

---

**Comune di CODOGNO**  
**Provincia di LODI**



**PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO**

**STUDIO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E SISMICO:**  
**VALUTAZIONE DELLA COMPONENTE SISMICA**

**Legge Regionale 11 marzo 2005, n. 12**  
**D.G.R. 28 maggio 2008, n. 8/7374**

**Aprile 2010**

**dott. Marco Daguati**  
*GEOLOGO*

---

*via A. Diaz, 22 – 26845 Codogno (Lo)*  
*tel e fax 0377.433021 – portatile 335.6785021*  
*e-mail: [marco.daguati@geolambda.it](mailto:marco.daguati@geolambda.it)*

## **SOMMARIO**

1. PREMESSA .....	3
2. ZONAZIONE SISMICA NAZIONALE ED INQUADRAMENTO DEL TERRITORIO DI CODOGNO .....	4
3. DESCRIZIONE DELLA SISMICITÀ .....	10
4. PERICOLOSITA' SISMICA .....	14
5. LA RISPOSTA SISMICA LOCALE PER IL TERRITORIO DI CODOGNO.....	18
6. CONCLUSIONI .....	20
7. ALLEGATO 1: VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI SITO .....	23
8. ALLEGATO 2: INDAGINE GEOFISICA CON LA METODOLOGIA MASW .....	36

## **ELENCO TAVOLE ALLEGATE**

- CARTA DELLA PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE (scala 1:10.000)
- CARTA DI SINTESI (scala 1:10.000)
- CARTA DEI VINCOLI GEOLOGICI (scala 1:10.000)
- CARTA DELLA FATTIBILITA' GEOLOGICA DELLE AZIONI DI PIANO (scala 1:5.000)

## **1. PREMESSA**

In seno alla stesura del P.G.T. del Comune di Codogno, lo scrivente ha ricevuto l'incarico di aggiornare lo studio geologico comunale redatto nell'anno 2004 ai sensi della L.R. 41/97: tale quadro conoscitivo costituisce la base di partenza anche per le analisi riportate nel presente studio.

In particolare, nel corso dello studio sono stati analizzati gli aspetti sismici relativi al territorio comunale di Codogno, come previsto dalla D.G.R. n. 8/7374 del 28 maggio 2008 recante *“Aggiornamento dei criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio in attuazione dell'art. 57 della L.R. n. 11 marzo 2005 n. 12”*.

Sulla base degli esiti dell'analisi della componente sismica è stata aggiornata anche la “Carta di fattibilità geologica delle azioni di piano”: al mosaico della fattibilità, infatti, sono state sovrapposte, con apposito retino, le aree soggette ad amplificazione sismica desunte dall'analisi specifica. Per quanto concerne gli elaborati di analisi geologica, invece, si rimanda a quanto contenuto nello studio del 2004. Nella cartografia allegata, oltre alla Carta di fattibilità geologica delle azioni di piano debitamente aggiornata, viene riprodotta la Carta di Sintesi e la Carta dei Vincoli di natura geologica.

## **2. ZONAZIONE SISMICA NAZIONALE ED INQUADRAMENTO DEL TERRITORIO DI CODOGNO**

L'Ordinanza 3274 e s.m.i. stabilisce una nuova classificazione sismica del territorio italiano, in risposta sia alle nuove conoscenze scientifiche in materia sismica (acquisite dopo la precedente legge di indirizzo sismico del '74), sia al ripetersi di eventi calamitosi che hanno interessato anche zone precedentemente non classificate (sempre facendo riferimento alla Legge 64/74). La nuova classificazione, che in parte utilizza e aggiorna la classificazione sismica proposta nel 1998 dal Gruppo di Lavoro istituito dal Servizio Sismico Nazionale, è articolata in 4 zone: le prime tre corrispondono, dal punto di vista della relazione con gli adempimenti previsti dalla Legge 64/74, alle zone di sismicità alta ( $S=12$ ), media ( $S=9$ ) e bassa ( $S=6$ ), mentre la zona 4 è di nuova introduzione.

In linea generale, la valutazione del rischio sismico deriva da una stima delle conseguenze al sistema socio-economico locale potenzialmente derivanti dal terremoto considerato “probabile” nell'area di riferimento. Nella valutazione del rischio, pertanto, l'aspetto principale consiste nella definizione della pericolosità sismica, ovvero la descrizione della possibile attività sismica ottenuta assegnando, in ogni area, le grandezze rappresentative del moto del suolo.

Come innanzi premesso, una prima classificazione della pericolosità sismica è stata ottenuta a scala nazionale suddividendo il territorio in zone sismiche: tale semplificazione, sebbene riduttiva, è risultata necessaria per l'applicazione di norme tecniche aventi come obiettivo un adeguato livello di protezione sismica.

