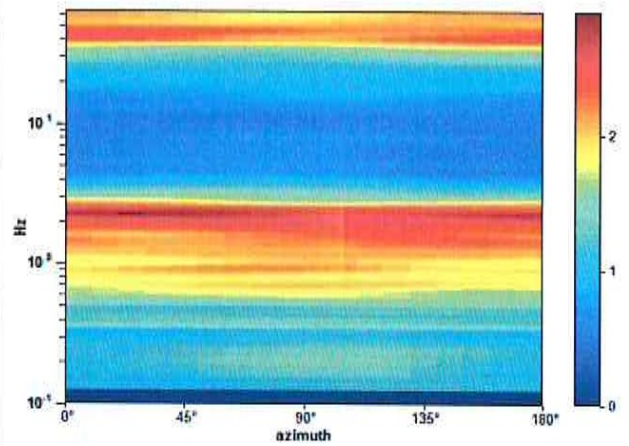
Max. H/V at 2.25 ± 0.25 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz)



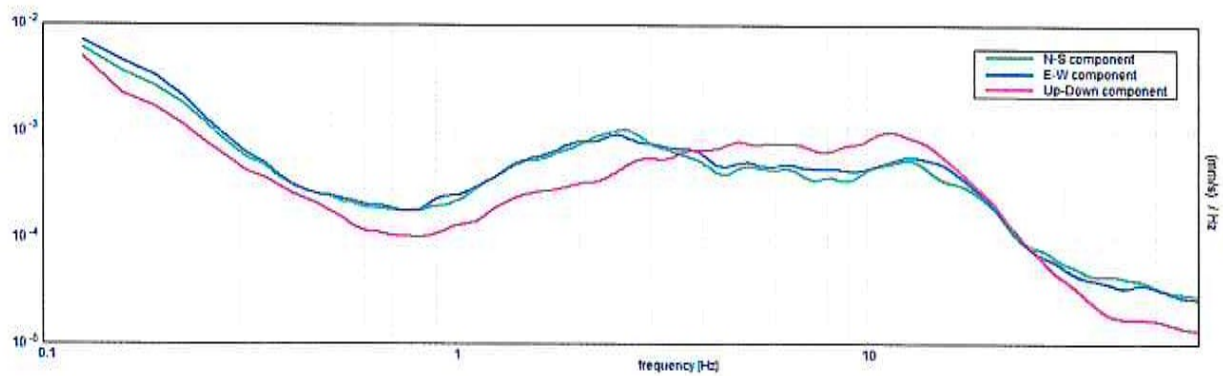
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



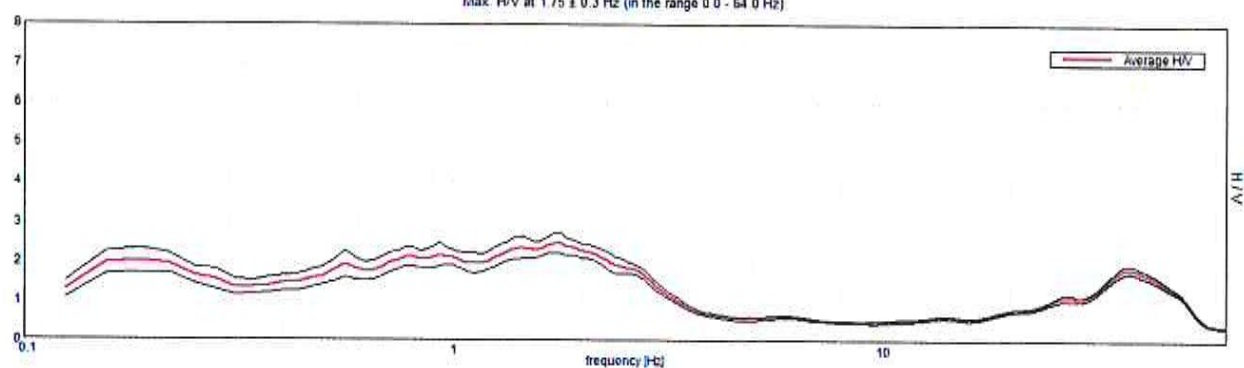
MODENA HVSR4 - EX-MERCATO BESTIAME

Instrument: TRZ-0010/01-09
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Coordinate Gauss-Boaga : 1653367 - 4946868
Start recording: 07/12/18 18:04:53 End recording: 07/12/18 18:24:54
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
Trace length: 0h20'00". Analyzed 83% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 10%

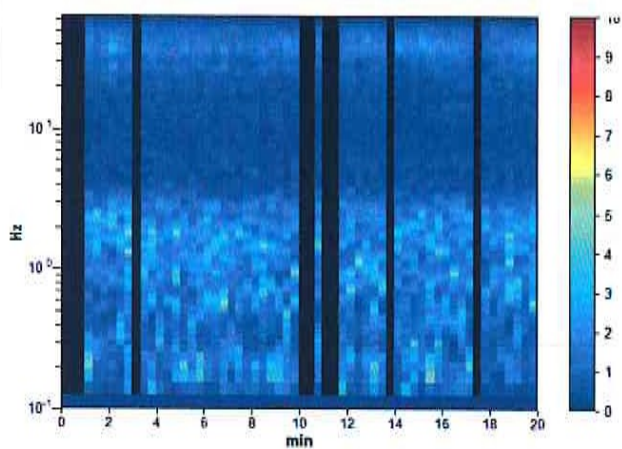


HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

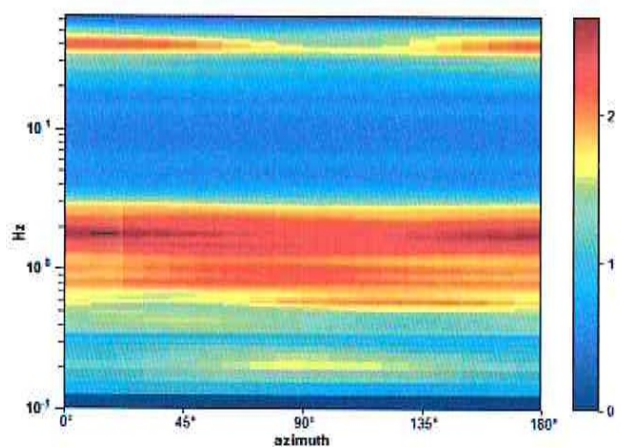
Max. H/V at 1.75 ± 0.3 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz)



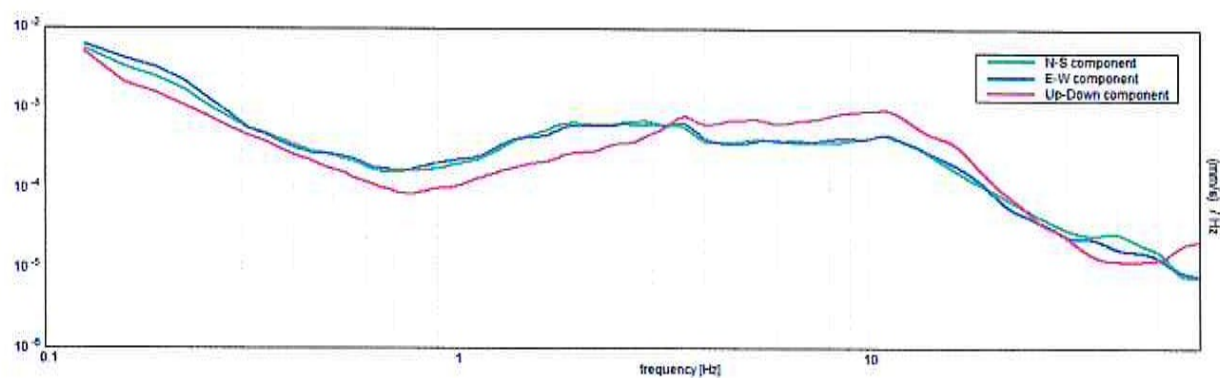
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



7 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE DA BIBLIOGRAFIA

L'analisi del materiale relativo ad indagini geognostiche e geofisiche effettuate nell'area oggetto di studio presente in bibliografia, reperito sia presso l'Amministrazione Comunale di Modena che presso la banca dati in possesso della ditta scrivente, ha permesso di ricostruire nel dettaglio la situazione litostratigrafica dell'area. Complessivamente il materiale reperito in bibliografia consiste in:

- nr. 75 indagini penetrometriche ad infissione statica con punta meccanica (CPT)
- nr. 4 indagini penetrometriche ad infissione statica con punta elettrica (CPTU)
- nr. 6 carotaggi continui
- nr. 4 indagini sismiche attive (MASW)
- nr. 4 indagini sismiche passive (HVSr)
- nr. 2 indagini sismiche passive (REMI)

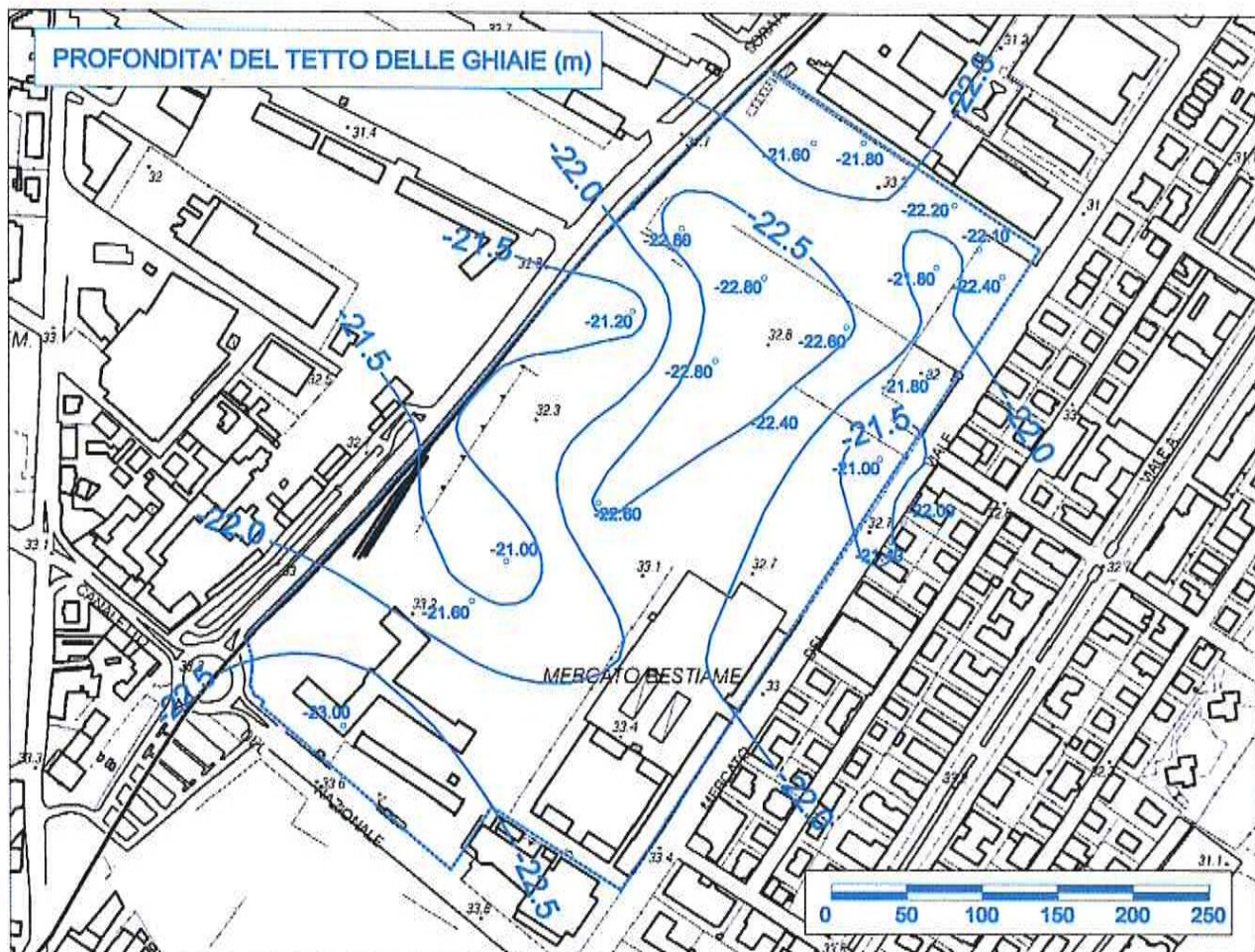
Tali indagini sono riportate nell'ELABORATO 2.

8 MODELLO GEOLOGICO DEL SITO

L'analisi delle indagini litostratigrafiche eseguite sul comparto e delle stratigrafie di pozzi per acqua esistenti evidenziano una successione stratigrafica superficiale caratterizzata dalla presenza di terreni prevalentemente fini a copertura di depositi ghiaiosi grossolani appartenenti alla conoide distale del fiume Secchia.

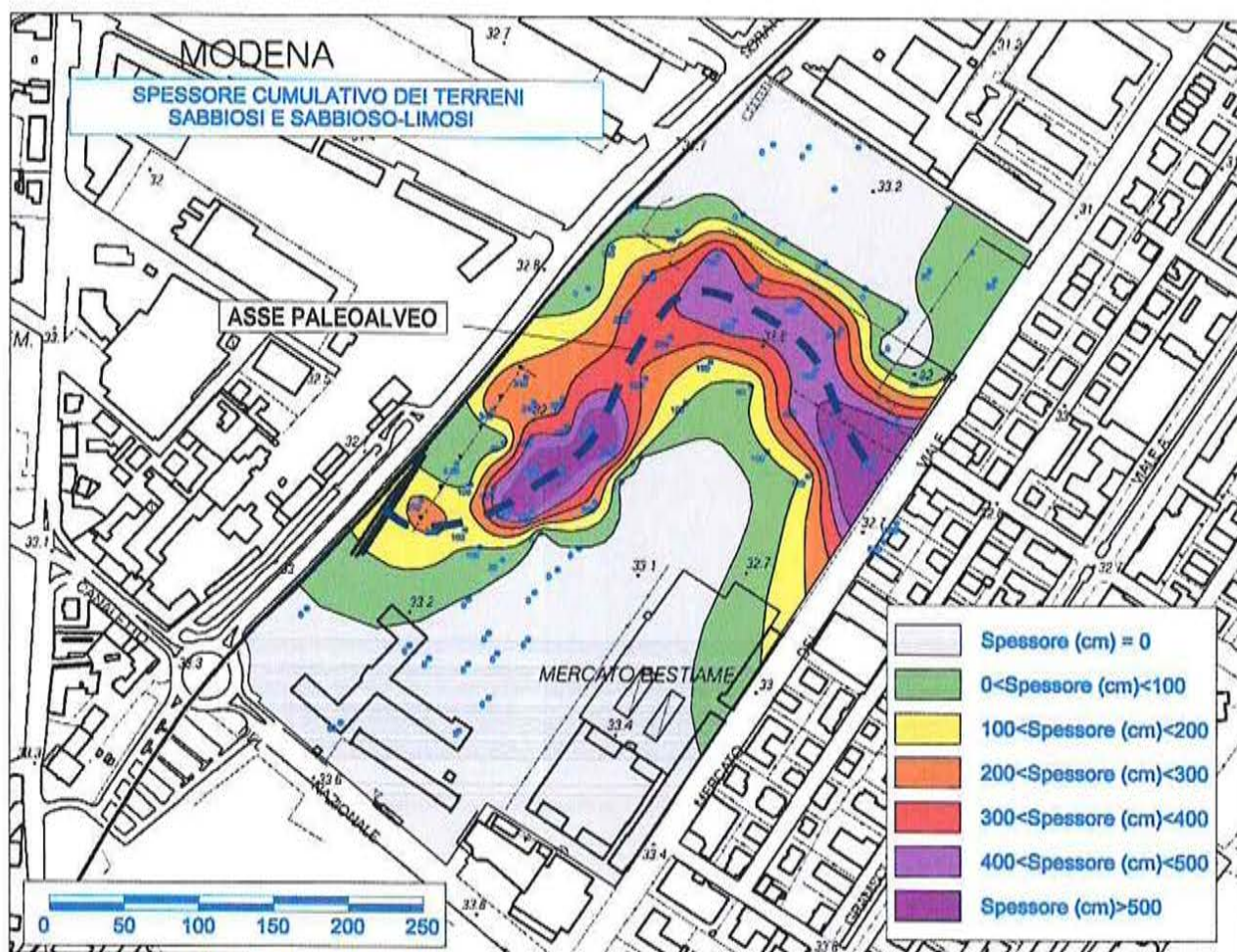
La Figura 42 mostra l'andamento delle isobate del tetto dei depositi ghiaiosi con profondità variabili da -21 a -23 m dal piano di campagna attuale.

