C-002-2006_B

COMUNE DI PADERNO D'ADDA

Provincia di Lecco

Scuola Materna "Arcobaleno"

Aggiornamento della componente Geologica, Idrogeologica e Sismica del Piano di Governo del Territorio

Caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione sismica locale

Approfondimento di secondo livello

20 agosto 2009

CASTALIA *Studio Associato di Geologia dei dottori Incerti Davide e Mazzoleni Giulio*
Via San Giorgio, 4 - 24058 ROMANO DI LOMBARDIA (BG)
Tel/Fax: 0363/903672 - P. IVA e C.F.: 03362470167
www.studiocastalia.com

INDICE

1. PREMESSA E QUADRO DI RIFERIMENTO NORMATIVO3

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO 4

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO 5

4. APPROFONDIMENTO SISMICO 9

4.1 Normative Sismiche – Valori di a_g 9

4.2 Analisi del Rischio Sismico – Pericolosità Sismica Locale 14

4.2.1 Analisi di 1° livello 14

4.2.2 Analisi di 2° livello 16

4.3 *Stima degli effetti litologici e del Fattore di Amplificazione (Fa)*.....26

ALLEGATI

1. Inquadramento Geografico (Base CTR, scala 1 :10.000)

2. Inquadramento Geologico (Stralcio della Carta Geologica d'Italia, scala 1 :100.000 ed estratto della Carta Geologica allegata allo Studio Geologico comunale)

1. PREMESSA E QUADRO DI RIFERIMENTO NORMATIVO

Con D.R. n. 193 del 21/06/2006 l'Amministrazione Comunale di Paderno d'Adda ha provveduto ad affidare agli scriventi l'incarico relativo all'adeguamento dello Studio Geologico del territorio comunale, ai sensi della Legge Regionale 12/2005, art. 57 e DGR 1566/2005 e s.m.i.

Più nello specifico, l'incarico si riferiva alla stesura della Carta della Pericolosità Sismica Locale (PSL), e alla compilazione delle nuove carte di Sintesi, Vincoli e Fattibilità Geologica, redatte secondo le direttive dettate dalle normative citate. I contenuti di tale studio sono stati riassunti in una Relazione Illustrativa. Completava lo Studio la predisposizione del documento "*Norme Geologiche di Piano*" che dovrà essere recepito dal Piano delle Regole del Piano di Governo del Territorio, nel quale sono riportate tutte le norme cui sono assoggettate le aree, così come perimetrate nella Carta dei Vincoli e in quella di Fattibilità Geologica.

L'incarico è stato svolto sulla base di un disciplinare approvato che, all'art. 6, recitava:

"***Art. 6 – Eventuali approfondimenti conseguenti all'analisi del rischio sismico***

Qualora nella redazione della Carta della Pericolosità Sismica Locale si riscontrasse la presenza di ambiti classificati Z3 o Z4 in presenza di edifici strategici e rilevanti (elenco tipologico di cui al d.d.u.o. n. 19904/03) non prevedibili in fase di predisposizione del presente disciplinare, occorrerà procedere a studi integrativi che andranno computati a parte e saranno oggetto di specifico affidamento d'incarico".

La redazione della Carta della Pericolosità Sismica Locale ha in effetti evidenziato come un'estesa porzione del territorio comunale sia inserita in un ambito passibile di amplificazione sismica per effetti litologici (Classe Z4a – Z5). Sul territorio comunale sono stati riscontrati inoltre ulteriori possibili scenari di pericolosità sismica locale individuati dalle sigle Z3a e Z1c.

Il recente incontro avvenuto presso gli Uffici comunali di Paderno d'Adda ha messo in evidenza come l'Amministrazione intenda procedere all'ampliamento della Scuola Materna Arcobaleno, posta lungo via Roma. L'area su cui è previsto detto ampliamento appartiene ad un ambito a pericolosità sismica locale Z4a – Z5.

Il d.d.u.o. 21 novembre 2003 n. 19904 della Direzione Generale Sicurezza, Polizia Locale e Protezione Civile, al punto 2 lettera a, individua quali edifici che

possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso gli "*asili nido e scuole, dalle materne alle superiori*".

L'OPCM 3274/2003, all'allegato 1, classifica il territorio comunale di Paderno d'Adda in zona sismica 4.

La DGR 1566/05 "*Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell'art. 57 della L.R. 11 marzo 2005, n. 12*" e s.m.i. prevedono che per i Comuni ricadenti in zona sismica 4, venga applicato un approfondimento sismico di secondo livello in caso di costruzioni strategiche e rilevanti di previsione inserite in ambiti classificati Z3 o Z4 nella Carta della Pericolosità Sismica Locale.

Sulla base di quanto detto risulta evidente come per l'ampliamento della Scuola Materna "Arcobaleno" si verifichino tutte le condizioni perché debba essere eseguito un approfondimento sismico di secondo livello.

Questo consiste nella caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi nelle aree perimetrate nella carta di Pericolosità Sismica Locale, che fornisce la stima della risposta sismica dei terreni in termini di Fattore di Amplificazione (Fa). L'applicazione del secondo livello consente quindi l'individuazione delle aree in cui la normativa nazionale risulta insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione sismica locale (Fa calcolato superiore a Fa di soglia comunali forniti dal Politecnico di Milano). Nel caso, per queste aree, si dovrà procedere alle indagini e agli approfondimenti di terzo livello o, in alternativa, utilizzare i parametri di progetto previsti dalla normativa nazionale per la zona sismica superiore (nel caso di Paderno d'Adda, si dovrebbero utilizzare i valori previsti per la zona sismica 3).

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area su cui si sviluppa l'intervento di ampliamento della Scuola Materna "Arcobaleno" si colloca nella porzione centroccidentale del centro abitato di Paderno d'Adda, ed è inquadrata nel foglio B5e3 della Carta Tecnica (scala 1:10.000) della Regione Lombardia (allegato 1).

In particolare l'area occupa un ambito debolmente digradante verso W, posto a quote comprese fra 258 e 260 m s.l.m.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

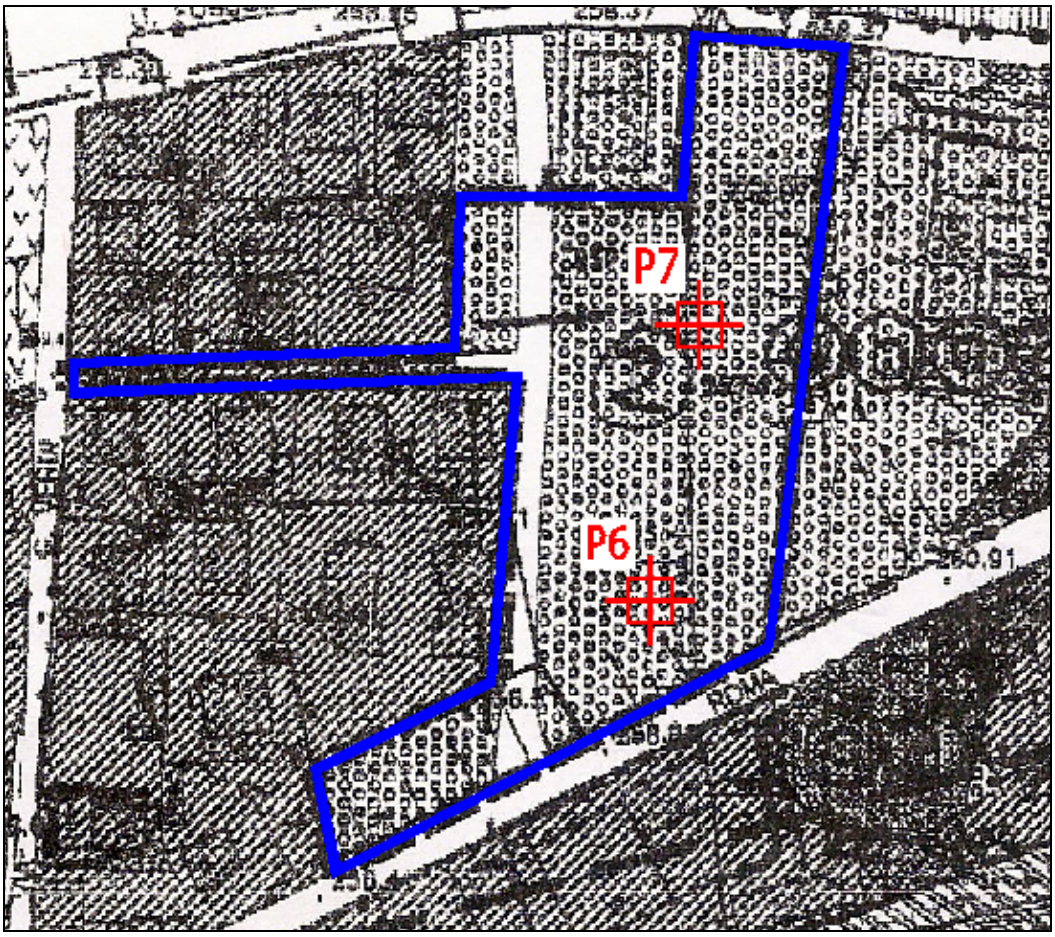
Dal punto di vista geologico l'area si inserisce all'interno di un panorama caratterizzato dalla presenza di depositi di origine fluvioglaciale, legati all'attività glaciale del bacino dell'Adda, con diverso grado di alterazione a seconda dell'evento a cui si riferiscono (allegato 2). In particolare la carta geologica di supporto al PRG comunale ascrive i terreni analizzati ai depositi morenici del Riss, di seguito descritti:

Morenico Riss: litologicamente questo deposito è costituito da ghiaie e sabbie con grossi blocchi immersi in un'abbondante matrice limosa-argillosa, a supporto sia clastico che di matrice. L'alterazione è spinta, oltre i 2 m, i ciottoli sono friabili e completamente argillificati, tuttavia sono ancora visibili dei blocchi di grosse dimensioni.

Tale assetto geologico è stato confermato anche dall'esecuzione di due prove penetrometriche dinamiche, realizzate dagli scriventi in occasione della redazione di una indagine geologica condotta durante l'ottobre del 2008, a supporto della richiesta di approvazione del P.I.I. n. 1 in variante al PRG, con riferimento al comparto di via Roma, via Festini e via Cascina Sant'Antonio.

Le prove sono state eseguite lungo verticali ubicate nella planimetria che segue, e sono state realizzate con un penetrometro dinamico superpesante "Pagani" con maglio da 73 kg, seguendo la metodologia AGI (Associazione Geotecnica Italiana) con rilevazione del numero di colpi per avanzamenti unitari delle aste di 30 cm.

Questo tipo di indagine consente di rilevare la resistenza alla penetrazione nel terreno di una punta metallica, di dimensioni e peso standardizzate, energizzata dalla caduta di una massa; la strumentazione e le modalità operative rispettano standard definiti. In tale modo è possibile costruire un diagramma nel quale sono correlati il numero di colpi rilevati per avanzamenti unitari con la profondità d'indagine, che costituisce l'elaborato base da cui estrapolare le proprietà fisiche del terreno attraversato e interpretarne, in maniera indiretta, la composizione granulometrica.



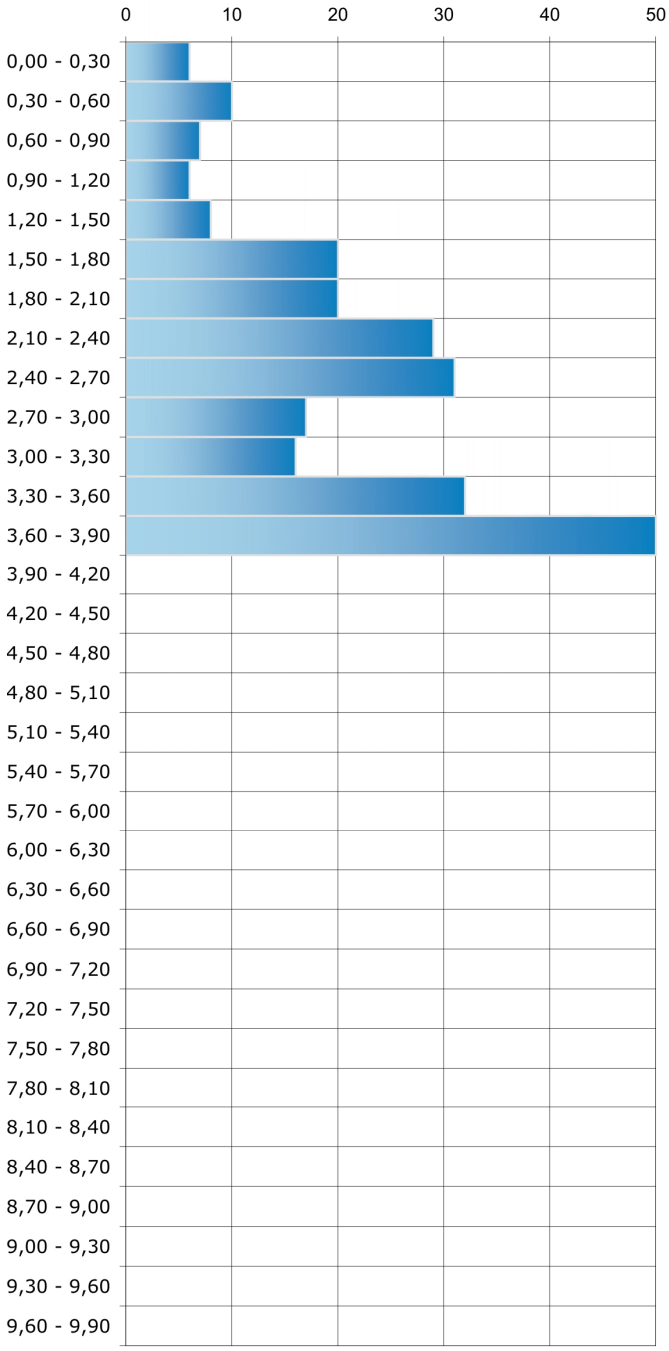
I

Ciascuna prova è stata condotta spingendo la profondità di investigazione sino a rifiuto strumentale, ottenuto alle quote di 3.90 e 6.30 m da p.c., presumibilmente per l'intercettazione di ciottoli poco alterati immersi nella matrice sabbiosa e limosa, di dimensioni tali da impedire la prosecuzione delle prove.

In linea generale, il risultato delle prove condotte risulta compatibile con l'assetto geologico dedotto dall'indagine bibliografica preliminare, e caratterizzato dalla presenza di terreni costituiti da ghiaie e sabbie con grossi blocchi immersi in un'abbondante matrice limosa-argillosa, a supporto sia clastico che di matrice.

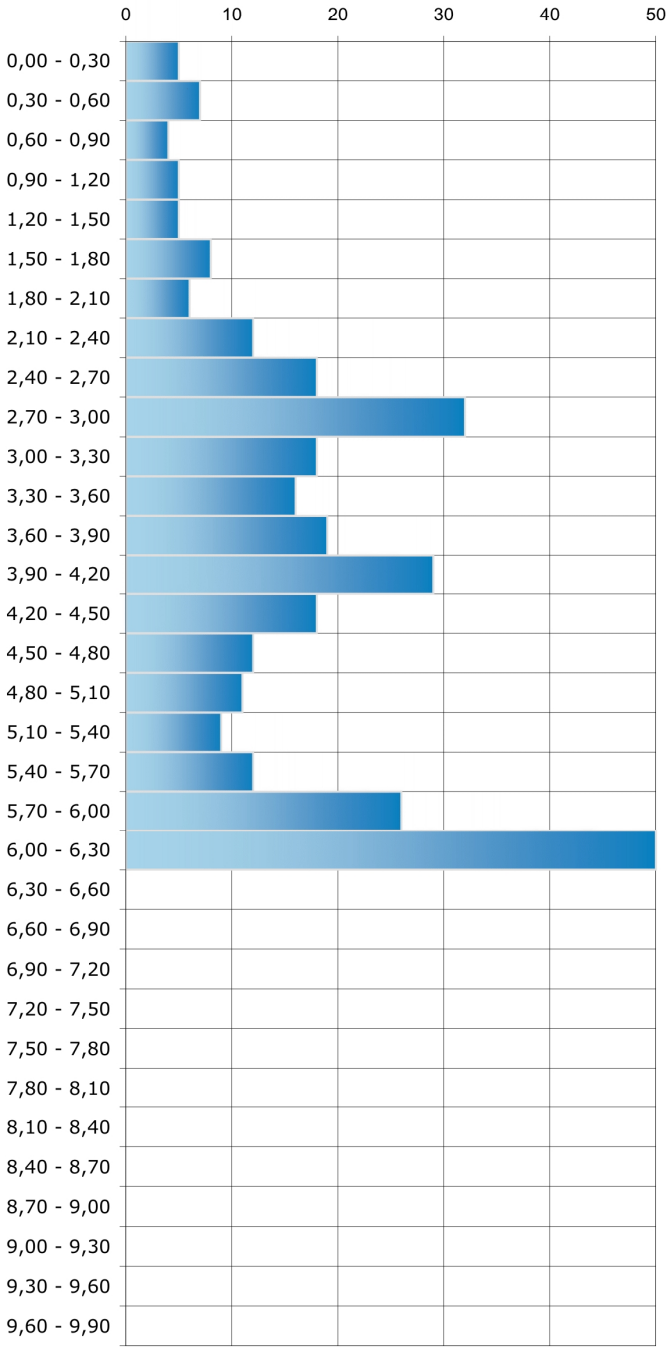
Data: 21 ottobre 2008	
Località: Paderno d'Adda (LC)	
Cantiere: via Roma	
Prova penetrometrica n.: 6	
Operatore: Dott. Toffalorio - Dott. Mazzoleni	