Il primo atto formale di classificazione del territorio nazionale risale al 1909 (dopo il forte terremoto che investì l'area calabro-messinese il 28 dicembre 1908), con il quale vennero definite le norme tecniche per la ricostruzione nelle aree colpite dal sisma e individuate le zone nelle quali tali norme dovevano applicarsi in ambito edilizio.

L'aspetto più significativo dal punto di vista della zonazione sismica era rappresentato dall'estensione della zona interessata dal Decreto del 1909: oltre all'area dello Stretto di Messina, che presentava i maggiori danni, vi erano incluse parte della provincia di Messina e tutta la Calabria. Tale strumento derivava anche dal ricordo del terremoto che aveva colpito il

golfo di Santa Eufemia nel 1905 e, soprattutto, dei terremoti che avevano sconvolto la Calabria nel 1783.

La normativa sismica non vide sostanziali novità fino al 1925, quando un forte terremoto investì un tratto della costa marchigiana, a nord di Ancona, successivamente classificata a rischio sismico.

Al Decreto del 1925 fece seguito nel 1927 un nuovo Decreto di notevole ampiezza, il quale classificava tutte le località colpite da terremoti in due categorie distinte in relazione al loro grado di sismicità e alle caratteristiche geologiche.

Risale al 1962 la Legge che, per la prima volta, dettò le “Norme tecniche per le costruzioni in zona sismica” le quali, contrariamente alle precedenti finalizzate alla ricostruzione delle zone colpite da terremoto, assunsero un significato di prevenzione sismica.

Il terremoto nel Belice del 1968 e quello nel Friuli del 1976 condussero ad una classificazione con l'introduzione di un elemento di novità, costituito dal criterio utilizzato per distinguere le zone di prima e di seconda categoria. In precedenza, infatti, tale distinzione era abbastanza casuale, basata su un giudizio di gravità del danno; nei decreti del 1976 e 1979, invece, la classificazione si basava sul valore della probabilità di superamento di assegnate soglie dell'accelerazione del suolo in un prefissato intervallo di tempo.

Il terremoto Irpino-Lucano del 1980 segnò la svolta decisiva nella storia della classificazione sismica in Italia: il grande impatto sull'opinione pubblica e la constatazione che le zone colpite dal terremoto erano in gran parte non classificate, condussero il Ministero dei Lavori Pubblici alla proposta di riclassificazione elaborata nell'ambito del Progetto finalizzato geodinamica del CNR attraverso una serie di Decreti emanati tra il 1981 ed il 1984. La nuova classificazione si basò per la prima volta su parametri quantitativi definiti in modo omogeneo per tutto il territorio nazionale, come la soglia di sismicità, l'intensità risentita e la scuotibilità, e prevede la suddivisione in tre categorie con grado di severità sismica decrescente dalla prima alla terza.

Nell'aprile 1997, la Commissione per la previsione dei Grandi Rischi del Dipartimento della Protezione Civile decise di istituire un gruppo di lavoro con l'obiettivo di formulare una proposta di aggiornamento della classificazione sismica nazionale, anche alla luce di nuove ricerche e dell'esperienza di altri paesi.

La nuova classificazione, denominata “Proposta 98”, determinò la suddivisione del territorio nazionale sempre nelle tre categorie sismiche a cui si aggiunse una categoria ulteriore per i

comuni non classificati; l'appartenenza di un'area ad una particolare categoria sismica avvenne sulla base di parametri quantitativi legati al moto del suolo previsto (approccio probabilistico):

1. l'accelerazione massima del terreno  $a_{max}$  (detta anche PGA) con il 10% di probabilità di essere superata in 50 anni, la cui distribuzione è rappresentata nella carta della pericolosità sismica (Slejko et al. 1998);
2. l'integrale dello spettro di risposta in pseudovelocità, detto "intensità di Housner";
3. il valore della massima intensità sperimentata nell'ultimo millennio.