Figura 42: CARTA DELLE ISOBATE DEL TETTO DELLE GHIAIE



Nel comparto esaminato i terreni di copertura sono caratterizzati litologicamente da prevalenti argille e limi nei settori meridionale e settentrionale, mentre nel settore centrale sono presenti, soprattutto tra -5 e -15 metri di profondità, consistenti depositi sabbiosi e sabbioso-limosi che individuano un paleoalveo, come evidenzia la cartografia di Figura 43, in cui si riporta la spessore cumulativo di tali depositi che raggiungono valori massimi pari di circa 10 metri.

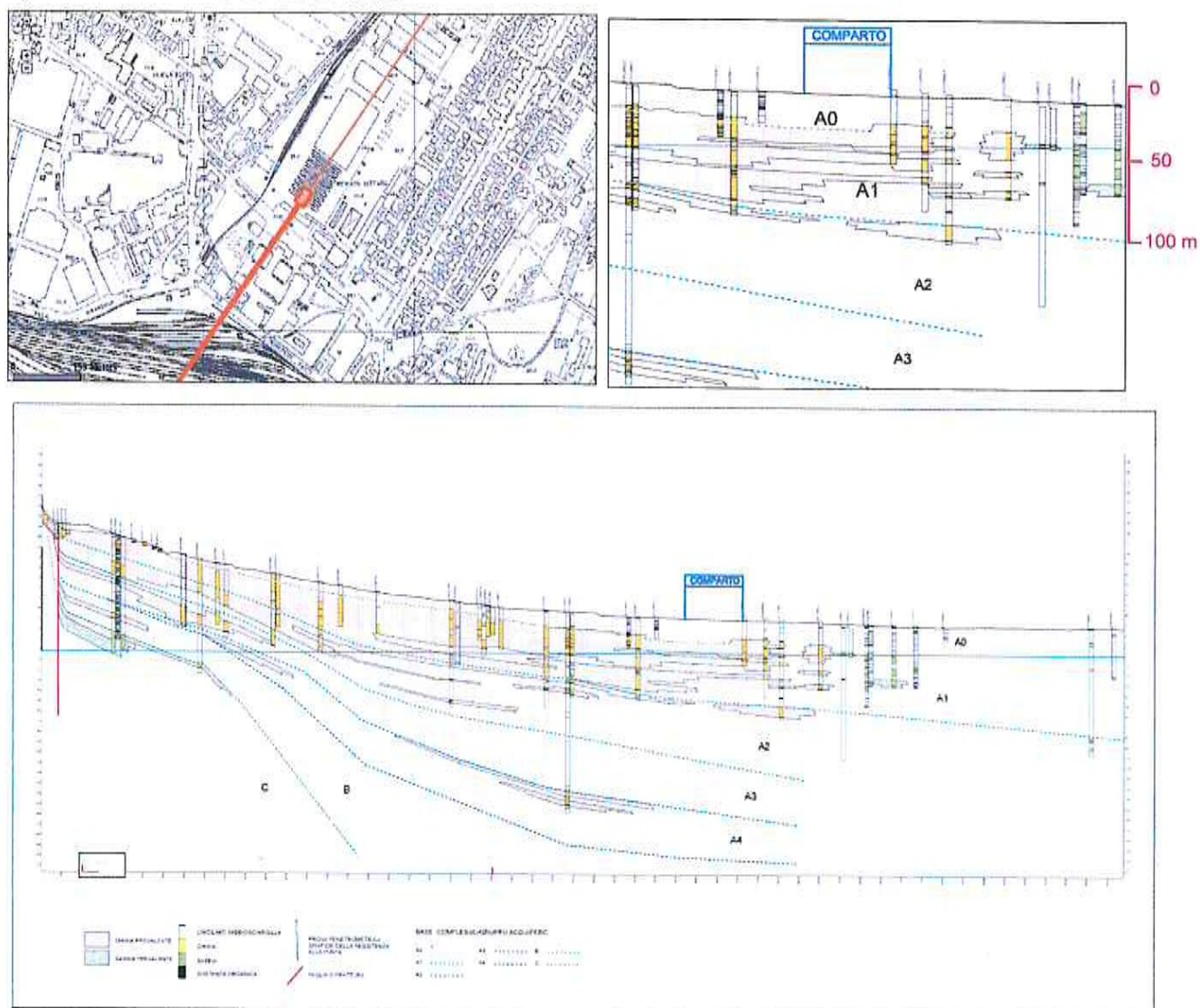
Figura 43: CARTA DEGLI SPESSORI CUMULATIVI DEI TERRENI SABBIOSI E SABBIOSO-LIMOSI



Le caratteristiche stratigrafiche in profondità sono note dalle stratigrafie di pozzi per acqua e come evidenziato nella sezione di Figura 44, estratta dal progetto CARG, che attraversa l'area in esame, ove si identificano diversi cicli deposizionali del quaternario continentale. Superficialmente sono presenti i depositi prevalentemente fini del Subsistema di Ravenna, di solito sede dell'acquifero A0 ed originatisi in condizioni di piana alluvionale durante l'ultimo periodo post-glaciale, che sono caratterizzati in questo settore da spessori di circa 15 metri.

Al di sotto si rinvenivano i cicli deposizionali del Subsistema di Villa Verrucchio (AES7) e del Subsistema di Bazzano (AES6).

Figura 44: SEZIONE DA PROGETTO CARG



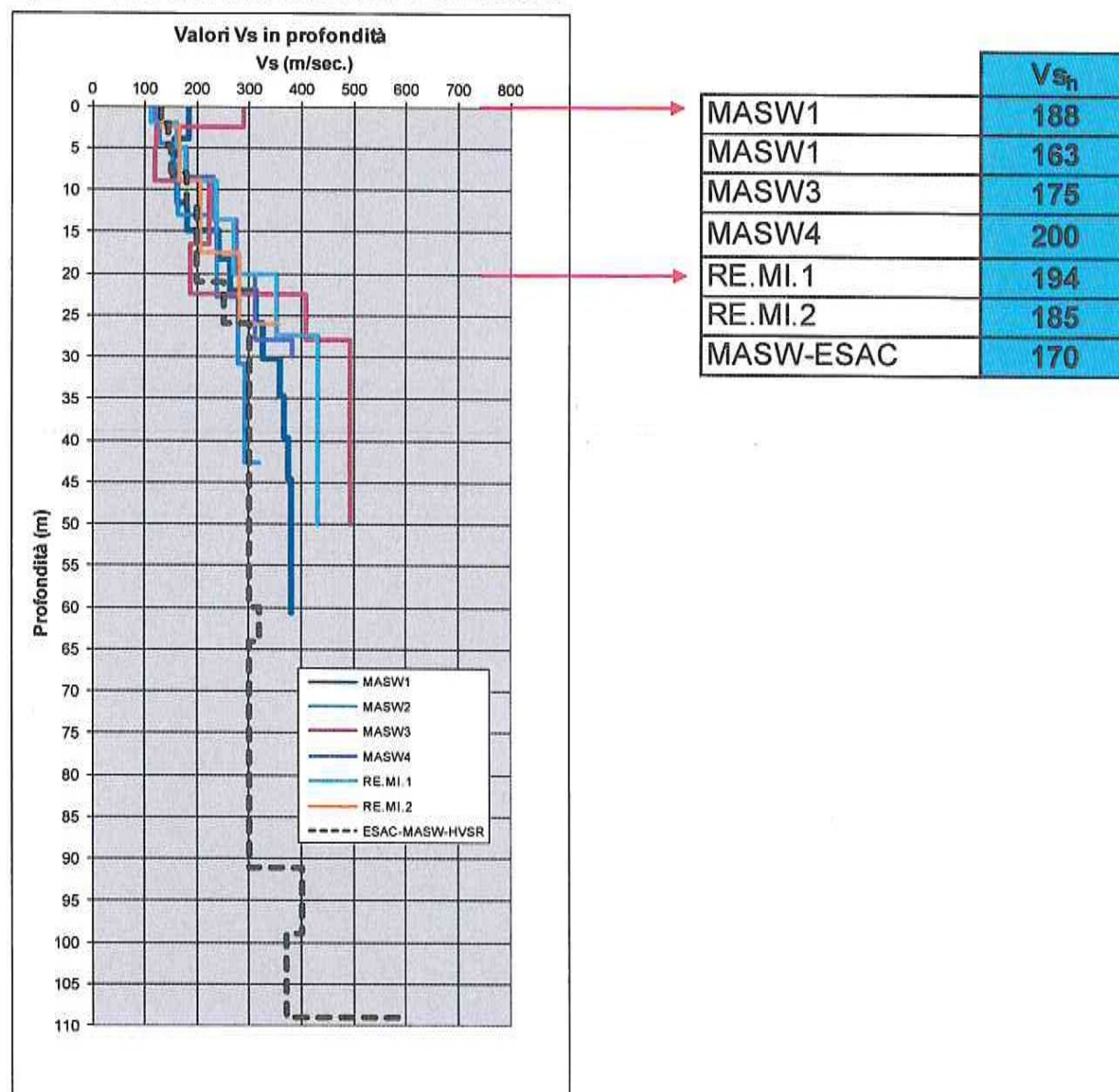
La situazione stratigrafica locale, riportata nella tabella seguente, con riferimento alla unità geologiche presenti, viene evidenziato con colore giallo l'intervallo stratigrafico che, nel settore centrale del comparto, caratterizza i depositi prevalentemente sabbiosi di canale del paleoalveo mentre in quello settentrionale e meridionale quelli più fini (limi e argille) di piana alluvionale.

Descrizione	Unità geologiche	Spessore (m)	Profondità base (m)
Limi e argille	Unità di Modena, Subsintema di Ravenna	2	2
		3	5
		3	8
Sabbie e/o Limi e Argille	Subsintema di Ravenna	4	12
		4	16
Alternanza di limi e sabbie limose	Unità di Vignola - Subsintema di Villa Verucchio AES7)	5	21
Banchi ghiaiosi alternati a strati pelitici e sabbiosi)		5	26
		22	48
		12	60
Argille	Subsintema di Bazzano (AES6)	4	64
Ghiaie		27	91
Argille		8	99
Ghiaie		>50	/

Come precedentemente descritto, le indagini geofisiche eseguite e quelle da bibliografia hanno evidenziato come i terreni di copertura alle ghiaie presentino valori di velocità delle onde di taglio mediamente bassi con valori di V_{sh} compresi tra i 163 e 200 m/s, con la presenza di un significativo contrasto di impedenza al contatto con il primo livello ghiaioso che presenta velocità nettamente superiori variabili mediamente tra 300 e 450 m/s (Figura 45). Tale contrasto è stato individuato ad una frequenza variabile da 1.75 a 2.25 Hz con un picco nel rapporto H/V delle prove di sismica passiva HVSR con una ampiezza di poco superiore a 2.

Un picco secondario è inoltre individuabile ad una frequenza di circa 0.95-1 Hz, che dovrebbe probabilmente corrispondere, come evidenziato dallo studio di microzonazione sismica di 2° livello del territorio comunale, alla base del subsistema di Bazzano (AES6), collocato quindi ad una profondità di poco superiore ai 100 metri dal piano di campagna.

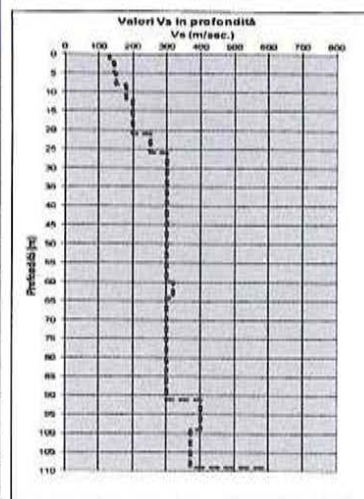
Figura 45: PROFILI DI VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO



L'elaborazione congiunta delle indagini geofisiche eseguite ha quindi consentito di definire un modello delle velocità delle onde di taglio (V_s), e di individuare alla profondità di circa 109 m la base di tale unità geologica, che viene considerata a tutti gli effetti un substrato a comportamento rigido per gli studi di microzonazione sismica ("bedrock sismico").

Di seguito si riporta il modello di riferimento per l'area in esame.

Descrizione	Spessore (m)	Profondità base (m)	Vs (m/s)
Limi e argille	2	2	130
	3	5	145
	3	8	150
Sabbie e/o Limi e Argille	4	12	180
	4	16	200
Alternanza di limi e sabbie limose	5	21	200
Banchi ghiaiosi alternati a strati pelitici e sabbiosi)	5	26	250
	22	48	300
Argille	12	60	300
Ghiaie	4	64	320
Argille	27	91	300
Ghiaie	8	99	400
Argille	10	109	370
Pseudo bedrock (base AES6)			



9 PERICOLOSITA' SISMICA DI RIFERIMENTO

Secondo quanto previsto dalla DGR 2193 la pericolosità sismica del sito in esame per il calcolo della risposta sismica locale nelle analisi di terzo livello viene definita a partire dai valori di scuotimento atteso, per un periodo di ritorno di 475 anni (10% di probabilità di superamento in 50 anni), su suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A. I valori di accelerazione attesi devono far riferimento ai punti di una griglia con passo 0.05 gradi disponibile nel sito web del servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della R.E.R. ed il valore di a_{ref} viene ottenuto interpolando i valori nei punti più prossimi al sito oppure utilizzando il valore del punto della griglia più vicino.

Per il sito in esame può essere considerato un valore di a_{ref} pari a 0.163 g (Figura 46), e pertanto si è determinato lo spettro di risposta in accelerazione (smorzamento pari al 5%) a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (Figura 47).