Profondità (m)	n° colpi
0,00 - 0,30	6
0,30 - 0,60	10
0,60 - 0,90	7
0,90 - 1,20	6
1,20 - 1,50	8
1,50 - 1,80	20
1,80 - 2,10	20
2,10 - 2,40	29
2,40 - 2,70	31
2,70 - 3,00	17
3,00 - 3,30	16
3,30 - 3,60	32
3,60 - 3,90	50
3,90 - 4,20	
4,20 - 4,50	
4,50 - 4,80	
4,80 - 5,10	
5,10 - 5,40	
5,40 - 5,70	
5,70 - 6,00	
6,00 - 6,30	
6,30 - 6,60	
6,60 - 6,90	
6,90 - 7,20	
7,20 - 7,50	
7,50 - 7,80	
7,80 - 8,10	
8,10 - 8,40	
8,40 - 8,70	
8,70 - 9,00	
9,00 - 9,30	
9,30 - 9,60	
9,60 - 9,90	



Data: 21 ottobre 2008	
Località: Paderno d'Adda (LC)	
Cantiere: via Roma	
Prova penetrometrica n.: 7	
Operatore: Dott. Toffalorio - Dott. Mazzoleni	

Profondità (m)	n° colpi
0,00 - 0,30	5
0,30 - 0,60	7
0,60 - 0,90	4
0,90 - 1,20	5
1,20 - 1,50	5
1,50 - 1,80	8
1,80 - 2,10	6
2,10 - 2,40	12
2,40 - 2,70	18
2,70 - 3,00	32
3,00 - 3,30	18
3,30 - 3,60	16
3,60 - 3,90	19
3,90 - 4,20	29
4,20 - 4,50	18
4,50 - 4,80	12
4,80 - 5,10	11
5,10 - 5,40	9
5,40 - 5,70	12
5,70 - 6,00	26
6,00 - 6,30	50
6,30 - 6,60	
6,60 - 6,90	
6,90 - 7,20	
7,20 - 7,50	
7,50 - 7,80	
7,80 - 8,10	
8,10 - 8,40	
8,40 - 8,70	
8,70 - 9,00	
9,00 - 9,30	
9,30 - 9,60	
9,60 - 9,90	



Dal punto di vista geomorfologico l'area si presenta debolmente digradante verso W, su pendenze piuttosto blande che non danno luogo a evidenze di instabilità in atto o potenziali. Altro elemento morfologico di rilievo prossimo all'area considerata è costituito dall'orlo di scarpata di origine fluviale posta circa 750 m a ENE, che segna il passaggio all'attuale ambito del Fiume Adda, che scorre incassato all'interno di una incisione scavata all'interno dei conglomerati quaternari appartenenti alla formazione del "Ceppo" profonda fino a 80 m.

L'assetto idrogeologico dell'area è dominato dall'influenza esercitata dal Fiume Adda ed è caratterizzato dalla presenza di una falda freatica che si attesta su profondità di oltre 40 m da p.c., con escursioni di ordine metrico legate sia agli apporti meteorici sia al regime di deflusso delle acque del Fiume. La natura localmente limoso-argillosa dei terreni che costituiscono il primo sottosuolo dell'area non consente tuttavia di escludere il possibile sviluppo di falde sospese, anche se le prove penetrometriche di cui si è detto non hanno evidenziato la presenza di tali strutture idrogeologiche.

4. APPROFONDIMENTO SISMICO

4.1 Normative Sismiche – Valori di a_g

La normativa sismica (D.M. 16 Gennaio 1996) in Italia, anteriormente al Marzo 2003, suddivideva il territorio nazionale in tre categorie di pericolosità (elevata, media e bassa). Per ciascuna categoria sono assegnati un grado di sismicità (S) ed un coefficiente di intensità sismica (C=(S-2)/100). Lo spettro di progetto Sa(T) si ottiene moltiplicando il coefficiente C (pari a 0.10g - 0.07g - 0.04g in ordine decrescente di pericolosità sismica) per una forma spettrale R(T) indipendente dalle condizioni del sottosuolo. Queste normative sismiche non tengono conto del ruolo del terreno sulla modifica di forme ed ordinate spettrali, se non con la moltiplicazione dello spettro per il coefficiente di fondazione ε che di regola è unitario, salvo che per "terreni particolarmente compressibili" per i quali si consiglia di incrementare ε fino a 1.3.

La nuova legislazione, Ordinanza n° 3274 del 20/03/03 e Norme Tecniche allegate, che inserisce il territorio di Paderno d'Adda in zona sismica 4, fa riferimento a metodologie più recenti in cui il moto sismico è caratterizzato anche in relazione alle

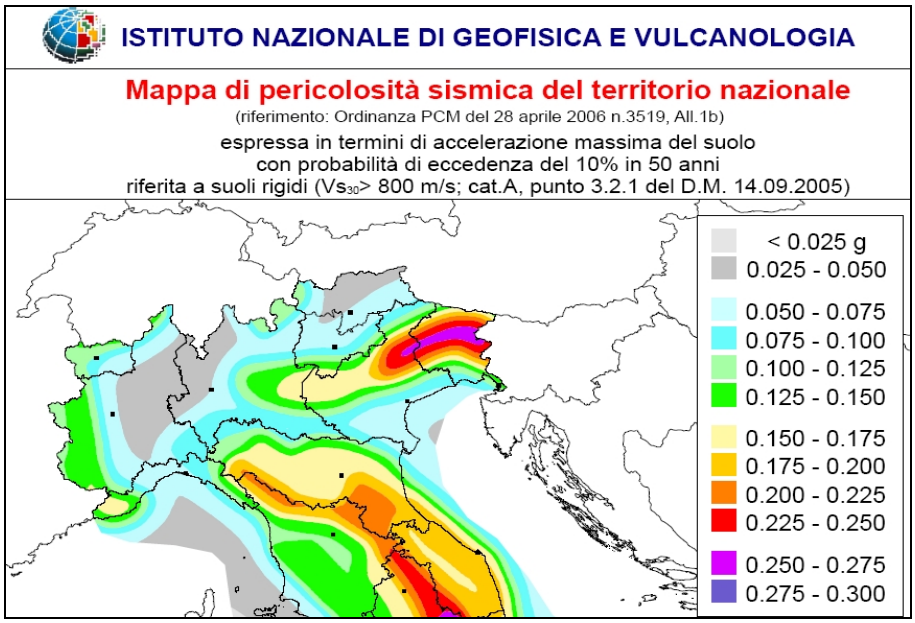
condizioni locali. In tale direzione si è già mosso l'Eurocodice 8 (EC8) che stabilisce le regole per il progetto e la costruzione di strutture in zona sismica per i paesi membri della Comunità Europea.

Secondo l'EC8, come anche secondo la nuova normativa, i territori nazionali vengono suddivisi in zone sismiche in funzione della pericolosità locale, descritta in termini di accelerazione orizzontale massima attesa alla superficie di un sito rigido di riferimento (ag). I valori di accelerazione massima fissati nella nuova ordinanza per le zone 1, 2, 3 e **4** (rispettivamente 0.35g - 0.25g - 0.15g – **0.05g**) recepiscono la proposta del G.N.D.T. (1985) e risultano maggiori di quelli della precedente normativa. La normativa richiede alle Regioni di eseguire la valutazione di ag sul proprio territorio e quindi di assegnarli ad una delle zone della nuova classificazione.

La nuova normativa sismica prescrive un valore di accelerazione sismica di base **a_g pari a 0.05 g**, come indicato per le zone 4.