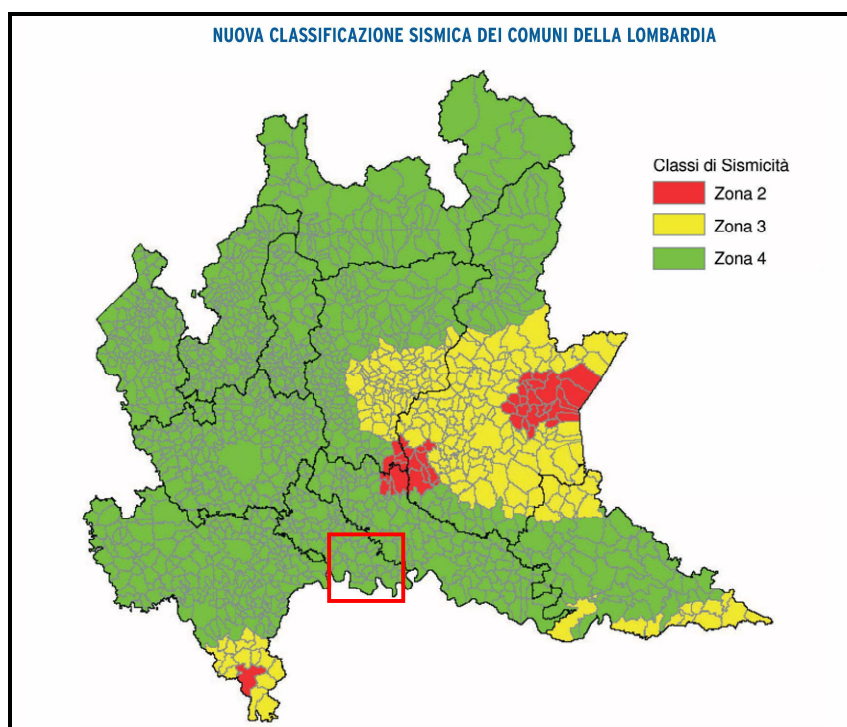
In seguito al terremoto del 31 ottobre 2002 che provocò a San Giuliano di Puglia il crollo di una scuola e al verificarsi di eventi sismici calamitosi in zone non classificate sismiche (il Comune di San Giuliano di Puglia era classificato come non sismico) sono stati emanati i *"Criteri per l'individuazione, la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle zone sismiche"* e le nuove norme tecniche per la costruzione in zona sismica (OPCM 3274 del 20 marzo 2003).

Rispetto alle classificazioni precedenti, l'O.P.C.M. 3274 stabilisce una nuova classificazione sismica del territorio nazionale utilizzando e aggiornando la classificazione sismica proposta nel 1998. La nuova classificazione è articolata in 4 zone, ciascuna contraddistinta da un diverso valore dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo ( $a_g$ ) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (si veda la tabella 1), eliminando di fatto la presenza di aree del territorio classificate come non sismiche: in questo modo, a ciascuna area del territorio nazionale viene attribuito un differente livello di protezione sismica.

In ottemperanza all'art. 2 della OPCM 3274 e s.m.i. e secondo quanto disposto dal D.Lgs n. 112/1988 che attribuiva alle Regioni la competenza di classificare il territorio secondo criteri generali, la Regione Lombardia, con D.G.R. n. 14964 del 7 novembre 2003, ha provveduto ad aggiornare i propri elenchi delle zone sismiche.

L'O.P.C.M. 3274 e s.m.i. è entrata in vigore il 23 ottobre 2005 in coincidenza con quella delle nuove *"Norme Tecniche per le Costruzioni"* (D.M. 14 settembre 2005).

A far tempo da tale data è quindi vigente la classificazione sismica del territorio nazionale; per la Regione Lombardia la classificazione sismica è mostrata in figura 1:



**Figura 1:** Classificazione sismica dei comuni della Lombardia in seguito all'Ordinanza 3274/2003 (D.G.R. n. 7/14964 del 7 novembre 2003).

Secondo la classificazione vigente, il territorio comunale di Codogno appartiene alla **zona sismica 4** e risulta identificato da un valore di accelerazione massima orizzontale su suolo di riferimento con la probabilità del 10 % di essere superato almeno una volta nei prossimi 50 anni (periodo di ritorno uguale a 475 anni) pari a 0.05g.

<b>Zona</b>	<b>Valori di <math>a_g</math></b>
1	0,35 g
2	0,25 g
3	0,15 g
4	0,05 g

**Tabella 1:** valori di accelerazione orizzontale massima in funzione della zona sismica (D.M. 14.09.2005).

Sebbene la nuova classificazione preveda che ogni area del territorio nazionale sia classificata e identificata da un valore soglia di pericolosità sismica, si delineano alcune criticità:

- le Regioni, sollecitate dalla O.P.C.M. 3274, hanno classificato il proprio territorio basandosi su precedenti studi di pericolosità sismica (soprattutto quelli prodotti nell'ambito del gruppo di lavoro del 1998) e hanno inserito i comuni non classificati in zona 4 senza valutare i livelli di accelerazione attesi;
- come disposto dalla O.P.C.M. 3274 e s.m.i. e dal D.M. 14.09.2005, la mappa di pericolosità sismica di riferimento a scala nazionale è stata aggiornata sulla base di nuovi dati utilizzando approcci leggermente differenti rispetto a quelli utilizzati per la redazione della mappa elaborata nel 1998 (INGV, 2006 – OPCM 351/06); questo ha determinato, per alcune aree, la presenza di valori di  $a_g$  diversi rispetto a quelli previsti dalla classe sismica di appartenenza.