Figura 46: MAPPA DI PERICOLOSITÀ SISMICA DEL COMUNE DI MODENA

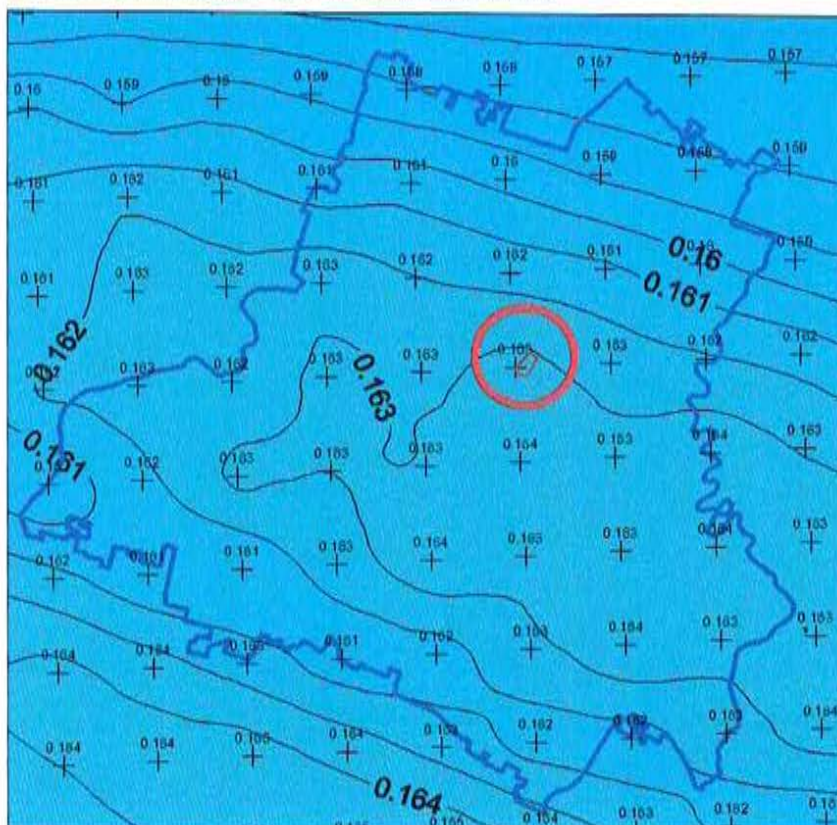
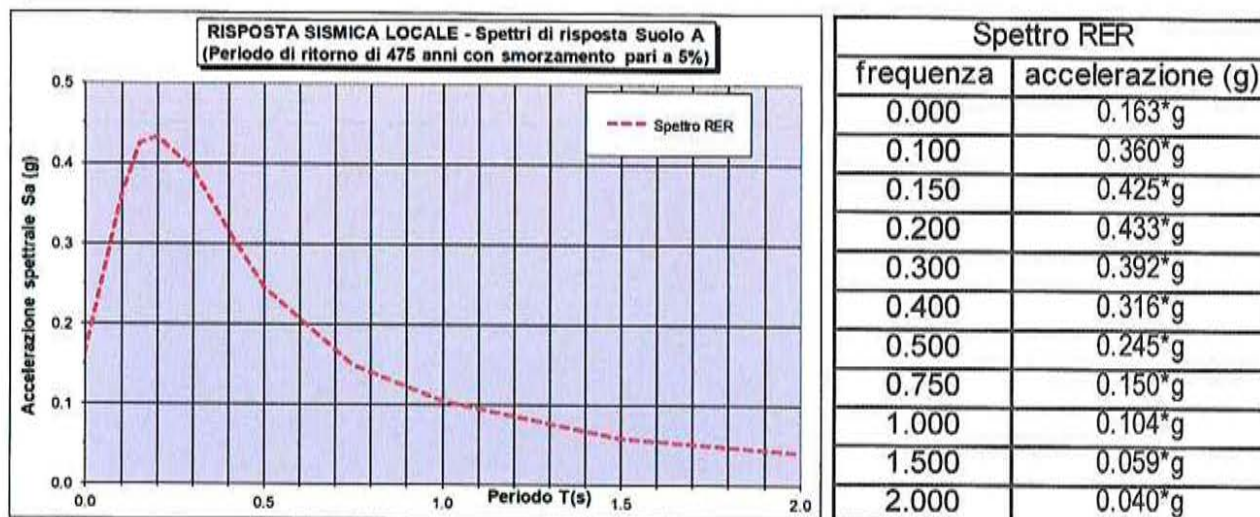


Figura 47: SPETTRO NORMALIZZATO RER



10 STUDIO DI RISPOSTA SISMICA LOCALE (III LIVELLO)

10.1 DATI INPUT SISMICO

Tra i diversi programmi di calcolo per eseguire modellazioni numeriche ai fini della valutazione della risposta sismica locale, si è utilizzato il programma EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered Soil Deposits), basato sul codice SHAKE 91 per quanto concerne le soluzioni relative alle propagazioni delle onde di taglio. Si tratta di un modello monodimensionale applicabile al sito in esame, in cui le cause principali di amplificazione del moto sismico sono il fenomeno di intrappolamento di onde S all'interno della successione stratigrafica, favorito dal contrasto di impedenza fra terreno e basamento roccioso e la risonanza, determinata dalla prossimità tra le frequenze del moto al substrato e quelle naturali di vibrazione della successione stratigrafica. L'analisi è di tipo lineare equivalente che consiste nell'esecuzione di una sequenza di analisi lineari complete con aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento fino al soddisfacimento di un prefissato criterio di convergenza. Il calcolo è stato eseguito inserendo come segnale di input n° 3 terremoti (Allegato 4 della Delibera dell'Assemblea legislativa della R.E.R. N° 112 del 2 maggio 2007), provvedendo al taglio delle frequenze superiori ai 25 Hz, scalati sulla base di un valore di accelerazione massima orizzontale di picco (PGA) su un suolo di riferimento di tipo A, per $T=0$, espressa in frazione dell'accelerazione di gravità (arefg - 10% di probabilità di superamento in 50 anni) pari a 0.163 g.

Di seguito sono riportati gli accelerogrammi utilizzati.

Figura 48: ACCELEROGRAMMA 000046XA

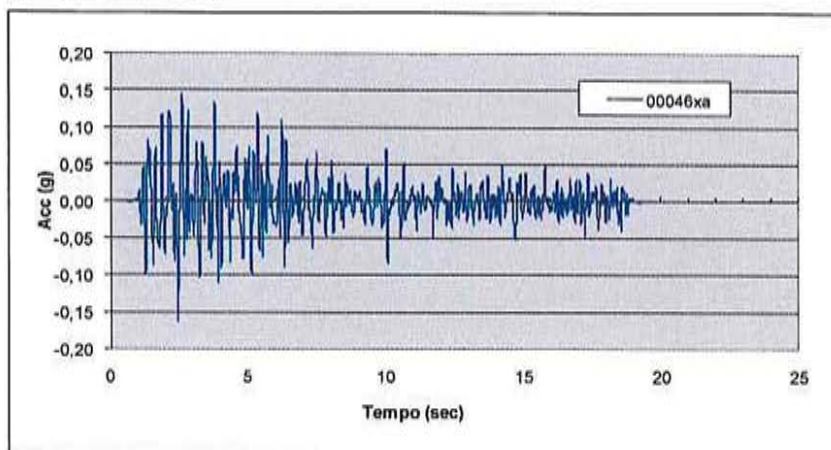


Figura 49: ACCELEROGRAMMA 000126XA

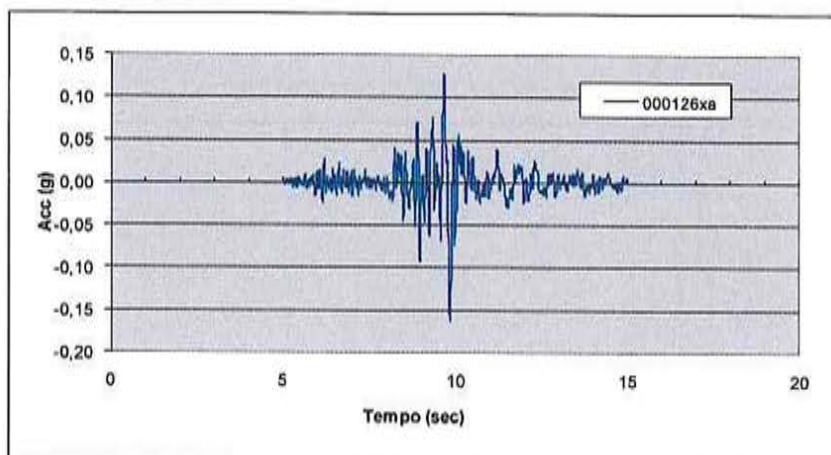
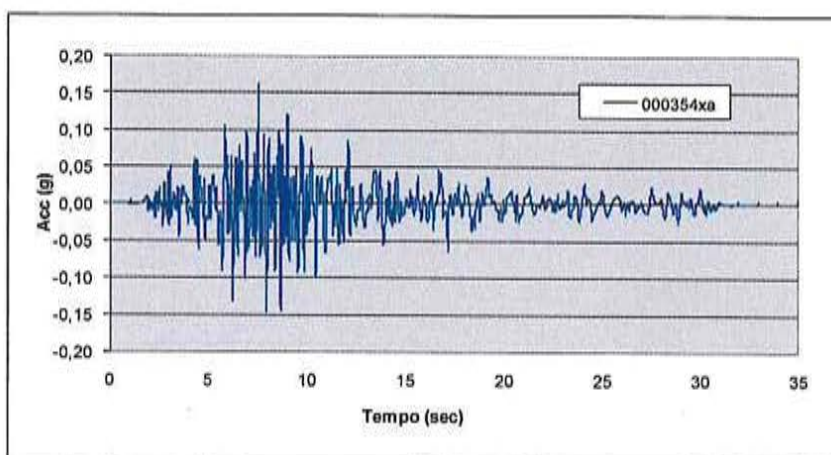
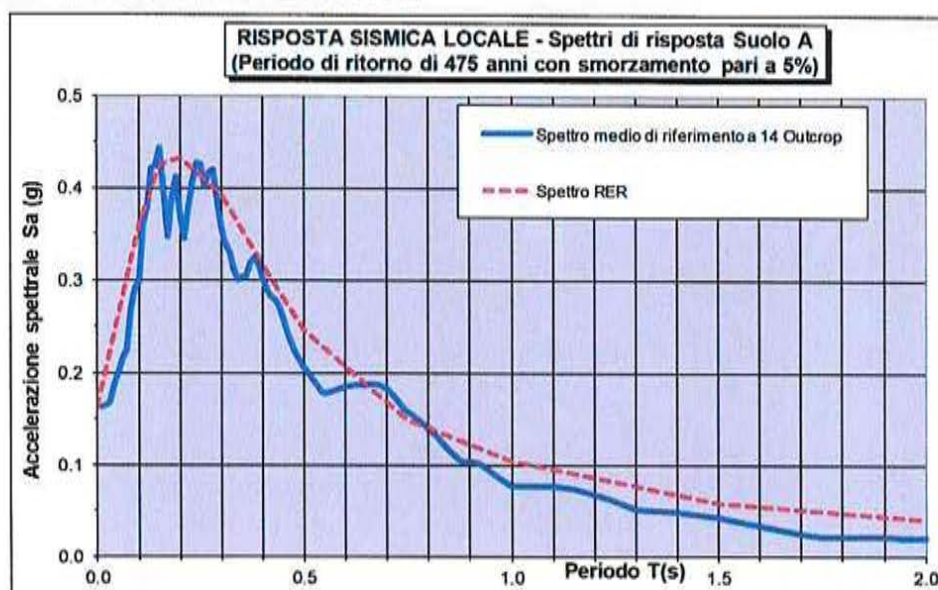


Figura 50: ACCELEROGRAMMA 0000354XA



Lo spettro di risposta medio degli accelerogrammi utilizzati è compatibile con lo spettro definito dalla R.E.R.

Figura 51: SPETTRO MEDIO DI RIFERIMENTO SUOLO A



L'analisi è stata effettuata inoltre a partire da curve di variazione del modulo di rigidezza a taglio G e del fattore di smorzamento D (damping ratio) in funzione della deformazione per le diverse tipologie di materiali tratte da "Gruppo di lavoro MS, 2008 - Indirizzi e

criteri per la microzonazione sismica - Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd" e riportate nelle figure seguenti.

Figura 52: VARIAZIONE DI G E D - ARGILLA -(VUCETIC – P.I. 50)

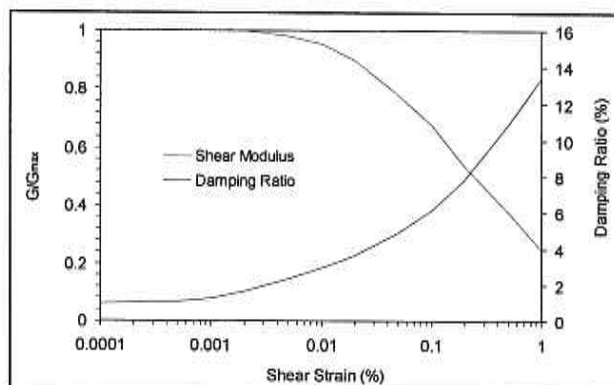


Figura 53: VARIAZIONE DI G E D - SABBIE - (SEED & IDRIS - MEDIA)

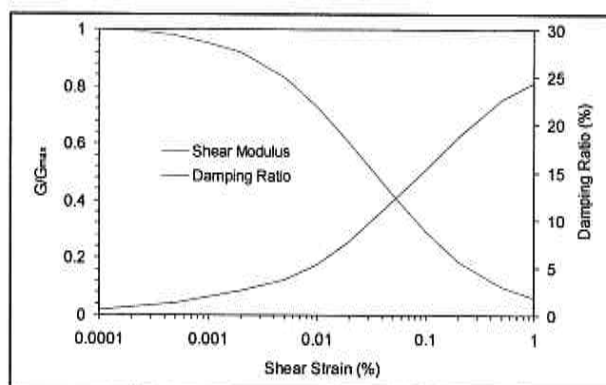
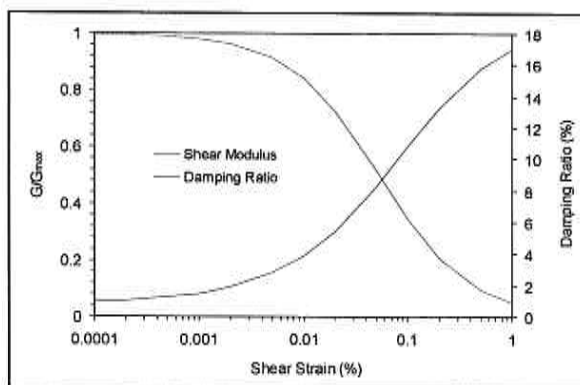


Figura 54: VARIAZIONE DI G E D GHIAIE (ROLLINS ET ALII 1998)



10.2 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Come già riportato in precedenza le analisi effettuate hanno evidenziato nel sito oggetto di studio la presenza due settori che hanno caratteristiche litostratigrafiche superficiali differenti. Nel settore centrale è stato individuato un paleoalveo caratterizzato dalla presenza di terreni prevalentemente sabbiosi, principalmente nell'intervallo compreso tra i -5 e -15 m dal p.d.c., mentre in quello meridionale e settentrionale tali depositi risultano assenti e predominano litotipi argillosi e limosi.

Si è quindi proceduto ad eseguire l'analisi di risposta sismica locale facendo riferimento ai seguenti modelli geologici, che differiscono unicamente per le caratteristiche litologiche nell'intervallo di profondità tra 8 e 16 metri.

Descrizione PROFILO A	Spessore (m)	Descrizione PROFILO B	Spessore (m)
Limi e argille	2	Limi e argille	2
	3		3
	3		3
Sabbie	4	Limi e Argille	4
	4		4
Alternanza di limi e sabbie limose	5	Alternanza di limi e sabbie limose	5
Banchi ghiaiosi alternati a strati pelitici e sabbiosi)	5	Banchi ghiaiosi alternati a strati pelitici e sabbiosi)	5
	22		22
Argille	12	Argille	12
Ghiaie	4	Ghiaie	4
Argille	27	Argille	27
Ghiaie	8	Ghiaie	8
Argille	10	Argille	10
Bedrock sismico			

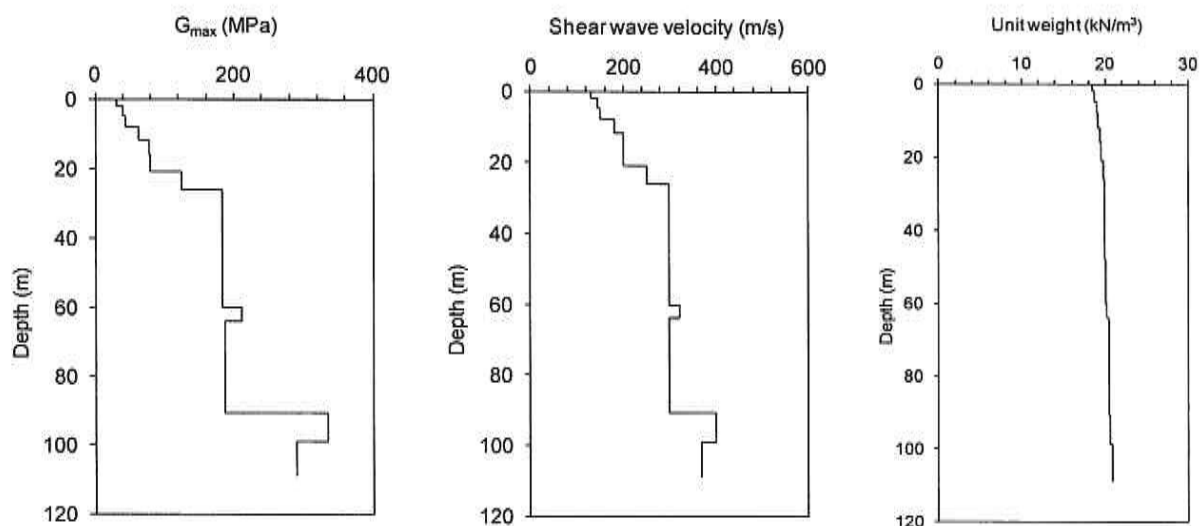
10.2.1 PROFILO A

Il calcolo di Risposta Sismica Locale è stato eseguito facendo riferimento al piano di campagna, ed è stato inserito il profilo del terreno fino alla profondità di 109 m, che corrisponde al Bedrock sismico considerato come individuato e descritto nei paragrafi precedenti, secondo lo schema riportato di seguito (Figura 55).