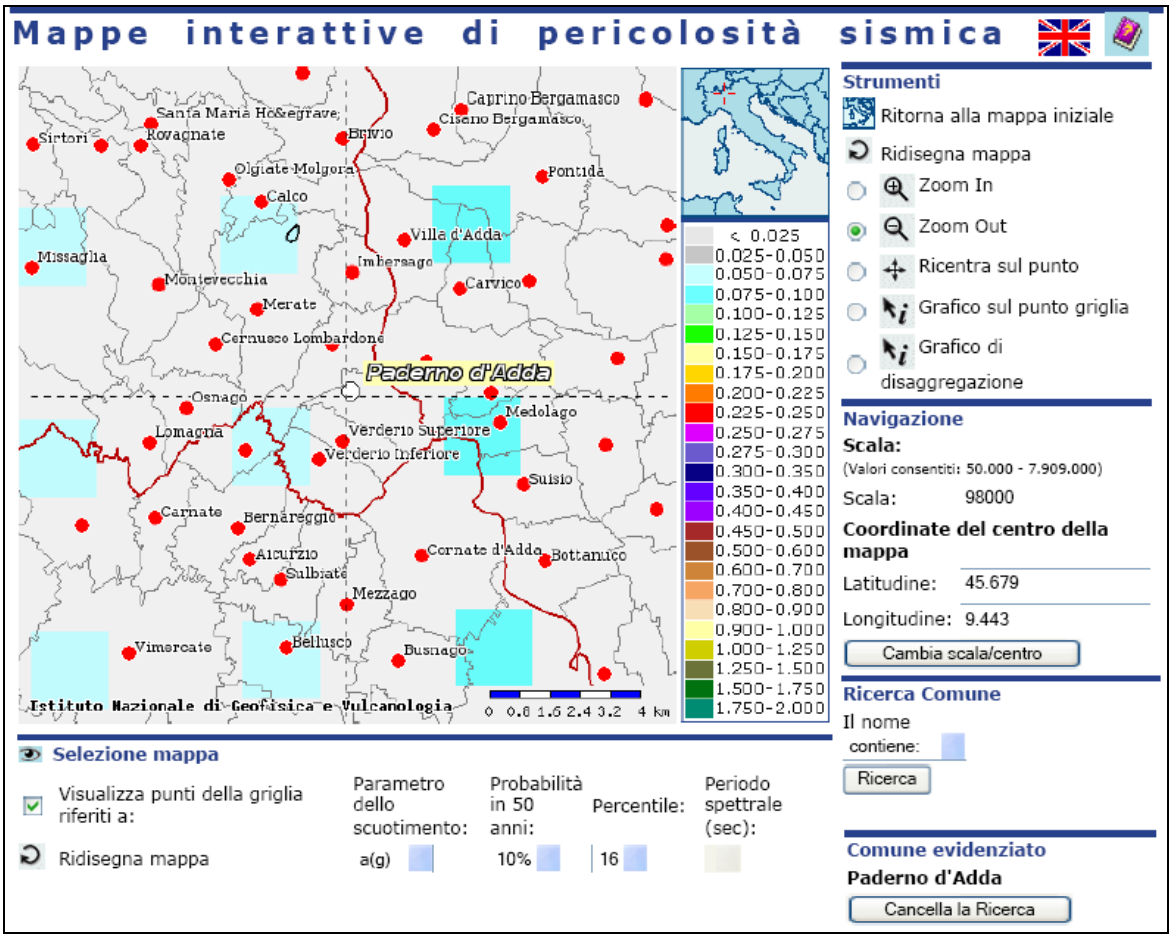
In ogni caso la normativa sismica ed i parametri relativi a ciascun territorio risultano in veloce e continua revisione, soprattutto nell'ambito della convenzione tra INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) e DPC (Dipartimento Protezione Civile) che prevede l'assistenza per il completamento e la gestione della "mappa di pericolosità sismica" prevista dall'OPCM 3274.

Già l'OPCM 3519 del 27/04/06 fornisce una revisione dei valori di a_g sul territorio nazionale e classifica il territorio di Paderno d'Adda in zona sismica 4, ed in particolare nella sottozona caratterizzata da valori di a_g compresi tra 0.050 e 0.075.



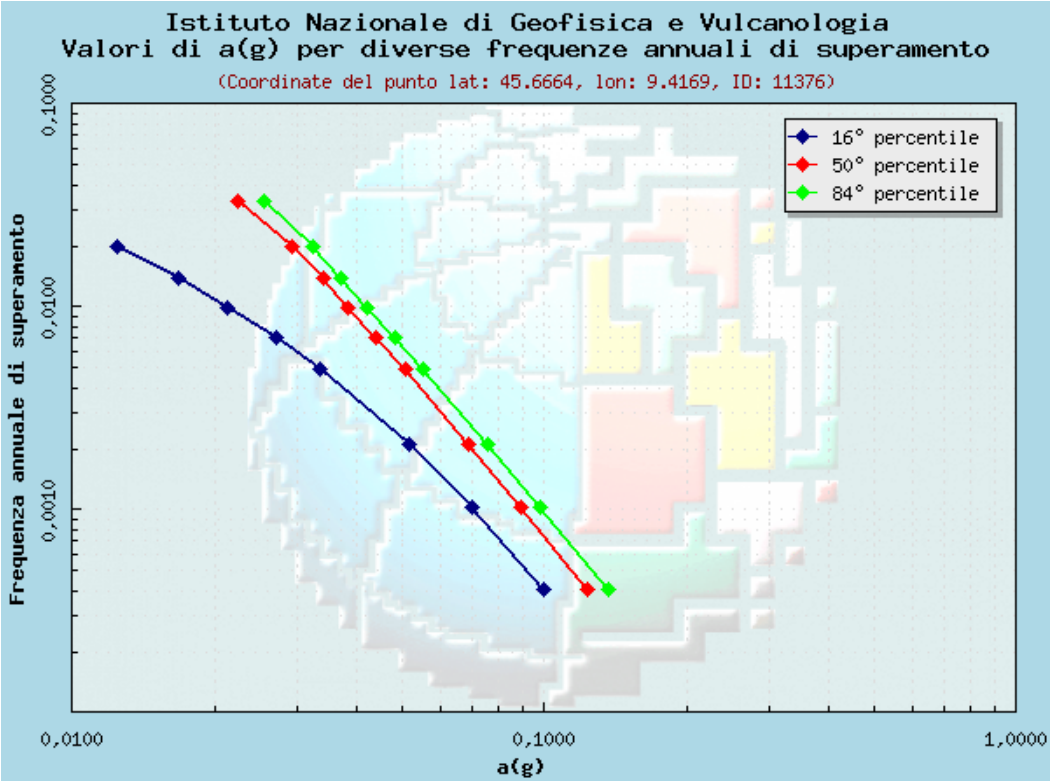
Più recentemente nell'ambito della revisione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008 – Allegato A) sono state adottate le stime di pericolosità sismica del progetto S1, concludendo il percorso iniziato nel 2003. Tali stime superano il concetto di classificazione a scala comunale e sulla base di 4 zone sismiche. Tuttavia le 4 zone sismiche mantengono una funzione prevalentemente amministrativa.

Si forniscono in proposito i dati di pericolosità sismica riportati sul link *http://*esse1.mi.ingv.it relative al sito d'interesse:



Al progettista spetta la scelta, cautelativa o meno, dei nuovi valori di a_g.

Si allega in via conoscitiva il diagramma dei valori di a(g) per diverse frequenze annuali di superamento relative al nodo più prossimo all'area d'intervento entro il territorio di Paderno d'Adda.



Frequenza annuale di superamento	a(g) (Coordinate del punto lat: 45.6664, lon: 9.4169, ID: 11376)		
	16° percentile	50° percentile	84° percentile
0.0004	0.0997	0.1233	0.1360
0.0010	0.0705	0.0891	0.0981
0.0021	0.0518	0.0692	0.0761
0.0050	0.0336	0.0508	0.0554
0.0071	0.0271	0.0439	0.0483
0.0099	0.0212	0.0384	0.0420
0.0139	0.0167	0.0339	0.0369
0.0200	0.0124	0.0291	0.0322
0.0333	0.0000	0.0223	0.0255

Per il sito di riferimento il valore di a(g) normativo relativo alla pericolosità sismica, stimato per la frequenza annuale di superamento pari a 0.0021 e relativa al 50° percentile (Tempo di ritorno pari a 475 anni) con probabilità di eccedenza in 50 anni pari al 10%, **risulta pari a 0,0692g.**

4.2 Analisi del Rischio Sismico – Pericolosità Sismica Locale

4.2.1 Analisi di 1° livello

L'analisi di primo livello è già stata condotta durante la predisposizione dell'aggiornamento dello Studio Geologico comunale, ai sensi della L.R. 12/05, art. 57 e DGR 1566/05 e DGR 7374/08. In questo paragrafo si vogliono esclusivamente riprendere i contenuti e i significati che tale approfondimento sismico contiene e poter meglio inquadrare il secondo livello di approfondimento, descritto nel paragrafo successivo.