Sulla base di quanto sopra riportato, è chiaro come la classificazione del territorio nazionale derivi da una semplificazione nella valutazione dei livelli di pericolosità sismica che, seppur necessaria per l'applicazione di una normativa di primo riferimento, deve essere considerata come punto di partenza per la realizzazione di studi sismici a maggior dettaglio e a minor scala (*microzonazione sismica*), soprattutto in fase di pianificazione urbanistica. In questo modo si può indirizzare lo sviluppo edificatorio e, in determinate situazioni, aumentare i livelli di protezione sismica previsti dalla normativa (livello minimo).



Le “*Norme tecniche per le costruzioni*” di cui al D.M. 14.01.2008 hanno introdotto un nuovo elemento metodologico nella stima della pericolosità sismica di base, la quale non risulta più associata alla zona sismica di appartenenza (criterio zona dipendente ex D.M. 14.09.2005), ma al valore di accelerazione massima orizzontale attesa su base probabilistica su uno specifico sito (criterio sito dipendente).

Ciò ha permesso di superare la differenza tra valori di accelerazione previsti dagli studi di pericolosità sismica a scala nazionale e valori previsti dalla normativa antisismica per un suolo di riferimento (figura 7). Esistono tuttavia alcune problematiche insorte nella distribuzione dei vertici della griglia di riferimento dei valori di accelerazione e l’ubicazione dell’area d’indagine.

Un’ulteriore novità, sempre introdotta dal D.M. 14.01.2008, è la formulazione di uno spettro di risposta differente per ciascuna categoria di suolo di fondazione, non accorpendo più, come in precedenza, la categoria di suolo di fondazione B e C.

### **3. DESCRIZIONE DELLA SISMICITÀ**

L'analisi della sismicità, intesa come distribuzione spazio-temporale dei terremoti in una determinata area, costituisce il primo tassello per gli studi di valutazione della pericolosità sismica di base.

Trattandosi di modelli probabilistici, infatti, le caratteristiche sismotettoniche e le modalità di rilascio dell'energia sismica pregressa consentono la messa a punto di modelli previsionali dell'attività sismica attraverso una quantificazione dei livelli di accelerazione attesi.

Il territorio di Codogno e un suo ragionevole intorno non rientrano in alcuna delle zone sismogenetiche (zonazione ZS9, figura 2), sottolineando l'assenza di strutture geologiche in grado di generare terremoti (le cosiddette “faglie capaci”).

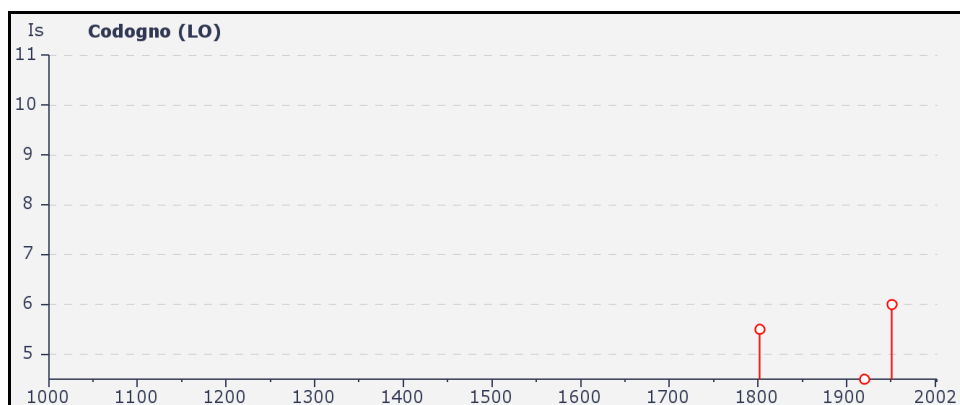
Dalla consultazione dei cataloghi sismici redatti dall'Istituto di Geofisica e Vulcanologia per gli studi di pericolosità risulta che:

- l'area comunale e quella del lodigiano, nel loro complesso, sono caratterizzate da eventi sismici piuttosto sporadici e di intensità massima rilevata dell'ordine del V-VI grado della scala Mercalli;
- le località epicentrali per gli eventi che hanno prodotto i maggiori risentimenti/danni (osservazioni macrosismiche) provengono da zone appartenenti alle province vicine, corrispondenti al Veronese, al Bresciano, al Bergamasco e, soprattutto, all'Appennino Emiliano-Romagnolo.

Tale fatto è compatibile con la storia sismica locale così come deducibile dal catalogo DBMI04, il database utilizzato per la compilazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI04) aggiornato al maggio 2004 (a cura di M. Stucchi et al.), nel quale sono riportate le osservazioni macrosismiche relative a Codogno.