Figura 55: DATI DI INPUT EERA - PROFILO A

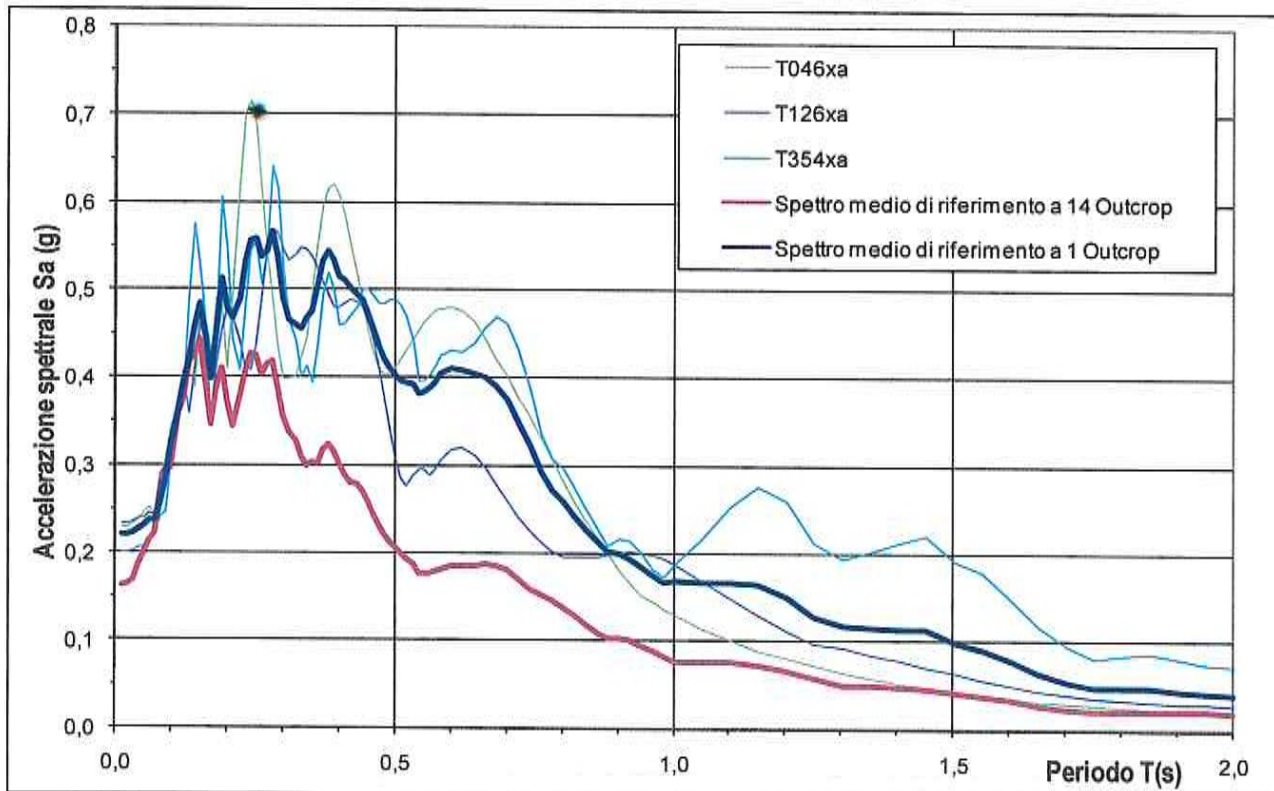
	Layer Number	Soil Material Type	Number of sublayers in layer	Thickness of layer (m)	Maximum shear modulus G_{max} (MPa)	Initial critical damping ratio (%)	Total unit weight (kN/m ³)	Shear wave velocity (m/sec)	Location and type of earthquake input motion	Location of water table
Surface	1	1	1	2.0	31.87		18.50	130		W
	2	1	1	3.0	40.08		18.70	145		
	3	1	1	3.0	43.35		18.90	150		
	4	2	1	4.0	63.08		19.10	180		
	5	2	1	4.0	78.70		19.30	200		
	6	1	1	5.0	79.51		19.50	200		
	7	3	1	5.0	125.51		19.70	250		
	8	3	1	22.0	182.57		19.90	300		
	9	1	1	12.0	183.49		20.00	300		
	10	3	1	4.0	210.85		20.20	320		
	11	1	1	27.0	187.16		20.40	300		
	12	3	1	8.0	335.98		20.60	400		
	13	1	1	10.0	290.27		20.80	370		
Bedrock		0			1435.27	1	22.00	800	Outcrop	

NB: Per la tipologia di terreno (soil material type) il numero 1 indicata argille, 2 sabbie e 3 ghiaie



L'elaborazione, svolta sui tre terremoti di riferimento, ha fornito i risultati, in termini di spettro di risposta elastico in accelerazione massima orizzontale in superficie, per un valore di smorzamento critico pari al 5%, presentati graficamente in Figura 56.

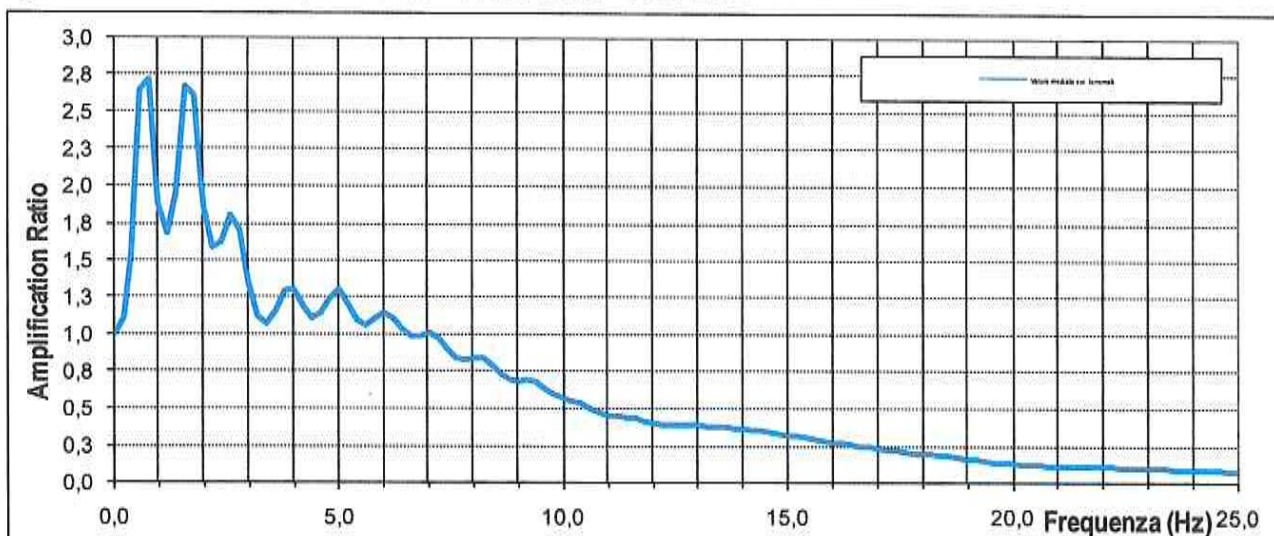
Figura 56: SPETTRI DI RISPOSTA (Periodo di ritorno di 475 anni con smorzamento pari a 5%)- Profilo A



Il valore medio della PGA in superficie è risultato pari a 0.221 g, con un fattore di amplificazione (PGA/PGA0) pari a 1.36.

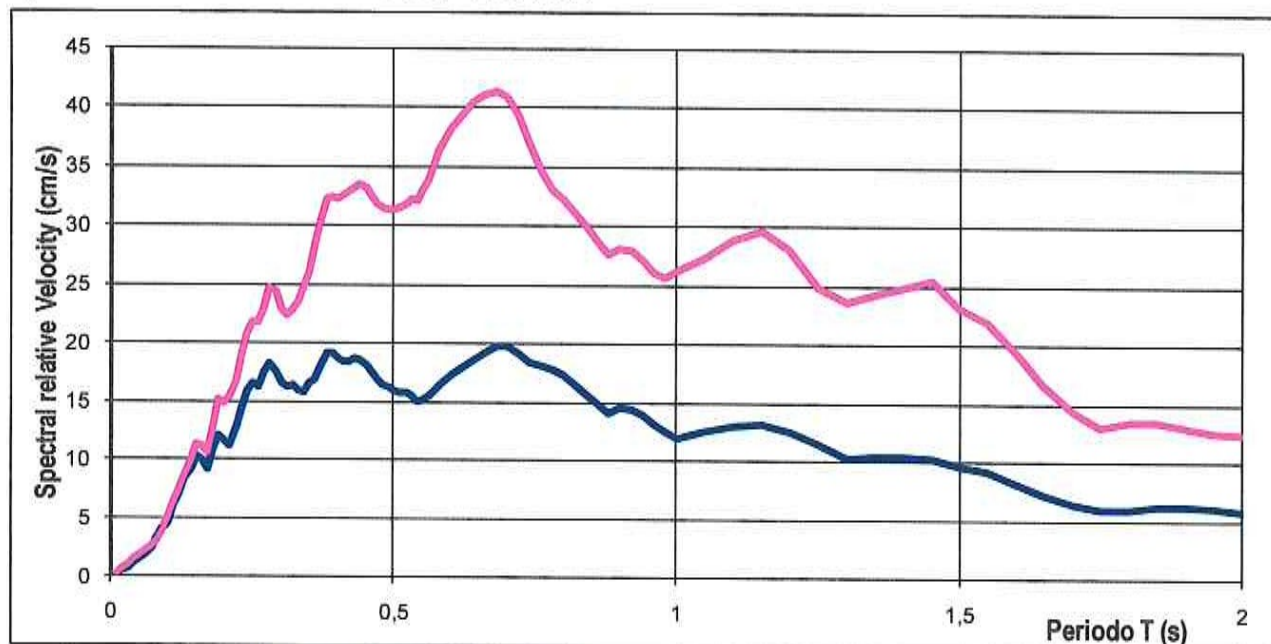
La Figura 57 riporta invece la funzione di amplificazione locale ricavata dallo studio eseguito mediata sui 3 input sismici di riferimento, e identificabile come il rapporto tra l'ampiezza degli spettri di Fourier al sito e l'ampiezza in corrispondenza della formazione rocciosa affiorante utilizzando un valore di smorzamento critico pari al 5%.

Figura 57: AMPLIFICAZIONE (1 OUTCROP – 14 OUTCROP) – PROFILO A



L'analisi ha inoltre permesso di ricavare gli spettri in pseudo - velocità medi sia al suolo di riferimento che alla superficie del sito esaminato (Figura 58).

Figura 58: SPETTRI IN PSEUDO VELOCITÀ – PROFILO A



INTENSITA' DI HOUSNER		(tra 0.10 e 0.50 sec)		(tra 0.5 e 1.0 sec)	
—	Spettro mediato sui terremoti su suolo di riferimento 14 Outcrop	Si	[cm]	6,14	8,37
—	Spettro mediato sui terremoti su suolo di riferimento 1 Outcrop	Si ₀	[cm]	9,24	16,97
		SI/SI ₀		2,03	

Il fattore di amplificazione in termini di rapporto (Si/SI₀) di Intensità di Housner negli intervalli di frequenza 0.1 - 0.5 sec e 0.5 - 1.0 sec., risultano pari rispettivamente a 1.51 e 2.03.

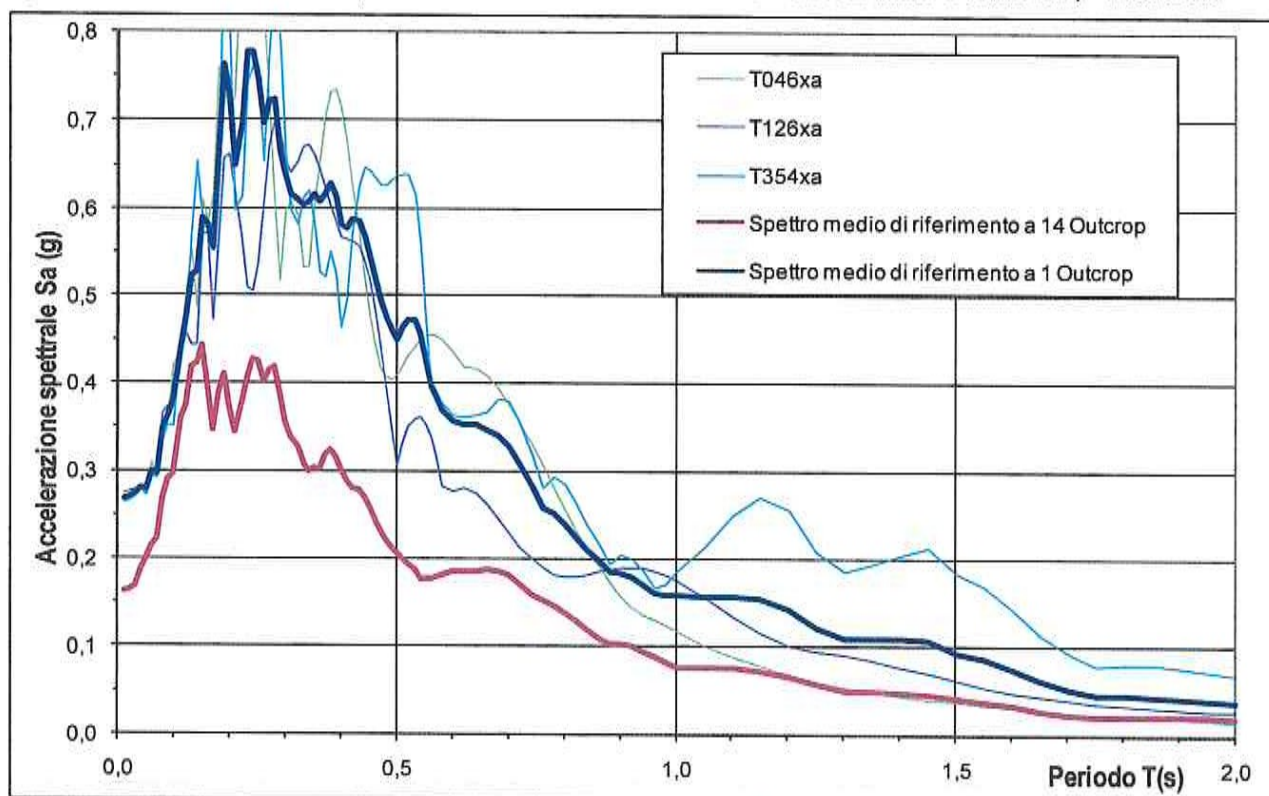
La tabella seguente riporta i risultati ottenuti.