L'approfondimento sismico di primo livello valuta l'effetto di amplificazione sismica locale secondo la metodologia e le procedure indicate nell'All. 5 della D.G.R. n° 8/7374. Le condizioni locali possono infatti influenzare, in occasione di eventi sismici, la pericolosità sismica di base producendo effetti di cui si deve tener conto nella valutazione della pericolosità sismica di un'area. Gli effetti indotti da particolari condizioni geologico-morfologiche sono infatti in grado di produrre danni diversificati su fabbricati con caratteristiche analoghe, entro zone anche ravvicinate (fino a poche decine di m). In tali situazioni si possono verificare fenomeni di focalizzazione dell'energia sismica incidente, con esaltazione delle ampiezze delle onde, fenomeni di riflessione multipla con variazione delle ampiezze delle vibrazioni e delle frequenze del moto.

La procedura prevede la valutazione di vari gruppi di effetti locali:

- Effetti di sito o di amplificazione sismica locale
- Effetti di instabilità
- Effetti di cedimenti e/o liquefazione

Per l'area d'interesse sono stati valutati gli **effetti di sito** mentre non sono state riscontrate condizioni che possano lasciar prevedere effetti di amplificazione correlati ad instabilità dei luoghi e/o ad effetti di cedimento e/o liquefazione.

<u>Effetti di sito o di amplificazione sismica locale</u>

Gli effetti di amplificazione sismica locale o di sito sono rappresentati dall'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che il terremoto di riferimento, relativo al bedrock, può subire durante l'attraversamento

degli strati di terreno sovrastanti il bedrock, a causa dell'interazione delle onde sismiche con le particolari condizioni locali.

Si distinguono quindi gli effetti di **amplificazione topografica**, quelli di **amplificazione litologica** e quelli per comportamenti differenziali.

Gli effetti di amplificazione topografica si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie superficiali articolate e da irregolarità topografiche in generale.

Gli scenari di pericolosità sismica locale cui si correlano effetti di amplificazione topografica sono riportati nella Tab. 1 dell'All.5 della D.G. 8/1566:

Sigla	SCENARIO DI PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z3a	Zona di ciglio H> 10 m (scarpata con parete subverticale, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica)	Amplificazioni topografiche
Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo	

Nessuno di questi scenari è stato riconosciuto per l'area d'interesse.

Gli effetti di amplificazione litologiche o geometriche si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie sepolte (bacini sedimentari, chiusure laterali, corpi lenticolari, eteropie ed interdigitazioni, gradini di faglia, ecc.) e da particolari profili stratigrafici costituiti da litologie con determinate proprietà meccaniche. Tali condizioni possono generare esaltazione locale delle azioni sismiche trasmesse dal terreno, fenomeni di risonanza fra onda sismica incidente e modi di vibrare del terreno e fenomeni di doppia risonanza fra periodo fondamentale del moto sismico incidente e modi di vibrare del terreno e della sovrastruttura.

Gli scenari di pericolosità sismica locale cui si correlano effetti di amplificazione litologica sono riportati nella Tab. 1 dell'All.5 della D.G.R. 8/7374:

Sigla	SCENARIO DI PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z4a	Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi	Amplificazioni litologiche e geometriche
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)	
Z4d	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	

L'area di progetto ricade in un contesto di fondovalle con presenza di depositi alluvionali granulari e/o coesivi cui si correla uno scenario di tipo Z4a.

Gli effetti di comportamenti differenziali si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate dalla presenza di contatti stratigrafici e/o tettonici fra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse.

Gli scenari di pericolosità sismica locale cui si correlano effetti di amplificazione litologica sono riportati nella Tab. 1 dell'All.5 della D.G.R. 8/7374:

Sigla	SCENARIO DI PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z5	Zona di contatto stratigrafico e/o tettonico fra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse	Comportamenti differenziali

Questo scenario è stato riconosciuto per l'area in esame.

4.2.2 Analisi di 2° livello

E' stata eseguita una caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi nelle aree perimetrate nella carta di pericolosità sismica locale in zona Z4a, che fornisce la stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione (Fa).

L'applicazione del 2° livello consente l'individuazione delle aree in cui la normativa nazionale risulta insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione sismica locale (Fa calcolato superiore a Fa di soglia comunale forniti dal Politecnico di Milano). La procedura fornisce la stima quantitativa della risposta sismica dei terreni in termini di valori di Fattore di Amplificazione (Fa); gli studi sono condotti con metodi quantitativi semplificati, validi per le amplificazioni litologiche e morfologiche e sono utilizzati per zonare l'area di studio in funzione del valore di Fa.

Il valore di Fa si riferisce quindi agli intervalli di periodo tra 0.1-0.5 s e 0.5 e 1.5 s, in funzione del periodo proprio delle tipologie edilizie più rappresentate sul territorio regionale.

Per quel che riguarda gli effetti litologici la procedura semplificata richiede la conoscenza dei seguenti parametri:

- Litologia prevalente dei materiali presenti nel sito
- Stratigrafia del sito
- Andamento delle Vs con la profondità fino a valori pari o superiori a 800 m/s
- Spessore e velocità di ciascuno strato
- Sezioni geologiche, conseguente modello geofisico-geotecnico ed identificazione dei punti rappresentativi sui quali effettuare l'analisi.

4.2.2.1 Parametri litologici e stratigrafici – modello geotecnico

La litologia prevalente dei materiali presenti e la stratigrafia dei terreni per l'analisi di rischio di 2° livello sono state ricostruite mediante i dati relativi alle indagini geognostiche eseguite nell'area d'interesse, con un grado di attendibilità alto. Per maggiori dettagli si rimanda ai capitolo 3 della presente relazione tecnica.

4.2.2.2 Dati sismostratigrafici – Modello geofisico

L'andamento delle onde Vs lungo la verticale, è stato determinato mediante l'esecuzione di n° 1 stendimento di sismica multicanale con registrazione delle onde superficiali, anche a bassa frequenza.

Acquisizione dati

L'acquisizione dei dati è avvenuta secondo le modalità "*common-shot gathers*", utilizzando strumentazione "Geometrics" costituita da un sismografo modulare GEODE 3-1000 a 24 canali, con collegati 24 geofoni verticali GEOSPACE (GS11D) con frequenza di 4,5 Hz e puntale da 3".

L'energizzazione è stata ottenuta mediante massa battente, collocata all'esterno dello stendimento dei geofoni.

E' stata quindi utilizzata la procedura di analisi MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*); i dati acquisiti sono stati elaborati mediante il software winMASW 4.0 (creato dalla Eliosoft).

Il risultato finale è la determinazione, in corrispondenza di ciascuno stendimento sismico del **profilo verticale medio della V_S** (velocità delle onde di taglio), necessario per la classificazione nelle categorie di suolo previste dalle normative tecniche.

Cenni sulla metodologia MASW

La procedura di analisi MASW utilizza la propagazione nel sottosuolo delle onde di superficie. Infatti le onde di Rayleigh (o di superficie) in un mezzo non stratificato si propagano in maniera lineare in funzione della distanza del geofono, al contrario in un mezzo stratificato subiscono il fenomeno della dispersione.

La curva di dispersione permette quindi di determinare le caratteristiche del sottosuolo. La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda (λ), quindi frequenza, è infatti influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di λ-$\lambda/2$.

La velocità delle onde di Rayleigh (V_R) è correlabile alla Vs, essendo pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio (Vs).

Particolare attenzione nell'interpretazione dei dati deriva dalla considerazione che gli spostamenti indotti dalle onde di superficie sono correlabili a diversi modi (frequenze diverse), che possono sovrapporsi, soprattutto nel dominio f-k, in funzione dei seguenti fattori:

- distribuzione dell'energia tra i vari modi
- particolari conformazioni geologiche

- *array* utilizzato in fase di acquisizione.