Osservazioni sismiche (11) disponibili per Codogno (LO)

Effetti	In occasione del terremoto:								
Is	Anno	Me	Gi	Or	Mi	Se	AE	Io	Mw
6	1951	05	15	22	54		LODIGIANO	6-7	5.24
5-6	1802	05	12	09	30		Valle dell'Oglio	8	5.67
4-5	1920	09	07	05	55	40	Garfagnana	9-10	6.48
4	1983	11	09	16	29	52	Parmense	6-7	5.10
3-4	1936	10	18	03	10		BOSCO CANSIGLIO	9	5.90
3-4	1972	10	25	21	56		PASSO CISA	5	4.95
3	1891	06	07	01	06	14	Valle d'Ilasi	8-9	5.71
3	1929	04	20	01	09	46	Bolognese	7	5.55
3	1971	07	15	01	33	23	Parmense	7-8	5.61
NF	1909	01	13	45			BASSA PADANA	6-7	5.53
NF	1939	10	15	14	05		GARFAGNANA	6-7	5.20

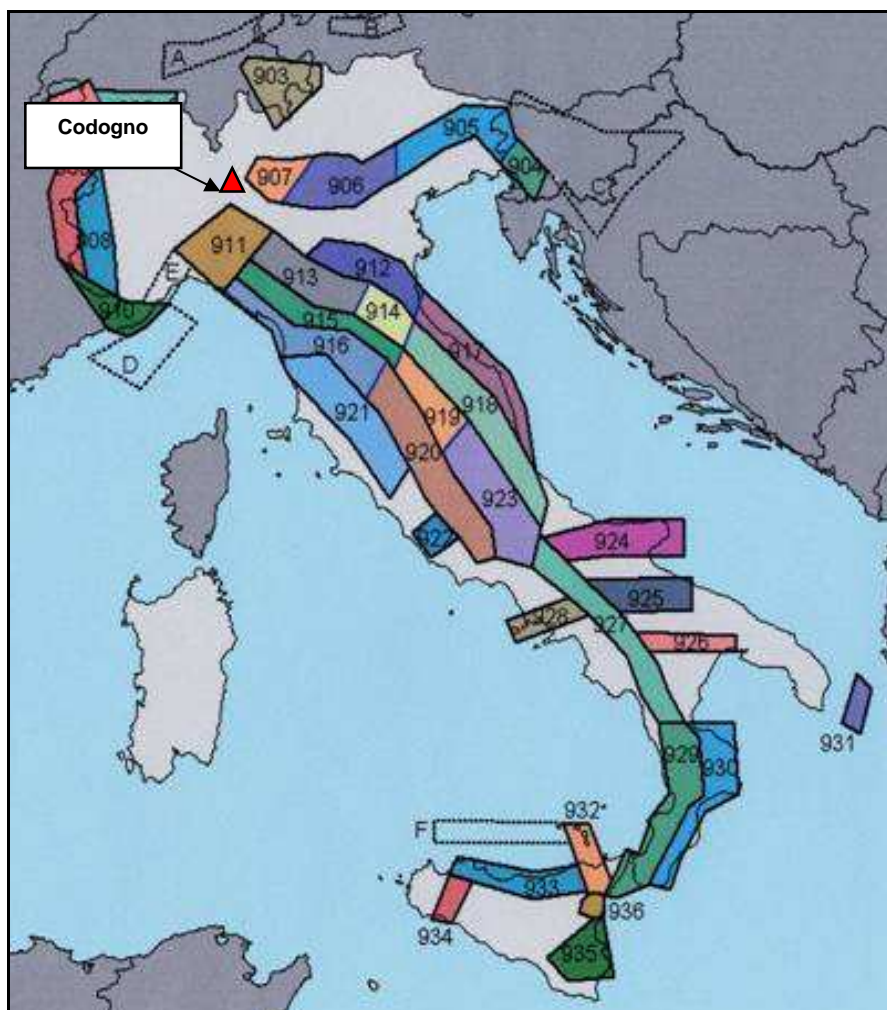


Dal catalogo si nota come nessun sisma risulti localizzato entro il territorio del Comune di Codogno e aree limitrofi; costituisce invece una interessante eccezione l'evento sismico del 1951 con epicentro nel Lodigiano (a S di Lodi), localizzato esternamente ad importanti zone sismogenetiche: si potrebbe trattare di un fenomeno di rilascio tensionale legato a una struttura profonda, probabilmente ancora attiva in epoca recente.

Nonostante la modesta magnitudo stimata per l'evento sismico, si ritiene che tale argomento debba essere considerato tra quelli meritevoli di approfondimento, sia per le importanti ripercussioni che può avere in termini di protezione antisismica, sia per l'intrinseco interesse scientifico insito tra eventi neotettonici e sviluppo del territorio.

A completamento delle osservazioni macrosismiche, nella figura 4 si mostra la distribuzione della sismicità “recente” rispetto al territorio in esame, riportando le localizzazioni epicentrali degli eventi registrati dalla rete Sismica Nazionale nell’intervallo di tempo compreso tra il 1981 ed il 2006 (Catalogo della sismicità italiana C.S. 1.0).