TABELLA RIASSUNTIVA PARAMETRI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE - Profilo A	
Valore della PG Ao di riferimento	0,163
Valore della PGA rilevata sul sito in esame	0,221
Fattore di Amplificazione (FAPGA)	1,36
Coefficiente di amplificazione in termini di SI/SI ₀ – intervallo di frequenza 0,10÷0,50s	1,51
Coefficiente di amplificazione in termini di SI/SI ₀ – intervallo di frequenza 0,50÷1,00s	2,03
FA, a basso periodo (determinato intorno al periodo proprio per il quale si ha il massimo della risposta in accelerazione)	1,41
FV, a periodo proprio (per il quale si ha la massima risposta in pseudovelocità)	2,07

10.2.2 PROFILO B

La stessa procedura è stata applicata per il profilo B, ottenendo lo spettro di risposta riportato in Figura 59.

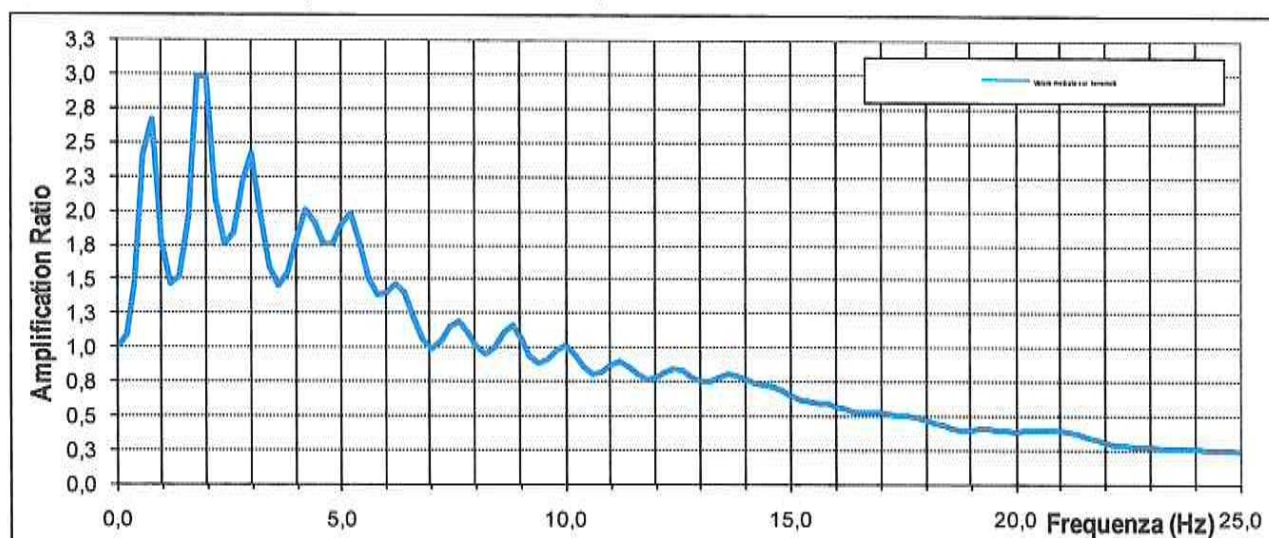
Figura 59: SPETTRI DI RISPOSTA (PERIODO DI RITORNO DI 475 ANNI CON SMORZAMENTO PARI A 5%) - PROFILO B



Il valore medio della PGA in superficie è risultato pari a 0.270 g, con un fattore di amplificazione (PGA/PGA0) pari a 1.65.

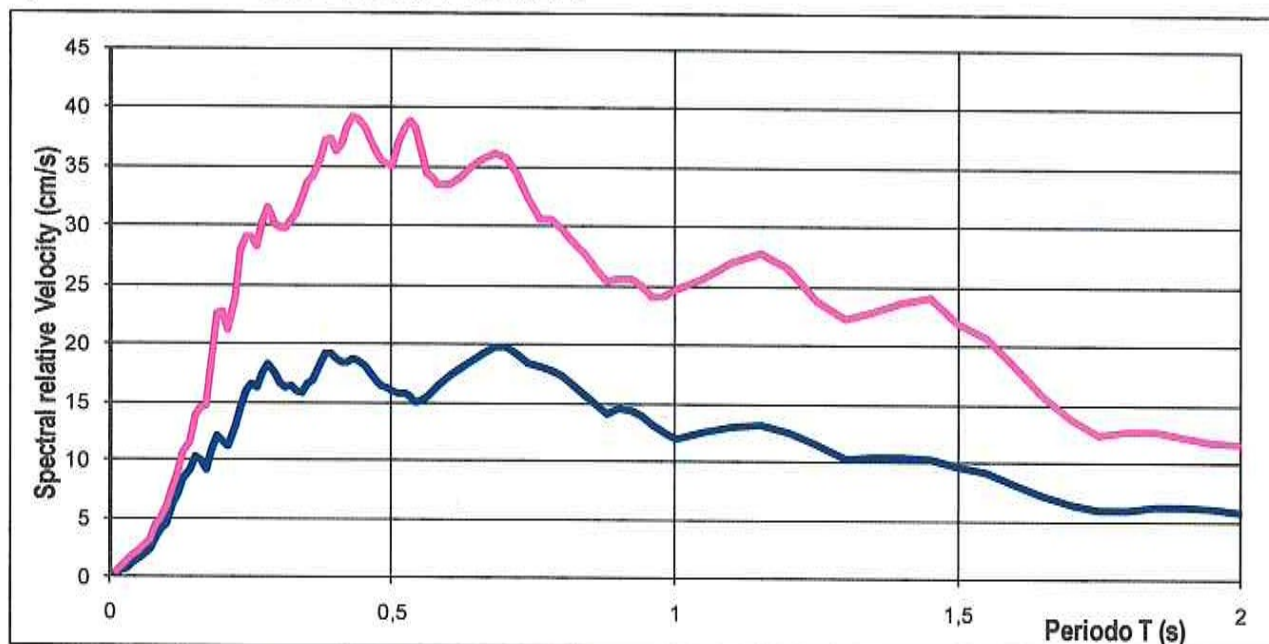
La Figura 60 riporta invece la funzione di amplificazione locale ricavata dallo studio eseguito mediata sui 3 input sismici di riferimento, e identificabile come il rapporto tra l'ampiezza degli spettri di Fourier al sito e l'ampiezza in corrispondenza della formazione rocciosa affiorante utilizzando un valore di smorzamento critico pari al 5%.

Figura 60: AMPLIFICAZIONE (1 OUTCROP – 14 OUTCROP) – PROFILO B



L'analisi ha inoltre permesso di ricavare gli spettri in pseudo - velocità medi sia al suolo di riferimento che alla superficie del sito esaminato (Figura 61).

Figura 61: SPETTRI IN PSEUDO VELOCITÀ – PROFILO B



INTENSITA' DI HOUSNER		(tra 0.10 e 0.50 sec)			(tra 0.5 e 1.0 sec)		
—	Spettro mediato sui terremoti su suolo di riferimento 14 Outcrop	SI	[cm]	6,14	SI	[cm]	8,37
—	Spettro mediato sui terremoti su suolo di riferimento 1 Outcrop	SI ₀	[cm]	11,45	SI ₀	[cm]	15,86
		SI/SI ₀		1,87	SI/SI ₀		1,90

Il fattore di amplificazione in termini di rapporto (SI/SI₀) di Intensità di Housner negli intervalli di frequenza 0.1 - 0.5 sec e 0.5 - 1.0 sec., risultano pari rispettivamente a 1.87 e 1.90.

La tabella seguente riporta i risultati ottenuti.

TABELLA RIASSUNTIVA PARAMETRI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE - Profilo B	
Valore della PGA ₀ di riferimento	0,163
Valore della PGA rilevata sul sito in esame	0,270
Fattore di Amplificazione (FAPGA)	1,65
Coefficiente di amplificazione in termini di SI/SI ₀ – intervallo di frequenza 0,10÷0,50s	1,87
Coefficiente di amplificazione in termini di SI/SI ₀ – intervallo di frequenza 0,50÷1,00s	1,90
FA, a basso periodo (determinato intorno al periodo proprio per il quale si ha il massimo della risposta in accelerazione)	1,77
FV, a periodo proprio (per il quale si ha la massima risposta in pseudovelocità)	2,03

10.3 MAPPE DI AMPLIFICAZIONE

I risultati delle analisi di risposta sismica locale consentono di ridefinire la mappa di amplificazione in termini di PGA/PGA₀ e SI/S₀ come riportato nelle figure seguenti.

Figura 62: MAPPA PGA ATTESA

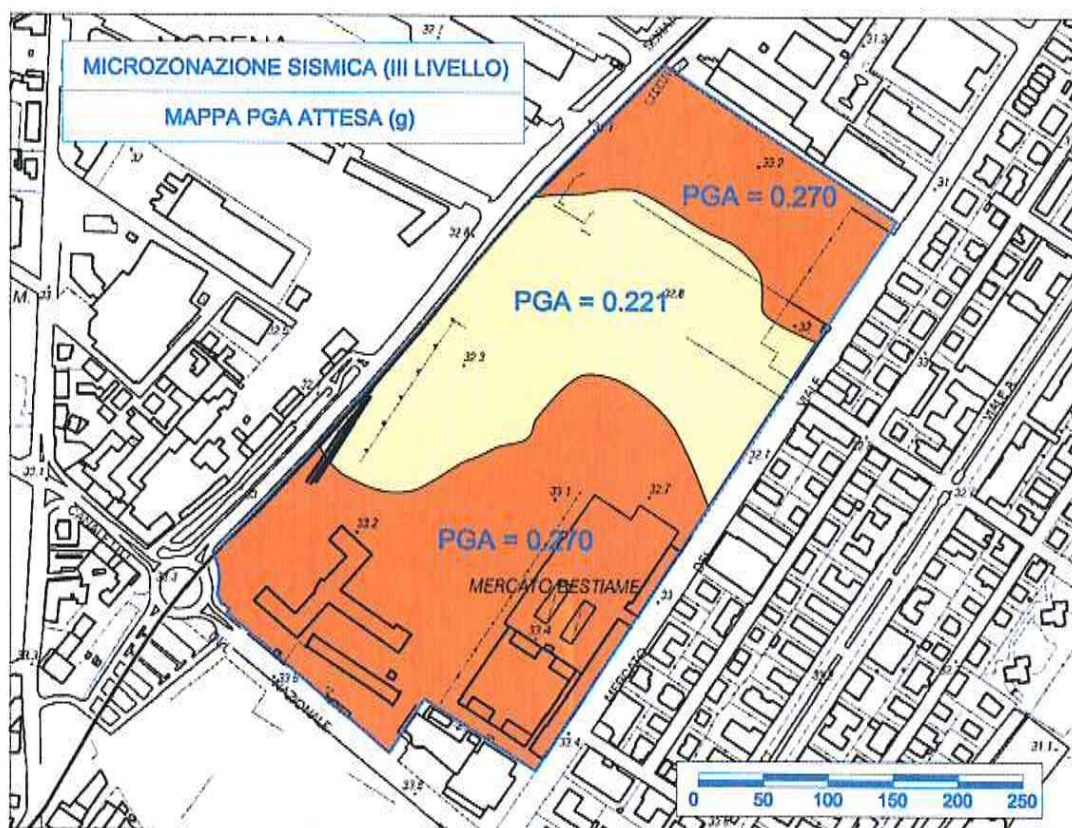


Figura 63: MAPPA FA_{PGA}

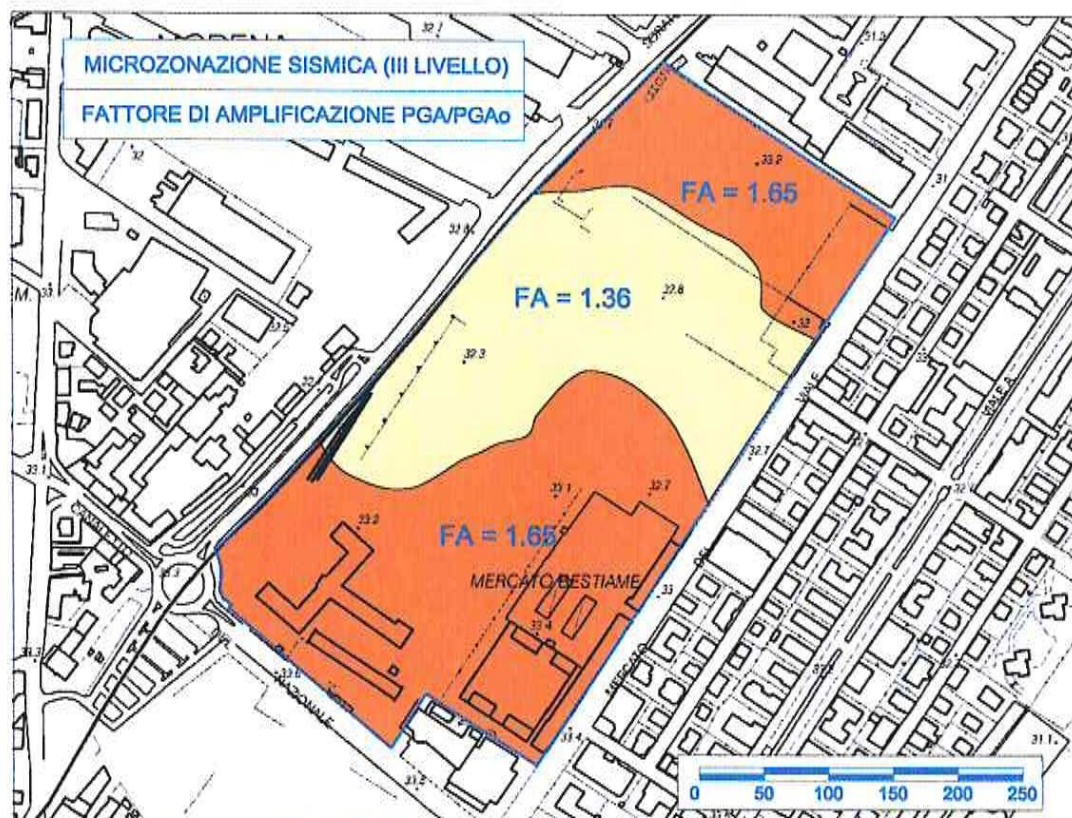


Figura 64: MAPPA FA_{IS} (0.1-0.5 s)