Se avviene tale sovrapposizione, può generarsi una curva di dispersione apparente, che può risultare fuorviante in fase di interpretazione e quindi nella successiva inversione. Al fine di individuare i *modi* non correlabili alla successione stratigrafica si eseguono numerosi scoppi a distanze variabili rispetto allo stendimento. Tutte le curve di dispersione vengono quindi visionate prima di procedere al processing del *dataset* prescelto. I *modi* superiori, se correttamente riconosciuti, concorrono ad elaborare un modello maggiormente vincolato e non costituiscono un "disturbo".

Tenuto conto di quanto richiesto per l'applicazione della normativa relativa alla progettazione geotecnica, si ritiene che la metodologia di analisi MASW, la cui validità tecnica e scientifica risulta oramai consolidata, risulti pienamente idonea alla definizione dei dati richiesti. Tale scelta risulta avvalorata dalle seguenti considerazioni:

1. La percentuale di energia convertita in onde Rayleigh è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde P (7%) ed S (26%).
2. L'ampiezza delle *Surface Waves* dipende da $\sqrt{r}$ e non da r come per le *Body Waves*.
3. Il metodo MASW non è limitato, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità
4. Il metodo MASW è contraddistinto da una buona risoluzione, a differenza del metodo a riflessione.
5. <u>La propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla Vp e dalla densità, è funzione innanzitutto della Vs</u>, parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito (categoria di suolo in base al Testo Unico) come anche per l'applicazione della procedura di 2° livello prevista dall'All. 5 della D.G.R. 8/7374

<u>Metodi di analisi dei dati con procedura MASW</u>

La stima dell'andamento in profondità delle velocità Vs, mediante acquisizione sismica multicanale, viene ottenuta tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh.

La procedura prevede la possibilità di considerare tanto il modo fondamentale che quelli superiori e consta di due fasi operative principali:

- Determinazione dello spettro di velocità - Individuazione delle curve di dispersione;
- Determinazione dell'andamento della velocità delle onde di taglio (Vs) sulla verticale - Inversione e/o *modelling* diretto della curva di dispersione.

La **determinazione delle curve di dispersione e quindi dello spettro di velocità** può essere eseguita mediante tre metodi:

- f-k
- τ-p
- *Phase Shift*

Il metodo *Phase Shift* non è influenzato dal processing dei dati, mantiene ottime performance, in termini di chiarezza del segnale, anche con un numero di tracce estremamente ridotto e ha tempi di calcolo minori rispetto al metodo τ-p. La riduzione del numero di tracce provoca invece un sensibile scadimento della qualità dello spettro calcolato tramite trasformata τ-p e forte *aliasing* nello spettro f-k. E' spesso utile determinare le curve di dispersione attraverso più metodi, al fine di enfatizzare porzioni di segnale più facilmente poste in evidenza da un metodo piuttosto che da un altro.

La **ricostruzione della distribuzione verticale delle Vs** rappresenta quindi il passo successivo, cruciale, e comporta alcuni passaggi piuttosto articolati.

La curva di dispersione dipende infatti, oltre che dalla velocità delle onde di taglio (Vs), anche dallo spessore degli strati, dalla velocità delle onde di compressione (Vp) e dalla densità del terreno.

$$V(f) = F\ (Vs, \text{spessore}, Vp, \text{densità})$$

Ciò implica che la determinazione delle Vs a partire dalla curva di dispersione e quindi dalla Velocità di fase [V(f)], costituisce un problema spiccatamente non lineare. Per la sua risoluzione bisogna quindi procedere ad una linearizzazione del problema

(che comporta un certo grado di approssimazione) o all'utilizzo di algoritmi basati su un approccio non lineare (e.g. Algoritmi Genetici).

Gli algoritmi evolutivi rappresentano un tipo di procedura di ottimizzazione appartenente alla classe degli algoritmi euristici (o anche *global-search methods* o *soft computing*). Rispetto ai comuni metodi di inversione lineare, basati sul gradiente (matrice Jacobiana), queste tecniche di inversione offrono un'affidabilità del risultato di gran lunga superiore per precisione e completezza. I comuni metodi lineari forniscono infatti soluzioni che dipendono pesantemente dal modello iniziale di partenza che l'utente deve necessariamente imporre. Per la natura del problema (inversione delle curve di dispersione), la grande quantità di minimi locali porta necessariamente ad attrarre il modello iniziale verso un minimo locale che può essere significativamente diverso da quello reale (o globale). In altre parole, i metodi lineari richiedono che il modello di partenza sia già di per sé vicinissimo alla soluzione reale. In caso contrario il rischio è quello di fornire soluzioni erronee.

Gli algoritmi evolutivi (come altri analoghi) offrono un'esplorazione molto più ampia delle possibili soluzioni. A differenza dei metodi lineari non è necessario fornire alcun modello di partenza. E' invece necessario definire uno "spazio di ricerca" (*search space*) all'interno del quale vengono valutate diverse possibili soluzioni.

L'elaborazione dei dati mediante il programma winMASW, che prevede l'utilizzo degli algoritmi genetici, ha quindi il vantaggio di fornire risultati molto più affidabili rispetto a quelli possibili con altre metodologie, arricchiti anche da una stima dell'attendibilità dei dati.

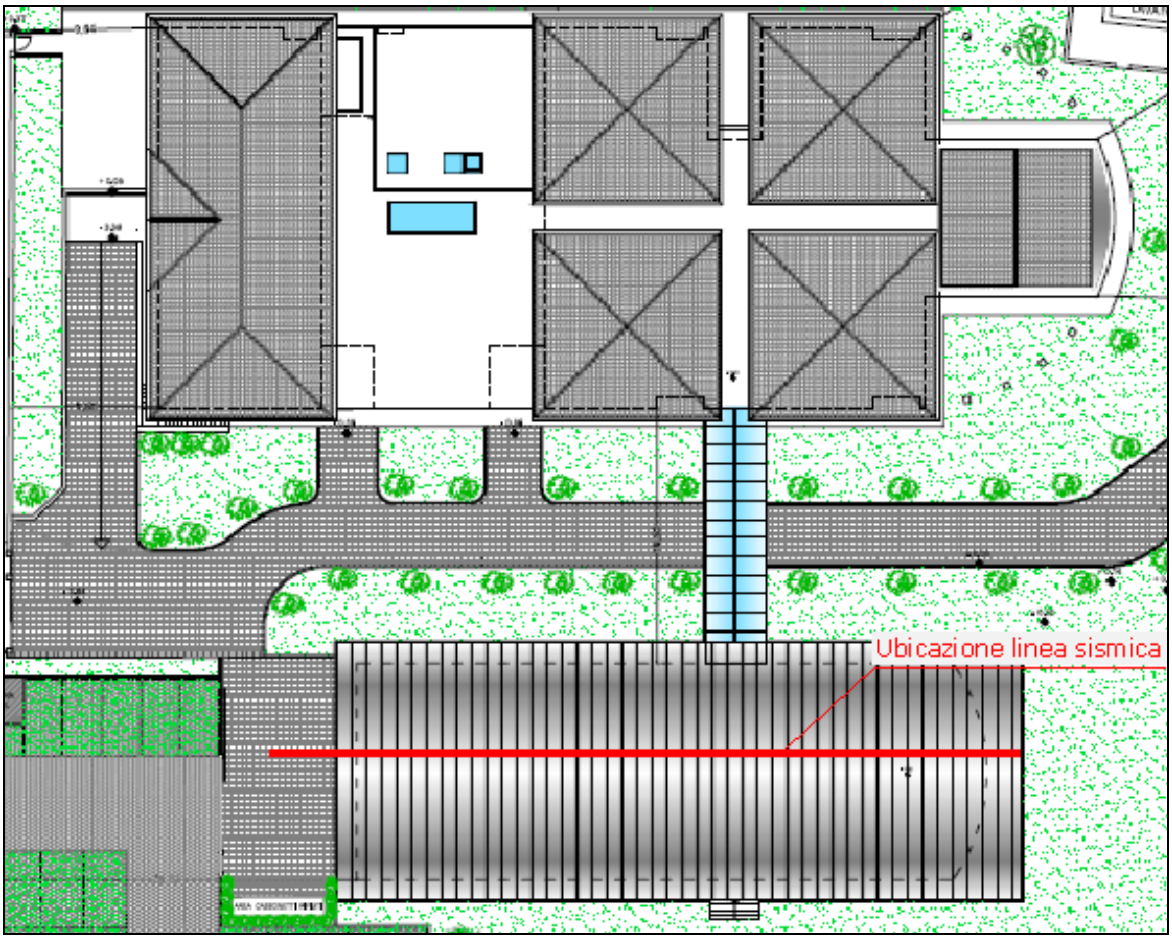
Tali risultati vengono ottenuti a prezzo di un notevole sforzo computazionale che si riflette in tempi macchina più lunghi rispetto a quelli comunemente necessari coi metodi di inversione lineare.