Anche in questo caso si evidenzia l’assenza di terremoti di una certa entità localizzati in prossimità del territorio di Codogno, dimostrando come l’area sia caratterizzata da una bassa potenzialità sismica il cui aspetto principale risulta legato agli effetti risentiti e prodotti da terremoti di energia elevata ( $ML > 4$ ) avvenuti in aree epicentrali esterne e lontane dall’area in esame (soprattutto provenienti dalla zona del margine dell’Appennino romagnolo).



**Figura 2:** Individuazione delle zone sismogenetiche in cui è suddiviso il territorio nazionale - zonazione sismogenetica ZS9 (INGV 2004).

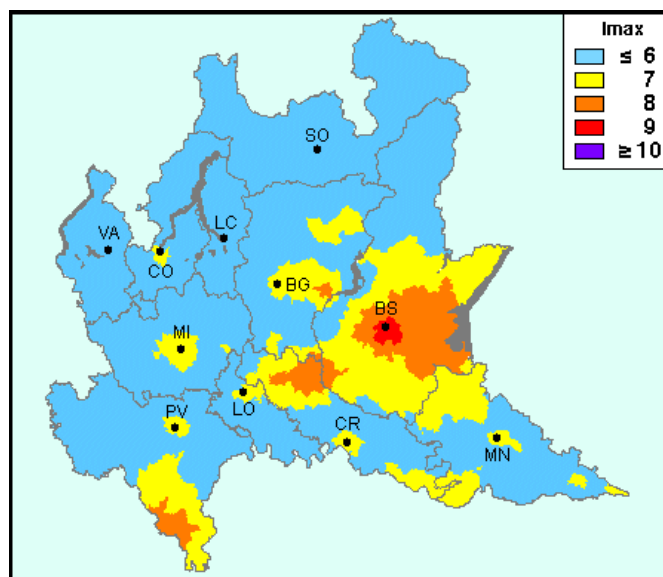


Figura 3: Carta della massima intensità macrosismica attesa in Lombardia (Moliniet et al., 1996).



Figura 4: Ubicazione dei terremoti recenti – periodo 1981-2006 (INGV).