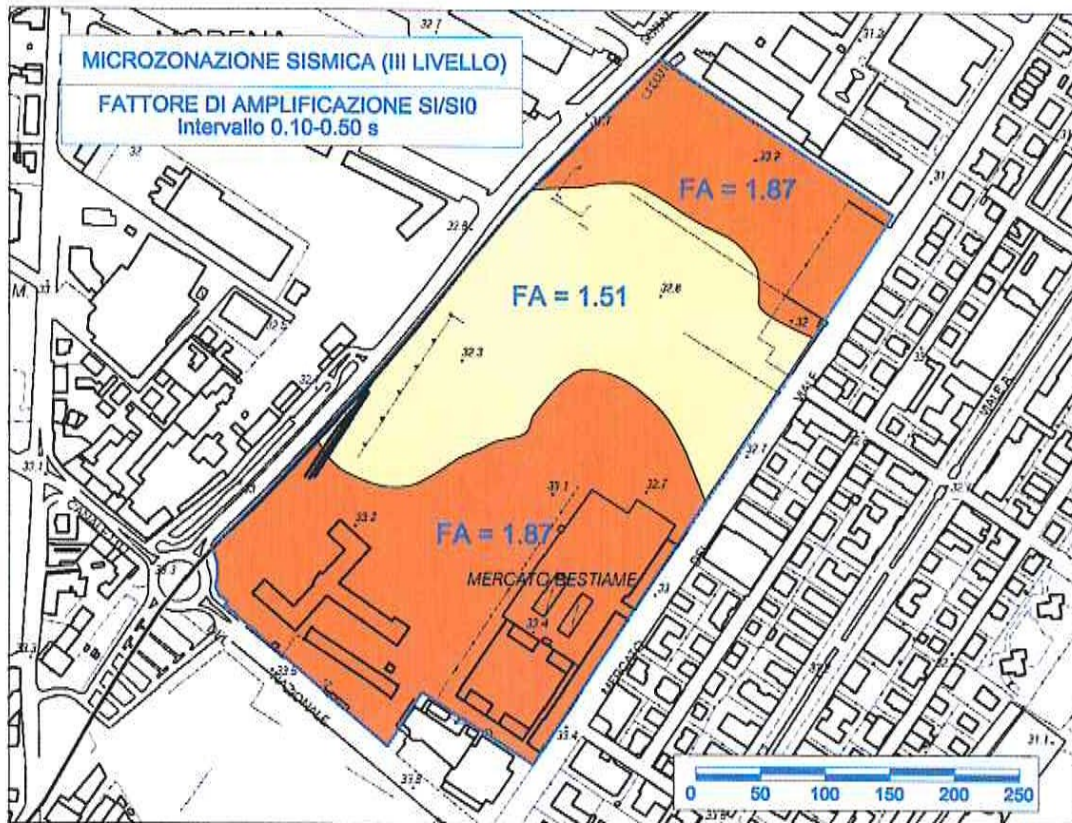
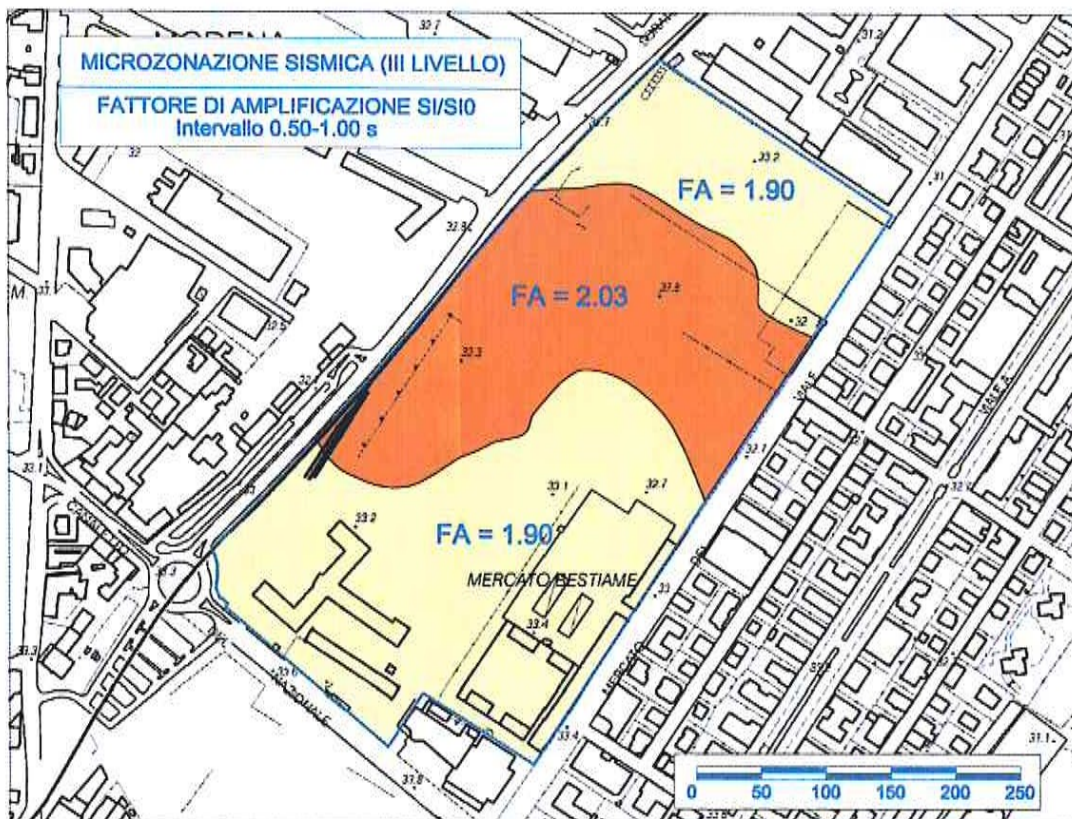


Figura 65: MAPPA FA_{IS} (0.5-1.0 s)



11 ANALISI DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE (III LIVELLO)

La verifica della suscettibilità alla liquefazione è stata eseguita considerando i risultati delle prove penetrometriche statiche, valutando l'indice di potenziale liquefazione IL alla profondità di 15-20 metri a secondo della lunghezza d'indagine della prova disponibile.

Le indagini eseguite hanno evidenziato la presenza di una falda freatica con valori di soggiacenza variabili, con valori minimi di circa 1 metro da p.c.. Quest'ultimo valore è stato cautelativamente considerato nei calcoli eseguiti.

Si è pertanto proceduto con una elaborazione dei dati a disposizione per verificare la possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione attraverso un'analisi semplificata in condizioni di free-field valutando, ad ogni quota z del deposito compresa nei primi 20 m, la suscettibilità alla liquefazione attraverso un coefficiente di sicurezza FL dato dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione (CRR) e sollecitazione indotta dall'azione sismica (rapporto di tensione ciclica CSR).

Per quanto concerne la magnitudo si è fatto riferimento ad un valore pari a 6.14 che corrisponde al valore massimo di magnitudo momento Mw per la zona sismogenetica n° 912 denominata "Dorsale Ferrarese" a cui l'area in esame appartiene.

Per quel che concerne invece l'accelerazione massima attesa in superficie nell'area in esame, è stato utilizzato il valore pari di 0.221 g, ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale per il profilo A.

Il calcolo eseguito ha fatto riferimento al metodo di R.W. Boulanger e I.M. Idriss riportata nella monografia "CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES" (Center for Geotechnical Modeling - Department of Civil and Environmental Engineering University of California - Davis, California, Aprile 2014).

Con tale metodo il coefficiente di sicurezza FL viene calcolato a partire dalla seguente formula:

$$F_L = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma = \frac{CRR_{7.5}}{CSR_{7.5}} \cdot K_\sigma$$

CRR7.5 : Rapporto di resistenza ciclica per magnitudo $M = 7.5$

MSF : Fattore di scala della Magnitudo (Magnitude Scale Factor)

K_σ : Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor)

CSR : Rapporto di Tensione Ciclica (Cyclic Stress Ratio)

Il rapporto di tensione ciclica CSR, ad una determinata profondità, è valutato attraverso l'espressione di Seed e Idriss (1971) riportata di seguito:

$$CSR_{M,\sigma'v} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d$$

Dove:

a_{max} : accelerazione di picco al piano campagna del terremoto di progetto;

g : accelerazione di gravità;

σ_{v0} : tensione totale verticale alla profondità considerata;

σ'_{v0} : tensione efficace verticale alla profondità considerata;

r_d : coefficiente riduttivo dell'azione sismica per valutare la deformabilità del sottosuolo;

Il coefficiente riduttivo dell'azione sismica r_d è ricavato, per profondità del piano campagna inferiori a 20 m, mediante la seguente espressione (Idriss (1999) in estensione dei lavori di Goleosorkhi, 1989):

$$\begin{aligned} 5. \quad CSR_{M,\sigma'v} &= 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d \\ r_d &= \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] \\ \alpha(z) &= -1.012 - 1.126 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \\ \beta(z) &= 0.106 + 0.118 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \end{aligned}$$

Dove Z è la profondità dal piano campagna espressa in metri ed M la magnitudo di momento dell'evento sismico atteso.

Poiché le procedure semplificate sono state elaborate sulla base di osservazioni sul comportamento dei depositi durante eventi sismici con magnitudo di momento M pari a 7.5, per eventi di magnitudo diversa occorre ridurre il carico sismico a quello equivalente di un terremoto di magnitudo 7.5 ($CSR_{M=7.5}$) attraverso la seguente relazione:

$$CSR_{M=7.5} = \frac{CSR}{MSF}$$

In cui MSF è un fattore di scala per la magnitudo che è ricavato dall'espressione riportata di seguito (Boulanger, 2008):

$$4. \quad MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left[8.64 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325 \right]$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180} \right)^3 \leq 2.2$$

Per quel che concerne invece la valutazione del rapporto di resistenza ciclica CRR , la resistenza penetrometrica, q_c , ricavata dalle indagini penetrometriche statiche CPT, deve essere ricondotta ad un valore normalizzato, q_{c1N} , mediante la seguente espressione:

$$q_{c1N} = C_N \cdot \left(\frac{q_c}{p_a} \right)$$

Dove: p_a (pressione atmosferica pari a 100kPa) e q_c espressa nella stessa unità di misura.

Il coefficiente C_N (fattore correttivo per tener conto dell'influenza della pressione verticale efficace) è ricavato dalla seguente espressione (Boulanger e Idriss, 2004):

$$C_Q = \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^n$$

Tale coefficiente non deve superare il valore di 1.7.

Il valore di n viene calcolato per via iterativa con la seguente espressione

$$m = 1.338 - 0.294 * (q_{c1Ncs})^{0.264} \quad \text{con } 21 \leq q_{c1Ncs} \leq 254$$

Dal valore di q_{c1Ncs} è possibile ottenere la resistenza alla liquefazione, per eventi sismici di magnitudo di momento pari a $M=7.5$, mediante la seguente espressione.

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right]$$

Il parametro q_{c1Ncs} per materiali con frazione fine non trascurabile, con il metodo di Idriss e Boulanger, 2014, è determinato con la seguente espressione

$$q_{c1n,cs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1n}$$

dove

$$\Delta q_{c1n} = \left(11.9 + \frac{q_{c1Ncs}}{14.6} \right) \cdot \exp \left[1.63 + \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2} \right)^2 \right]$$

il valore del contenuto di fine (FC) viene calcolato con la seguente formula

$$FC = 80 \cdot I_e - 137$$

Il parametro di comportamento del terreno I_e da inserire nelle equazioni sopra riportate è una funzione della resistenza alla punta q_c e della resistenza laterale del manicotto f_s misurate dalle prove penetrometriche CPT.

In particolare:

$$I_e = \sqrt{(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2} \quad \text{Indice di comportamento del terreno (Robertson, 1990)}$$

con:

$$Q = \left[\left(\frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_a} \right) \right] \left[\left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^m \right]$$

resistenza penetrometrica normalizzata

$$F = \left[\frac{f_s}{(q_c - \sigma_{vo})} \right] * 100\%$$

resistenza laterale normalizzata

L'esponente n di normalizzazione viene determinato per via iterativa.

Considerando che il metodo di calcolo applicato (B&I, 2014) fa riferimento a prove CPTU è stata operata la seguente modifica dei parametri di Q_{C1Ncs} e I_c , desunta da Johann Facciorusso, Claudia Madiati, Giovanni Vannucchi, 2016 ("Correction of Mechanical CPT Data for Liquefaction Resistance Evaluation" Johann Facciorusso, Claudia Madiati, Giovanni Vannucchi - University of Florence Via di S.Marta, 3, Florence, Italy)

$$Q_{C1Ncs,m(o)} = 0.0260 q_{C1Ncs,m}^{1.1511} + 49.6590 \pm 10 -$$

$$I_{C,m(o)} = 0.9464 I_{C,m} \pm 0.28$$

Dal parametro FL viene quindi calcolato il rischio di liquefazione attraverso la valutazione dell'Indice IL con la seguente espressione

$$IL = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

in cui il valore di $F(z)$ assume i seguenti valori (Iwasaki et al., 1982):

$$F(z) = 0 \quad \text{per } FSL > 1.2$$

$$F(z) = 2 \cdot 106 \cdot \exp(-18.427 \cdot FL) \quad \text{per } 0.95 \leq FSL \leq 1.2$$

$$F(z) = 1 - FSL \quad \text{per } FSL \leq 0.95$$

Il valore di profondità critica è assunto pari a 20 metri.

La scala di riferimento del rischio di liquefazione utilizzata in questo caso è quella di Sonmez (2003):

Indice del potenziale di liquefazione IL SONMEZ, 2003	Rischio di liquefazione
IL = 0	Nulla
0 < IL < 2	Basso
2 < IL < 5	Moderato
5 < IL < 15	Alto
IL > 15	Molto alto

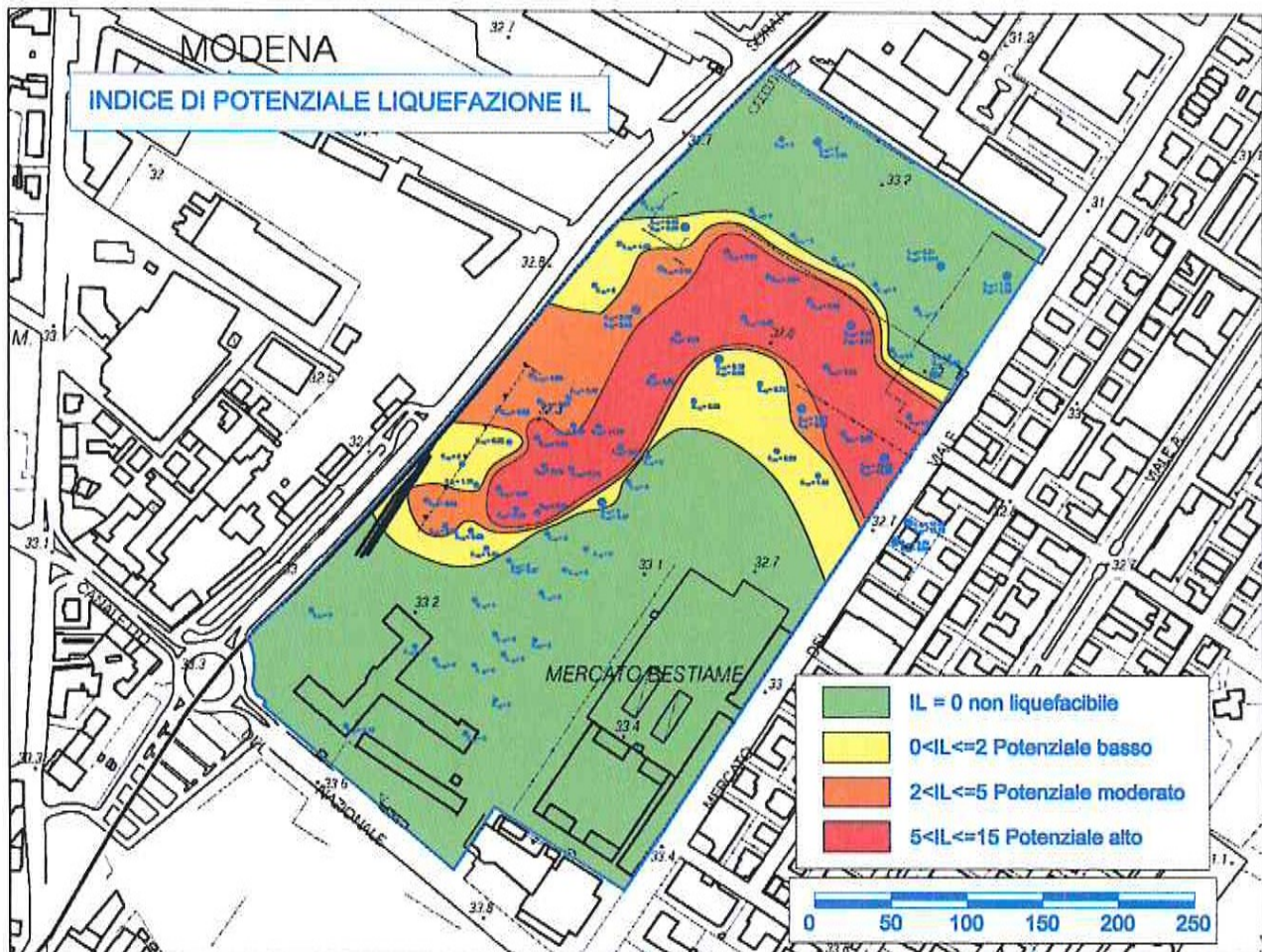
Nella tabella seguente sono riassunti i risultati delle verifiche in termini di IL, valutato per una profondità di 15 m per le prove penetrometriche in cui questa era la massima profondità indagata, e profondità di 15 e 20 m per quelle che si sono spinte a maggiore profondità. Nell'ELABORATO 2 sono riportati in forma integrale i risultati delle elaborazioni eseguite.