Il *modelling* diretto può in ogni caso essere utilizzato, mediante il programma di elaborazione, per una verifica finale del modello di velocità ottenuto mediante inversione con algoritmi.

4.2.2.3 Profili sismostratigrafici

Vengono qui di seguito riportati i dati, le procedure ed i risultati relativi allo stendimento sismico predisposto all'interno dell'area investigata.

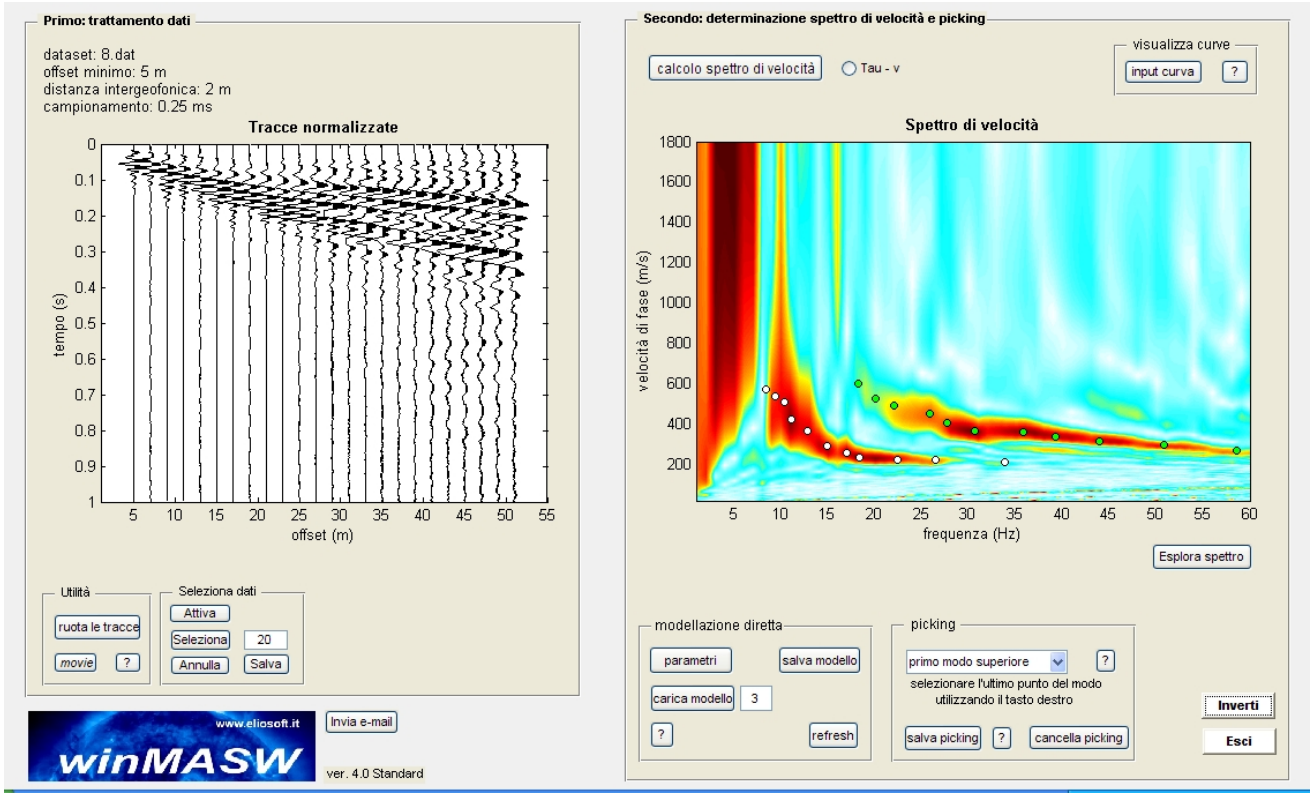
L'ubicazione dello stendimento è stata eseguita in modo da integrare le indagini geognostiche ed in funzione della logistica dei luoghi.



L'allineamento ha previsto una distanza tra geofoni pari a 2 m ed una serie di scoppi esterni all'ultimo geofono con offset variabili (1 – 3 – 5 – 7 – 10 - 15 m) e diversa intensità di energizzazione.

Fase 1 - Determinazione spettro di velocità e picking della curva di dispersione

La prima operazione eseguita è la lettura del file acquisito in campagna (common-shot gather 9.dat). Una volta caricati i dati si procede con il calcolo dello spettro di velocità. Viene indicato come unico vincolo le massime e minime velocità e frequenze (in altri termini i limiti dello spettro di velocità).



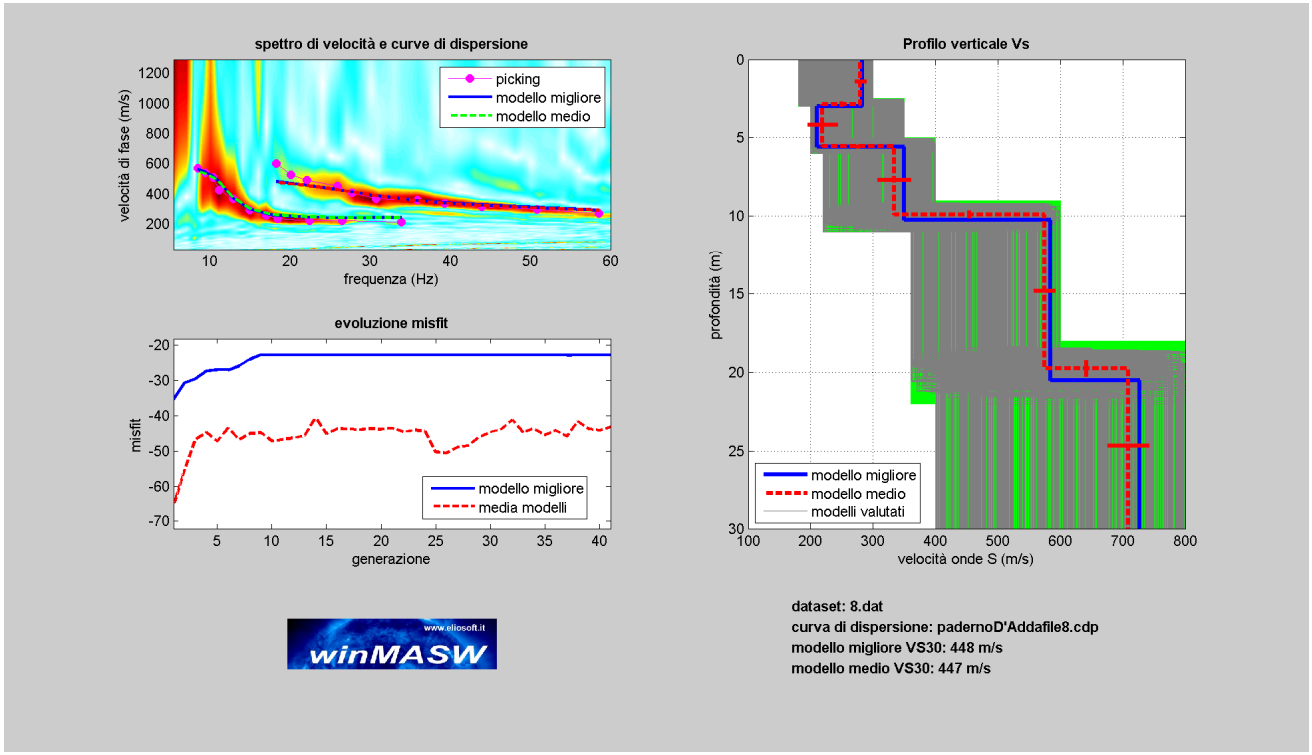
Nel caso in esame é stato individuato un modo principale ed un unico modo superiore, utilizzati per la successiva inversione della curva di dispersione.

Fase 2 - Inversione della curva di dispersione

Il secondo passo da affrontare per ottenere il profilo verticale della Vs è l'inversione della curva di dispersione precedentemente "piccata".