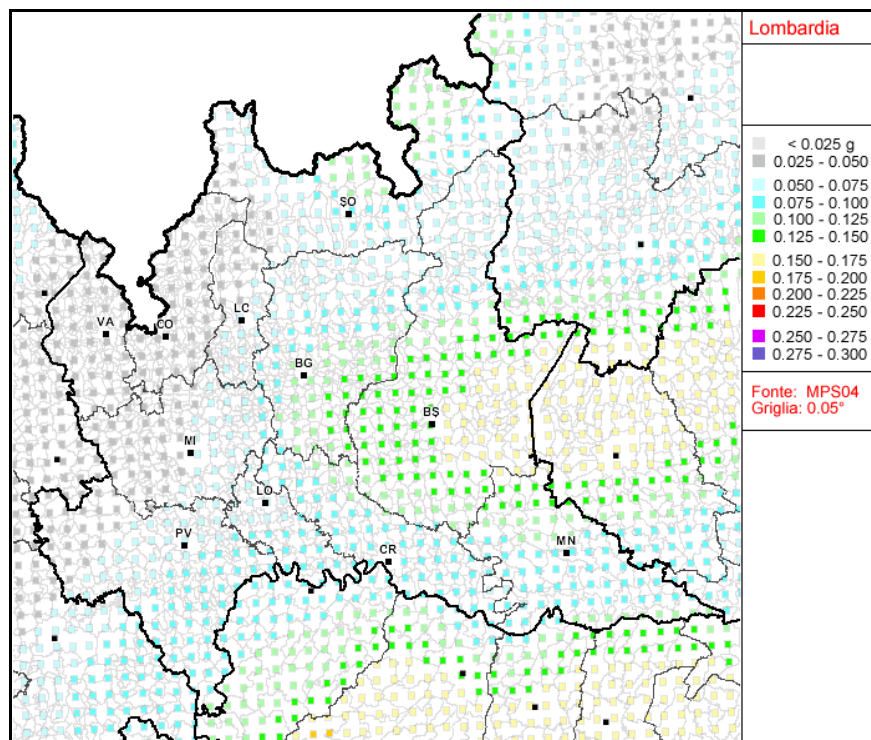


#### 4. PERICOLOSITA' SISMICA

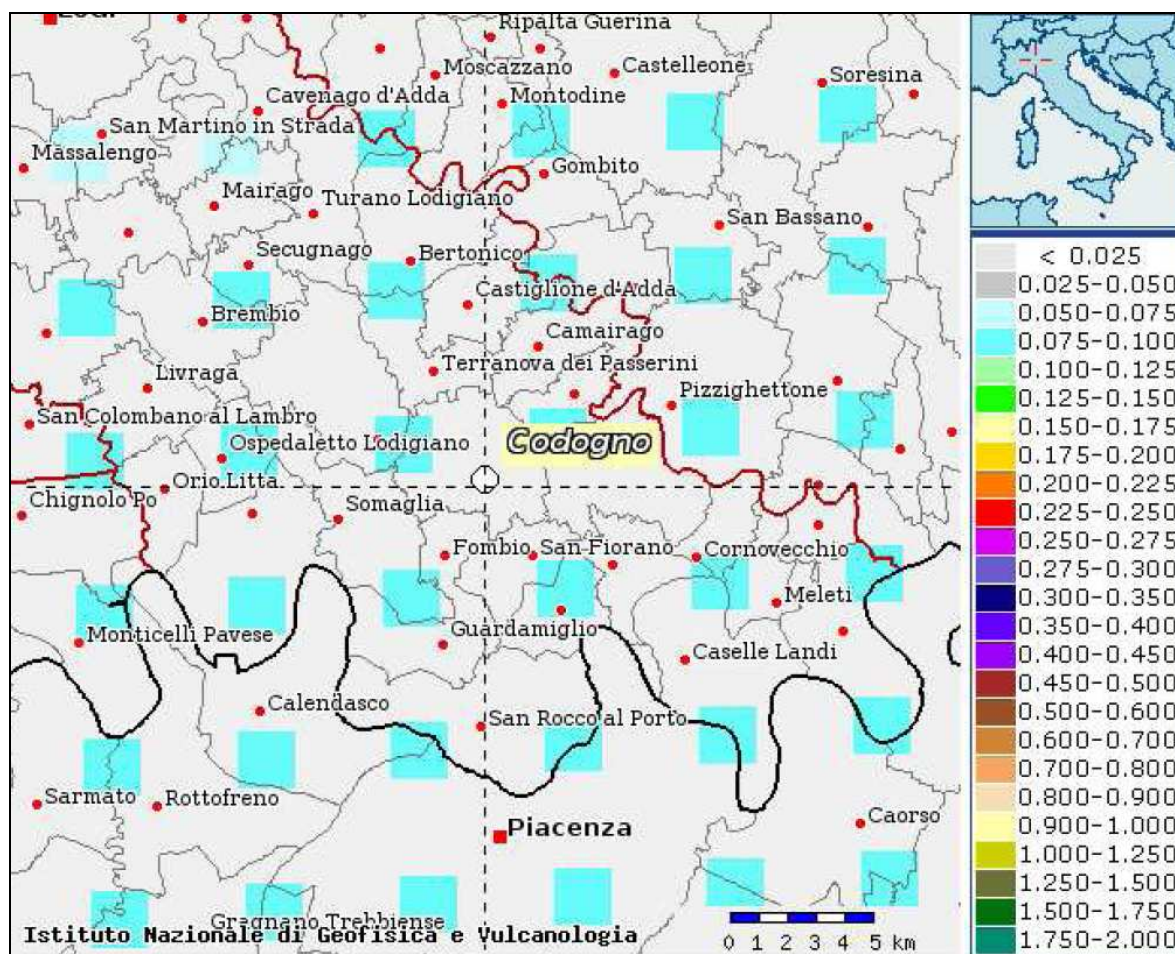
Come accennato nel capitolo precedente, in seguito all'emanazione della O.P.C.M. 3274/2003 e del D.M. 14.09.2005, è stata prodotta una nuova versione della Carta della Pericolosità Sismica del territorio nazionale (INGV anno 2004 e 2006).

La mappa di figura 5 riporta il valore dell'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  che ha la probabilità di essere superato almeno una volta nei prossimi 50 anni; tale valore di probabilità, che corrisponde ad un periodo di ritorno di 475 anni, è assunto come riferimento dalla normativa sismica vigente.

Nella figura seguente si riporta l'estratto della mappa di pericolosità sismica relativa alla Regione Lombardia, da cui si ricava che per il territorio di Codogno il valore di  $a_g$  atteso risulta compreso tra **0.075 e 0.100 g**, ovvero può assumere valori superiori rispetto a quello previsto dalla normativa per la zona sismica 4 (D.M. 14.09.2005, tabella 1 e figura 7).



**Figura 5:** Mappa della pericolosità sismica della Regione Lombardia: si riportano i valori dell'accelerazione orizzontale massima attesa su suolo di riferimento come frazione di g (INGV anno 2006).