Parametri di input					I&B, 2014 - Correzione Johann Facciorusso, Claudia Madiai, Giovanni Vannucchi, 2016				Spessore livelli liquefacibili (cm)				
Prova	n°	Prof	Falda	Ag	IL ₁₅	rischio	IL ₂₀	rischio	0-5	5-10	10-15	15-20	Tot
Tipo		(m)	(m)	(g)									
CPT	1	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	2	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	3	15	-1,00	0,221	3,02	moderato	/	/	0	0	240	0	240
CPT	4	15	-1,00	0,221	8,18	alto	/	/	0	200	380	0	580
CPT	5	15	-1,00	0,221	3,00	moderato	/	/	0	0	240	0	240
CPT	6	15	-1,00	0,221	2,34	moderato	/	/	40	0	180	0	220
CPT	7	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	8	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	9	15	-1,00	0,221	0,22	basso	/	/	0	0	40	0	40
CPT	10	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	11	15	-1,00	0,221	2,81	moderato	/	/	0	0	240	0	240
CPT	12	15	-1,00	0,221	3,06	moderato	/	/	0	0	240	0	240
CPT	13	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,57	basso	0	0	0	260	260
CPT	14	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	15	15	-1,00	0,221	6,28	alto	/	/	0	0	420	0	420
CPT	16	15	-1,00	0,221	3,47	moderato	/	/	0	0	280	0	280
CPT	17	15	-1,00	0,221	0,98	basso	/	/	0	0	100	0	100
CPT	18	15	-1,00	0,221	8,94	alto	/	/	0	160	400	0	560
CPT	19	20	-1,00	0,221	0	nullo	0	nullo	20	0	0	0	20
CPT	20	15	-1,00	0,221	9,99	alto	/	/	0	160	460	0	620
CPT	21	15	-1,00	0,221	3,8	moderato	/	/	0	0	320	0	320
CPT	22	15	-1,00	0,221	1,84	basso	/	/	0	60	40	0	100
CPT	23	15	-1,00	0,221	11,79	alto	/	/	0	240	440	0	680
CPT	24	15	-1,00	0,221	9,23	alto	/	/	0	100	500	0	600
CPT	25	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,04	basso	0	0	0	20	20
CPT	26	15	-1,00	0,221	7,46	alto	/	/	20	200	200	0	420
CPT	27	20	-1,00	0,221	13,82	alto	14,66	alto	0	260	500	200	960
CPT	28	15	-1,00	0,221	1,23	basso	/	/	0	0	120	0	120
CPT	29	15	-1,00	0,221	9,88	alto	/	/	20	200	380	0	600
CPT	30	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	31	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	32	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	33	20	-1,00	0,221	7,51	alto	7,51	alto	0	260	120	0	380
CPT	34	15	-1,00	0,221	7,16	alto	/	/	0	60	420	0	480
CPT	35	20	-1,00	0,221	1,06	basso	2,60	moderato	0	0	100	320	420
CPT	36	15	-1,00	0,221	0,95	basso	/	/	0	0	100	0	100
CPT	37	15	-1,00	0,221	0,73	basso	/	/	0	0	80	0	80
CPT	38	15	-1,00	0,221	7,03	alto	/	/	0	60	400	0	460
CPT	39	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	40	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	41	20	-1,00	0,221	4,88	moderato	4,88	moderato	0	20	280	20	320
CPT	42	15	-1,00	0,221	8,43	alto	/	/	0	100	400	0	500
CPT	43	20	-1,00	0,221	0,16	basso	0,50	basso	0	0	20	140	160
CPT	44	15	-1,00	0,221	0,98	basso	/	/	0	0	100	0	100
CPT	45	15	-1,00	0,221	5,04	alto	/	/	0	120	160	0	280
CPT	46	15	-1,00	0,221	7,68	alto	/	/	0	240	120	0	360
CPT	47	15	-1,00	0,221	6,2	alto	/	/	0	40	440	0	480
CPT	48	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	49	20	-1,00	0,221	0,56	basso	0,56	basso	0	0	40	0	40
CPT	50	15	-1,00	0,221	3,79	moderato	/	/	0	0	300	0	300
CPT	51	20	-1,00	0,221	3,26	moderato	3,56	moderato	0	0	280	60	340
CPT	52	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	53	15	-1,00	0,221	1,2	basso	/	/	0	0	120	0	120
CPT	54	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	55	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0
CPT	56	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0
CPT	57	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0
CPT	58	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0

Parametri di input					I&B, 2014 - Correzione Johann Facciorusso, Claudia Madaï, Giovanni Vannucchi, 2016				Spessore livelli liquefacibili (cm)				
Prova	n°	Prof	Falda	Ag	IL ₁₅	rischio	IL ₂₀	rischio	0-5	5-10	10-15	15-20	Tot
Tipo		(m)	(m)	(g)									
CPT	59	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0
CPT	60	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0
CPT	61	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0
CPT	62	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	63	15	-1,00	0,221	0,12	basso	/	/	60	0	0	0	60
CPT	64	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	65	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	66	20	-1,00	0,221	0	nullo	0,00	nullo	0	0	0	0	0
CPT	67	20	-1,00	0,221	0,31	basso	0,31	basso	0	20	0	0	20
CPT	68	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	69	20	-1,00	0,221	12,06	alto	13,78	alto	0	240	460	320	1020
CPT	70	15	-1,00	0,221	0	nullo	/	/	0	0	0	0	0
CPT	71	20	-1,00	0,221	1,75	basso	1,75	basso	0	80	0	0	80
CPT	72	15	-1,00	0,221	1,19	basso	/	/	0	0	100	0	100
CPT	73	20	-1,00	0,221	3,74	moderato	5,05	alto	0	0	300	240	540
CPT	74	15	-1,00	0,221	5,51	alto	/	/	0	0	400	0	400
CPT	75	15	-1,00	0,221	9,46	alto	/	/	0	100	480	0	580

L'analisi di tali risultati evidenzia come i terreni liquefacibili siano prevalentemente compresi tra i -5 e -15 m di profondità, e per una maggiore comprensione è stata redatta una cartografia della variabilità dell'indice di potenziale liquefazione IL suddiviso in classi riportata nella figura seguente.

Figura 66: MAPPA INDICE DI POTENZIALE LIQUEFAZIONE IL



12 ANALISI DEI CEDIMENTI ATTESI INDOTTI DA EVENTO SISMICO (III LIVELLO)

L'analisi è stata completata con la verifica dei cedimenti post-sismici sulla base dei risultati delle prove penetrometriche.

Per i terreni granulari saturi la stima dei cedimenti sismici è stata effettuata attraverso la metodologia di Zhang et All (2002), in accordo a Robertson (2009) (Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, 2010), con il cedimento (s) ottenuto mediante la valutazione della deformazione volumetrica post-sismica indotta (ε_v), con la seguente espressione:

Per i terreni granulari saturi

$$S = \varepsilon_v \cdot \Delta H$$

Dove ε_v viene calcolato in funzione della resistenza penetrometrica normalizzata $(q_{c1N})_{cs}$ e del fattore di sicurezza a liquefazione (figura a lato) attraverso le seguenti equazioni.

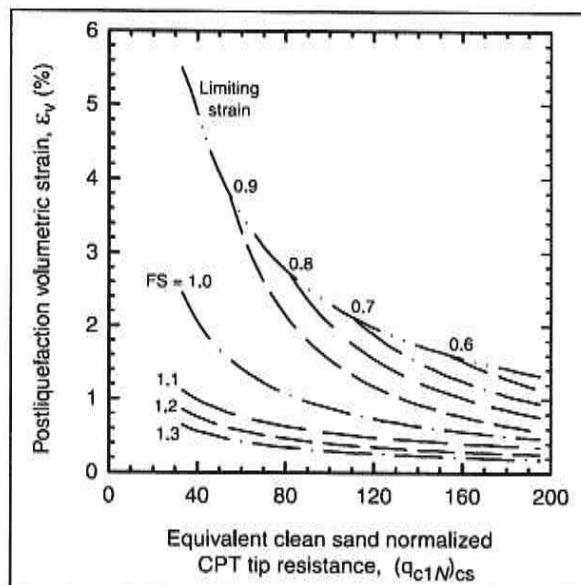


Figura 67: CALCOLO CEDIMENTI IN TERRENI SATURI (ZHANG ET ALL, 2002)

if $FS \leq 0.5$,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 0.6$,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 147$
if $FS = 0.6$,	$\varepsilon_v = 2411(q_{c1N})_{cs}^{-1.45}$	for $147 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 0.7$,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 110$
if $FS = 0.7$,	$\varepsilon_v = 1701(q_{c1N})_{cs}^{-1.42}$	for $110 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 0.8$,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 80$
if $FS = 0.8$,	$\varepsilon_v = 1690(q_{c1N})_{cs}^{-1.46}$	for $80 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 0.9$,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 60$
if $FS = 0.9$,	$\varepsilon_v = 1430(q_{c1N})_{cs}^{-1.48}$	for $60 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 1.0$,	$\varepsilon_v = 64(q_{c1N})_{cs}^{-0.93}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 1.1$,	$\varepsilon_v = 11(q_{c1N})_{cs}^{-0.65}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 1.2$,	$\varepsilon_v = 9.7(q_{c1N})_{cs}^{-0.69}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 1.3$,	$\varepsilon_v = 7.6(q_{c1N})_{cs}^{-0.71}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if $FS = 2.0$,	$\varepsilon_v = 0.0$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 20$

Per i terreni fini il cedimento post-sismico, dovuto sia a fenomeni di riconsolidazione che a deformazioni di taglio indotte dalle sollecitazioni sismiche, è stato stimato sulla base del metodo proposto da Robertson (2009), che si basa sulla valutazione del fattore di sicurezza alla deformazione post-sismica, considerando il rapporto di resistenza ciclica del terreno ($CRR_{\gamma=3\%M=7.5}$) corrispondente al raggiungimento di una deformazione di taglio pari al 3% per un terremoto di riferimento di magnitudo pari a 7.5.

Il rapporto di resistenza ciclica $CRR_{\gamma=3\%M=7.5}$ viene valutato sulla base della seguente espressione:

$$CRR_{\gamma=3\%, M=7.5} = 0.053 Q_m K_\alpha$$

Dove:

Q_m = resistenza alla punta penetrometrica normalizzata in base alla procedura di Robertson (2009)

K_α = fattore che considera l'inclinazione del piano di campagna (pari a 1 per piano di campagna orizzontale)

Il fattore di sicurezza nei confronti della deformazione post-sismica dei terreni fini viene così calcolata

$$F_{s,\gamma=3\%} = \frac{CRR_{\gamma=3\%, M=7.5}}{CSR} MSF$$

dove

MSF determinato con la relazione di Idriss & Boulanger, 2004

$$MSF = 1.12 \exp\left(\frac{-M_w}{4}\right) + 0.828$$

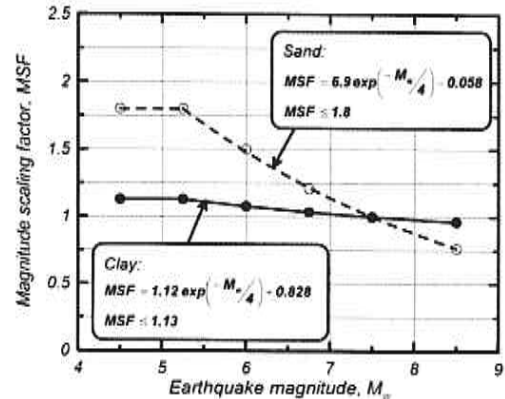
La deformazione ε_v viene quindi valutata con le seguenti espressioni (Robertson, 2009):

$$\varepsilon_{vol} = \frac{[0.8 \cdot 2.66 \log(FS_{\gamma=3\%})]}{[0.33 \cdot (10 - 9 \log(0.33 \cdot Q_m) \cdot (Q_m)^2)]}$$

se $FS_{\gamma=3\%} M=7.5 > 0.84$

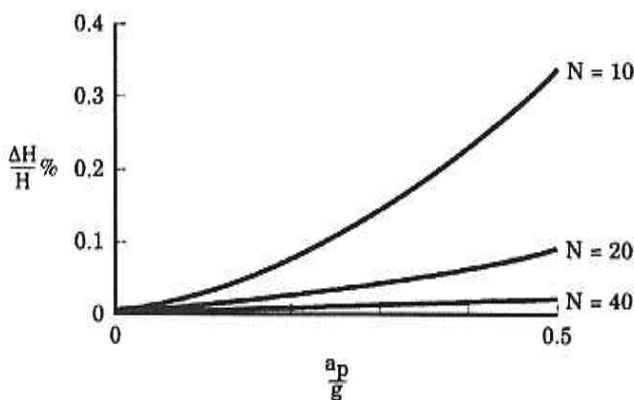
$$\varepsilon_{vol} = \frac{1}{Q_m^2} \leq 1\%$$

se $FS_{\gamma=3\%} M=7.5 \leq 0.84$



Per i terreni granulari non saturi la deformazione volumetrica di taglio dovuta alla compattazione è stata determinata attraverso il metodo di Krinitzsky et al. 1993, che per calcolare il cedimento ΔH in un generico strato di altezza H (rapporto di compressione volumetrica $\varepsilon_v = \Delta H/H$, espresso in percentuale) utilizza il valore del numero di colpi corretto dello Standard Penetration Test ($(N_1)_{60}$) e il picco di accelerazione a_{max} secondo il grafico riportato di seguito e la relativa tabella.

Figura 68: CALCOLO CEDIMENTI IN TERRENI GRANULARI NON SATURI (KRINITZSKY ET ALL, 1993)



$a_{max} [g]$	ε_v $(N_1)_{60}=10$	ε_v $(N_1)_{60}=20$	ε_v $(N_1)_{60}=40$
0.05	0.02	0.01	-
0.10	0.03	0.015	-
0.15	0.05	0.02	-
0.20	0.07	0.03	0.005
0.25	0.12	0.04	0.007
0.30	0.15	0.05	0.010
0.35	0.18	0.06	0.015
0.40	0.23	0.075	0.02

Il valore di $(N_1)_{60}$ viene calcolato sulla base della seguente espressione desunta da Idriss & Boulanger (2004):

$$q_{c1N} / (N_1)_{60} = (2.092 D_R + 1.224)^{3.788} / 46 (D_R)^2$$

con il seguente valore di D_R utilizzato da Fred (Feng) Yi (Case Study of CPT Application to Evaluate Seismic Settlement in Dry Sand, 2010).

$$D_R = 77.29 \log(q_{c1N}) - 94.36 \text{ (}\%), (q_{c1N} \leq 250)$$

Nella tabella seguente sono riassunti i dati ottenuti e in ELABORATO 2 viene riportata l'elaborazione integrale effettuata.