Nel contesto in esame poiché il gradiente di velocità può subire variazioni drastiche non è valida, per determinare il possibile spazio di ricerca, la cosiddetta assunzione $\lambda/2$ (data una certa lunghezza d'onda λ si assume che la sua velocità di propagazione dipenda dalle caratteristiche del mezzo ad una profondità pari a $\lambda/2$). Il programma utilizza in questi casi strategie di calcolo differenti. I limiti del search space ("spazio di ricerca" o "spazio dei parametri") prescelti sono in ogni caso piuttosto ampi . Per l'elaborazione dei modelli di velocità è stato impostato l'utilizzo di 5 strati, compatibile con l'assetto stratigrafico del sito d'interesse e con le finalità del presente studio. Alcuni parametri genetici sono stati considerati pari a valori standard; i tassi di crossover e di mutazione sono fissati ad esempio sui valori di 0.75 e 0.1.

```
Dati relativi all'elaborazione dello shot 4:
dataset: 8.dat  -   offset minimo (m): 5
distanza intergeofonica (m): 2  -  campionamento (ms): 0.25
curva di dispersione: padernoD'Addafile8.cdp
Numero di individui: 40  -  Numero di generazioni: 41
Numero di modelli utilizzati per il calcolo del modello medio: 1594
```




```
Velocità medie stimate:
VS (m/s):                          280   219   334   575   709
Deviazione standard (m/s):           9    24    26    17    33
Spessore (m):                      2.9   2.7   4.3   9.9
Deviazione standard (m):           0.1   0.1   0.2   0.5
```

Stima approssimativa di Vp, densità e moduli elastici

Stima della Vp (m/s):	620	432	758	1253	1379
Stima della densità (gr/cm3):	1.94	1.85	1.99	2.11	2.13
Rapposto VP/VS:	2.21	1.97	2.27	2.18	1.94
Modulo di Poisson:	0.37	0.33	0.38	0.37	0.32
Modulo di Young (MPa):	417	236	612	1906	2830
Modulo di Taglio (MPa):	152	89	222	697	1072
Costante di Lamé (MPa):	441	168	698	1916	1911
Modulo di compressione (MPa):	542	227	846	2381	2625

Si sottolinea che i parametri geotecnici, sopra riportati, sono riferiti a condizioni di bassa deformazione. I valori ottenuti sono stati infatti stimati in base alle deformazioni indotte nel terreno dalla propagazione delle onde sismiche. L'entità ridotta di tali deformazioni comporta alti valori dei moduli dinamici calcolati, superiori di circa un ordine di grandezza rispetto a quelli ottenibili, per lo stesso tipo di terreno, in situazione di grandi deformazioni. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori stimati dovranno quindi essere idoneamente corretti tenendo conto della funzione matematica che ne regola la diminuzione in funzione dello sforzo applicato e della deformazione risultante.

Modello Medio

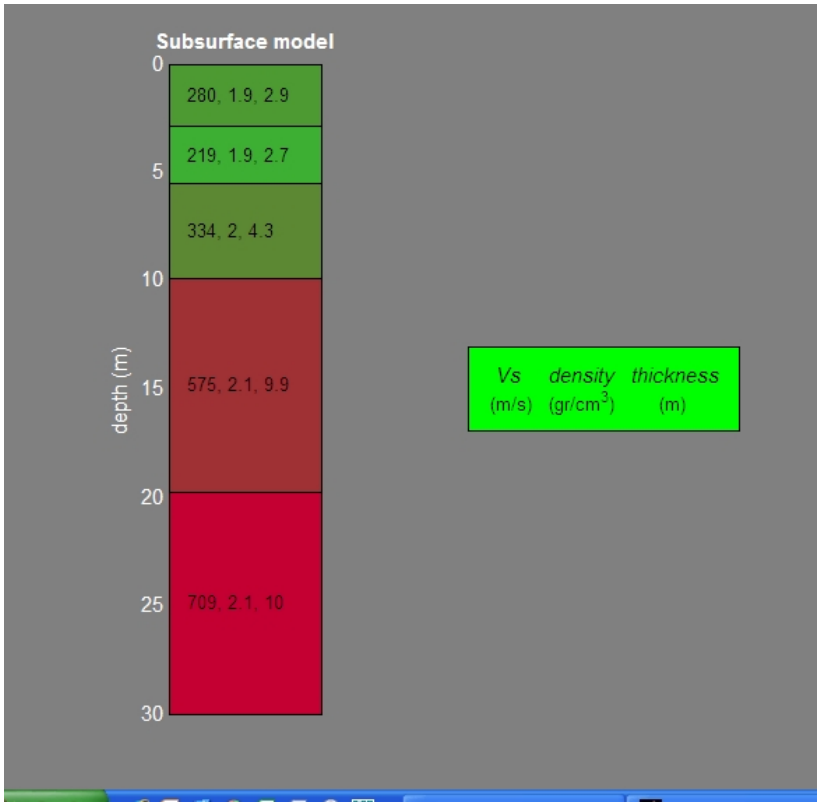
VS10 del modello medio: 287 m/sec - VS20 del modello medio: 377 m/sec - VS30 del modello medio: 447 m/sec

Possibile Tipo di Suolo: C (stimato sulla base del modello medio)

ATTENZIONE! La classificazione del terreno è di pertinenza dell'utente, che ne deve valutare la tipologia sulla base della normativa e del profilo verticale VS.

winMASW 4.0 Software per la determinazione dello spettro di velocita' e l'inversione della curva di dispersione secondo il metodo MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves
www.eliosoft.it

Si riassume qui di seguito una sezione sismostratigrafica schematica.



4.3 ***Stima degli effetti litologici e del Fattore di Amplificazione (Fa)***

Tenuto conto di tutti i dati illustrati nei precedenti paragrafi e quindi del modello stratigrafico-geofisico-geotecnico evidenziato possono essere applicate le procedure finali dell'All.5 della D.G.R. 8/7374 per la stima degli effetti litologici e del relativo **Fattore di amplificazione di sito**.

In accordo con la procedura la successione stratigrafica di riferimento e lo spessore e la velocità di ciascuno strato, come definiti mediante la linea sismica, sono stati riportati nelle schede di cui allo stesso allegato (Stima degli Effetti Litologici).

Il primo passo della procedura prevede la definizione della scheda di valutazione (All. 5 D.G.R. 8/7374) più idonea alla stima degli effetti litologici. Per i siti riferiti allo scenario PSL di tipo Z4a, nell'elaborazione dei dati è stata scelta la scheda per le litologie limoso-argillose tipo 2, tenuto conto dei campi di validità riportati nei diagrammi Z-Vs.

Il passo successivo permette la definizione della curva caratteristica da utilizzare per la stima del valore di Fa di sito. La profondità del primo strato e/o del primo strato equivalente e la relativa velocità Vs, definiscono la casella n° 2 verde e quindi la curva caratteristica n° 2.

E' stato quindi calcolato il valore del periodo del sito (T), riportato nelle schede in allegato, ottenuto considerando tutta la stratigrafia fino alla profondità in cui il valore è uguale o superiore a 800 m/sec ed utilizzando la formula riportata nell'All.5. Si è quindi proceduto alla stima del fattore di amplificazione di sito (Fa di sito) pari a **1.9** per il periodo compreso tra 0.1-0.5 s e a **1,2** per il periodo compreso tra 0.5-1.5 s.

Infine è stato eseguito il confronto con i valori Fa di soglia comunale, definiti dalla D.G.R. 8/7374. Il valore stimato, relativo ad una categoria di suolo **C**, che, per il comune di Paderno d'Adda risulta pari a **1.9** per il periodo compreso tra 0.1-0.5 s e a **2.4** per il periodo compreso tra 0.5-1.5 s.

Ne consegue che i valori calcolati sono

SEMPRE PARI O INFERIORI AI VALORI DI SOGLIA.

Le procedure seguite ed i risultati ottenuti risultano validi nel caso di applicazione della normativa tecnica più recente (D.M. 14/01/08) e della relativa classificazione sismica del territorio nazionale.

L'uso delle normative precedenti, che tiene conto dei parametri sismici in relazione alla zona sismica attribuita al territorio comunale in base all'Ord. 3274 ed al D.M. 14/09/05, comporta che la procedura seguita e soprattutto il confronto tra il fattore di amplificazione di sito ed i valori soglia allegati alla D.G.R. 8/7374 (determinati in base alla classificazione sismica più recente), non risultino significativi.

L'elaborazione condotta ha evidenziato che la normativa antisismica vigente è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito, e quindi si applica lo spettro previsto per la classe sismica 4.

20 agosto 2009

Dott. Geol. Giulio Mazzoleni

Dott. Geol. Davide Incerti