Prova Tipo	n°	Prof (m)	Ag (g)	Cedimenti cm			
				Terreni sabbiosi		Terreni coesivi	Tot
				saturi	insaturi		
CPT	1	15	0.221	0.00	0.00	0.66	0.66
CPT	2	15	0.221	0.00	0.00	0.35	0.35
CPT	3	15	0.221	6.37	0.00	0.02	6.39
CPT	4	15	0.221	13.32	0.00	0.41	13.73
CPT	5	15	0.221	6.37	0.00	0.14	6.51
CPT	6	15	0.221	5.34	0.00	1.08	6.42
CPT	7	15	0.221	0.00	0.00	0.19	0.19
CPT	8	15	0.221	0.00	0.00	0.84	0.84
CPT	9	15	0.221	0.63	0.00	0.29	0.92
CPT	10	15	0.221	0.00	0.00	1.45	1.45
CPT	11	15	0.221	6.41	0.00	0.20	6.61
CPT	12	15	0.221	6.47	0.00	0.97	7.44
CPT	13	20	0.221	6.23	0.00	0.47	6.70
CPT	14	15	0.221	0.00	0.00	1.50	1.50
CPT	15	15	0.221	11.20	0.00	0.07	11.27
CPT	16	15	0.221	7.38	0.00	0.07	7.45
CPT	17	15	0.221	2.43	0.00	0.26	2.69
CPT	18	15	0.221	14.04	0.00	0.64	14.68
CPT	19	20	0.221	0.00	0.00	1.14	1.14
CPT	20	15	0.221	15.94	0.00	0.03	15.97
CPT	21	15	0.221	8.13	0.00	0.06	8.19
CPT	22	15	0.221	2.52	0.00	0.47	2.99
CPT	23	15	0.221	17.45	0.00	0.04	17.49
CPT	24	15	0.221	15.57	0.00	0.06	15.63
CPT	25	20	0.221	0.55	0.00	1.10	1.65
CPT	26	15	0.221	10.05	0.00	0.54	10.59
CPT	27	20	0.221	24.71	0.00	0.37	25.08
CPT	28	15	0.221	3.10	0.00	0.89	3.99
CPT	29	15	0.221	14.94	0.00	0.00	14.94
CPT	30	15	0.221	0.00	0.00	0.84	0.84
CPT	31	15	0.221	0.00	0.00	0.48	0.48
CPT	32	15	0.221	0.00	0.00	0.79	0.79
CPT	33	20	0.221	9.55	0.00	3.58	13.13
CPT	34	15	0.221	12.69	0.00	0.04	12.73
CPT	35	20	0.221	11.05	0.00	0.53	11.58
CPT	36	15	0.221	2.50	0.00	0.84	3.34
CPT	37	15	0.221	1.80	0.00	1.00	2.80
CPT	38	15	0.221	12.01	0.00	0.00	12.01
CPT	39	15	0.221	0.00	0.00	0.66	0.66
CPT	40	15	0.221	0.00	0.00	0.94	0.94
CPT	41	20	0.221	8.63	0.00	0.35	8.98
CPT	42	15	0.221	13.42	0.00	0.04	13.46
CPT	43	20	0.221	4.12	0.00	0.36	4.48
CPT	44	15	0.221	2.43	0.00	0.11	2.54
CPT	45	15	0.221	7.01	0.00	0.60	7.61
CPT	46	15	0.221	9.32	0.00	1.11	10.43
CPT	47	15	0.221	12.10	0.00	0.21	12.31
CPT	48	15	0.221	0.00	0.00	1.29	1.29
CPT	49	20	0.221	0.92	0.00	0.98	1.90
CPT	50	15	0.221	7.91	0.00	0.03	7.94
CPT	51	20	0.221	8.43	0.00	0.09	8.52
CPT	52	15	0.221	0.00	0.00	0.08	0.08
CPT	53	15	0.221	3.04	0.00	0.91	3.95
CPT	54	15	0.221	0.00	0.00	1.14	1.14
CPT	55	20	0.221	0.00	0.00	0.98	0.98
CPT	56	20	0.221	0.00	0.00	0.56	0.56
CPT	57	20	0.221	0.00	0.00	0.65	0.65
CPT	58	20	0.221	0.00	0.00	0.21	0.21
CPT	59	20	0.221	0.00	0.00	0.48	0.48

Prova Tipo	n°	Prof (m)	Aq (g)	Cedimenti cm			
				Terreni sabbiosi		Terreni coesivi	Tot
				saturi	insaturi		
CPT	60	20	0.221	0.00	0.00	0.37	0.37
CPT	61	20	0.221	0.00	0.00	0.32	0.32
CPT	62	15	0.221	0.06	0.00	1.03	1.09
CPT	63	15	0.221	0.53	0.00	0.17	0.70
CPT	64	15	0.221	0.00	0.00	0.30	0.30
CPT	65	15	0.221	0.00	0.00	0.10	0.10
CPT	66	20	0.221	0.00	0.00	2.33	2.33
CPT	67	20	0.221	0.37	0.00	0.74	1.11
CPT	68	15	0.221	0.00	0.00	0.26	0.26
CPT	69	20	0.221	27.30	0.00	0.01	27.31
CPT	70	15	0.221	0.00	0.00	1.40	1.40
CPT	71	20	0.221	1.90	0.00	0.18	2.08
CPT	72	15	0.221	2.69	0.00	0.53	3.22
CPT	73	20	0.221	14.54	0.00	0.60	15.14
CPT	74	15	0.221	10.49	0.00	0.06	10.55
CPT	75	15	0.221	15.51	0.00	0.02	15.53

I risultati ottenuti hanno permesso la costruzione di una mappa dei cedimenti sismici attesi per i terreni granulari saturi e i terreni coesivi.

Figura 69: MAPPA CEDIMENTI SISMICI SABBIE SATURE

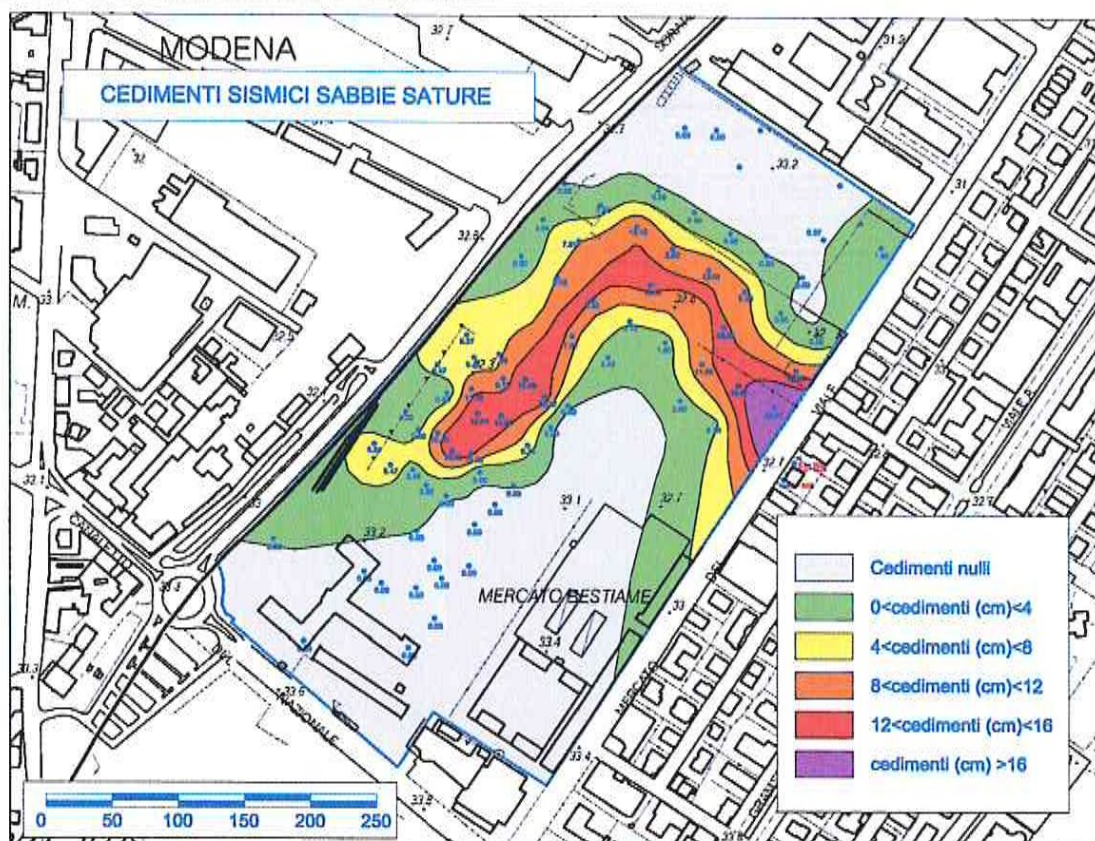
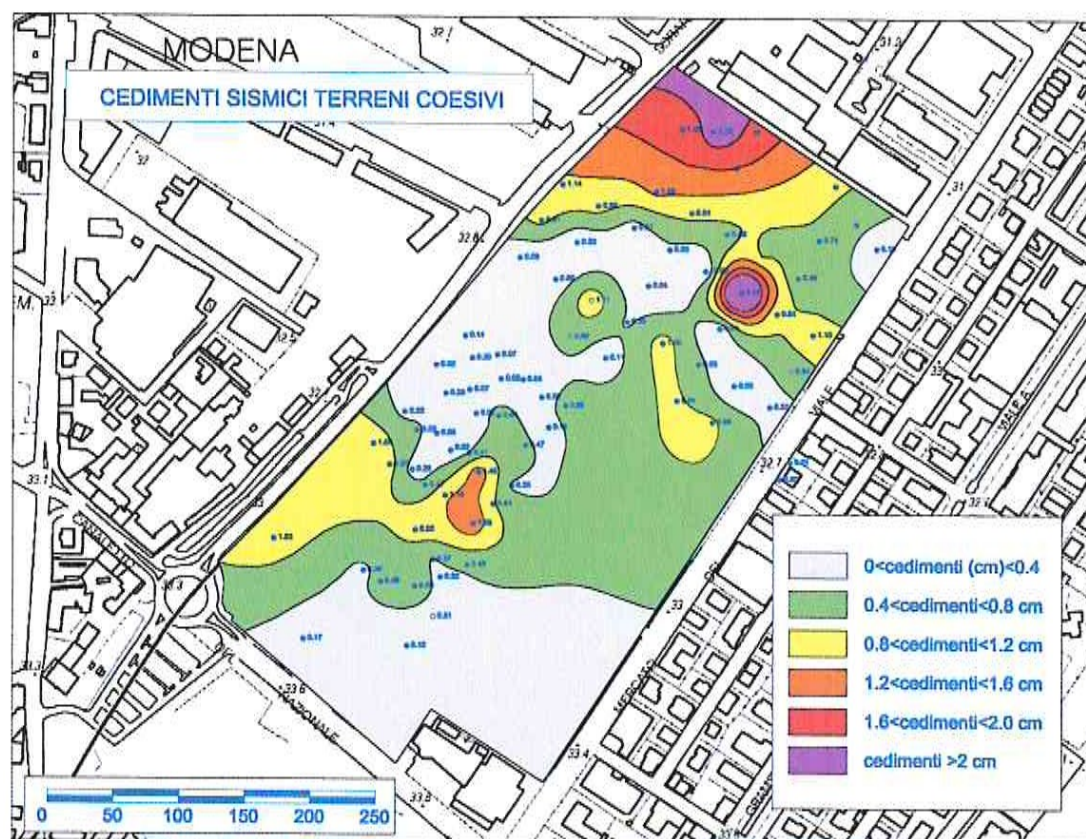


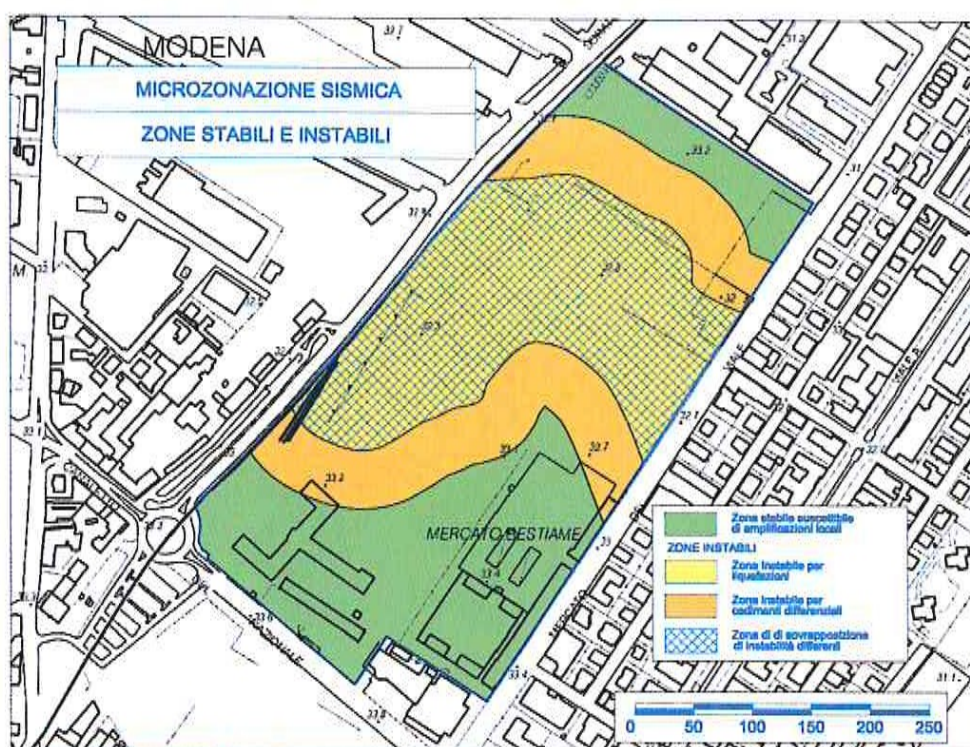
Figura 70: MAPPA CEDIMENTI SISMICI TERRENI COESIVI



13 PROPOSTE DI GESTIONE DEL RISCHIO SISMICO DEL COMPARTO

Le analisi effettuate hanno consentito nel comparto oggetto di studio una migliore caratterizzazione e determinazione delle aree stabili e instabili in prospettiva sismica come riportato nella Figura 71.

Figura 71: MAPPA ZONE STABILI E INSTABILI IN PROSPETTIVA SISMICA



In particolare, sono state individuate con maggiore dettaglio:

- zone instabili per liquefazione
- zone instabili per cedimenti differenziali
- zone instabile per sovrapposizione di instabilità differenti (liquefazioni e cedimenti differenziali)
- zone stabili e suscettibili di amplificazioni locali.

Per quanto riguarda le zone instabili per cedimenti differenziali è stata definita una fascia di 50 metri dal perimetro delle zone soggette a rischio di liquefazione, che costituisce di fatto una zona di attenzione all'interno delle quali non possono escludersi il verificarsi di cedimenti sismici differenziali.

Per la riduzione del rischio sismico si propongono le seguenti disposizioni:

1. Nelle zone instabili, il calcolo dell'azione sismica ai fini della progettazione dovrà essere eseguito mediante specifici studi di risposta sismica locale con conseguente valutazione del rischio di liquefazione e dei cedimenti sismici. Per interventi di particolare interesse pubblico o strategico (classi d'uso 3 e 4) con valori dell'indice di liquefazione IL superiori a 2, si raccomandano interventi di mitigazione del rischio di liquefazione;
2. Nelle aree stabili può essere utilizzato per il calcolo dell'azione sismica l'approccio semplificato previsto dalle NTC 2018 quando non si manifesta almeno una delle seguenti circostanze:
 - Presenza nei primi 30 metri di profondità a partire dal piano di posa delle opere di fondazione significativi di contrasti di impedenza sismica che possono determinare amplificazioni non trascurabili del moto sismico
 - presenza di inversioni nel profilo delle velocità delle onde di taglio (VS) che determina una condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie previste nella Tab. 3.2.11 allegata alle NTC 2018.
 - Presenza di valori dell'indice di potenziale liquefazione IL pari o superiore a 2;

14 CONCLUSIONI

La presente relazione ed elaborati allegati sono parte integrante dello studio di microzonazione sismica di III° livello relativo all'area oggetto di VARIANTE AL PIANO PARTICOLAREGGIATO "EX MERCATO BESTIAME" COMUNE DI MODENA.

A Vs. disposizione per ogni chiarimento e/o informazione si porgono distinti saluti.

Vignola, 28/12/2018

LA DITTA INCARICATA DALL'AMMINISTRAZIONE COMUNALE

GEO-XPert ITALIA SRL

Via di Mezzo, 90-41058 VIGNOLA (MO)-ITALY

P.IVA E C.F. 02740680364-C.G.I.A.A. MO-326926



COLLABORATORI

IL TECNICO RESPONSABILE