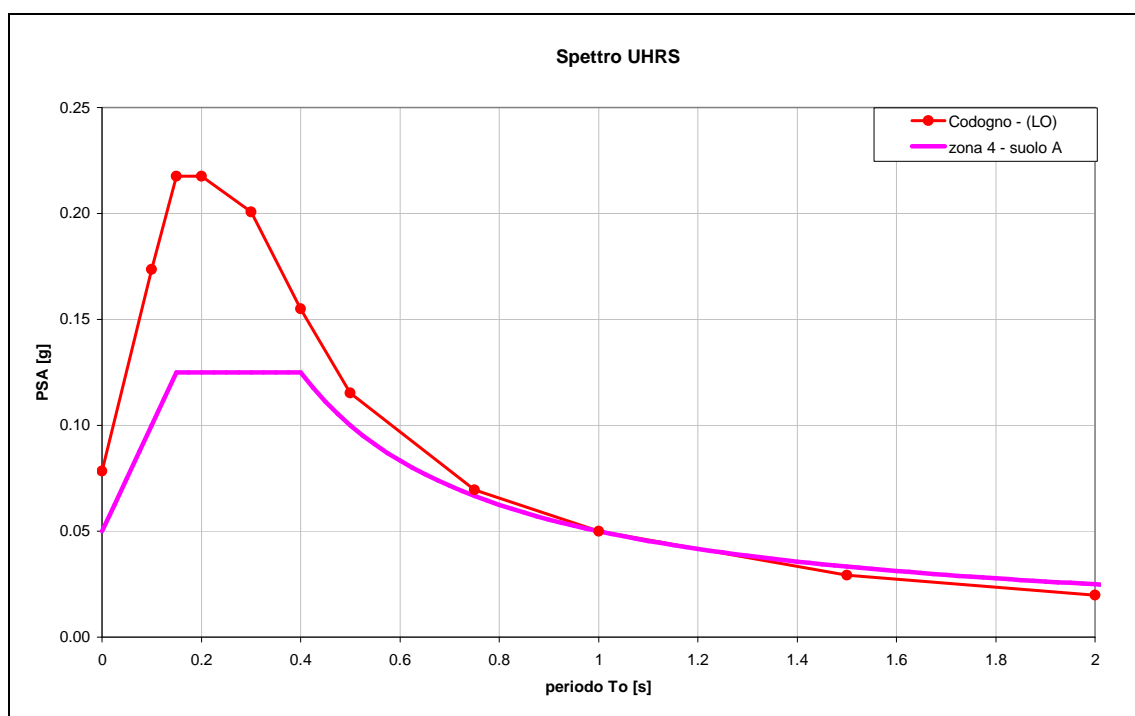


**Figura 6:** Mappa della pericolosità sismica relativa all'area di Codogno.

Tuttavia, i soli valori di ag non sono sufficienti a descrivere le caratteristiche del moto atteso in un sito: esso viene identificato dallo spettro a probabilità uniforme (UHRS), che risulta costituito, per un intervallo di periodi, dai valori di accelerazione che hanno la stessa probabilità del 10% di essere superati nei prossimi 50 anni. Lo spettro UHRS deriva dagli studi di pericolosità sismica condotti a livello nazionale dall'Istituto di geofisica e vulcanologia secondo una metodologia di tipo probabilistico (approccio Cornell).

In figura 7 si riporta lo spettro UHRS (calcolato dalla media pesata dei valori relativi ai 4 vertici della griglia di accelerazioni - reticolo di riferimento per il calcolo degli studi di PS – INGV, 2006-2008 - che comprendono il sito in esame così come definito nell'Allegato A e B del D.M. 14.01.2008) e quello previsto dalla normativa antisismica per la classe 4, entrambi per

un suolo di riferimento: dal confronto si rileva come lo spettro previsto dal D.M. 14.09.2005, basato sul criterio “zona dipendente”, risulti “inferiore” a quello previsto dagli studi di PS basato sul criterio “sito dipendente” (D.M. 14.01.2008).



**Figura 7:** Spettro di risposta a probabilità uniforme (in rosso) per un periodo di ritorno di 475 anni e smorzamento pari al 5% a confronto con lo spettro di risposta previsto dal D.M. 14.09.2005 (in magenta).

Lo spettro UHRS individua la pericolosità sismica di base dell’area, ovvero identifica su base probabilistica le caratteristiche dello scuotimento del suolo (**macrozonazione sismica**) senza considerare alcuna modificazione che può subire il moto del suolo causata dal contesto geologico e geomorfologico dell’area, cioè senza modificazioni dovute **a effetti locali**.

Va tuttavia fatto osservare come le locali condizioni geologiche e geomorfologiche possano influenzare, in occasione di eventi sismici, la pericolosità sismica di base producendo effetti diversi da considerare nella valutazione generale della pericolosità dell’area.

Tali effetti vengono distinti in funzione del comportamento dinamico dei terreni e dei materiali coinvolti; pertanto, gli studi finalizzati al riconoscimento delle aree potenzialmente pericolose dal punto di vista sismico sono basati, in primo luogo, sull’identificazione dei possibili effetti



locali, distinguibili in due grandi gruppi: quelli di sito o di amplificazione sismica locale e quelli dovuti ad instabilità (o effetti cosismici).

Mentre gli effetti di instabilità interessano tutti i terreni che mostrano un comportamento instabile o potenzialmente tale nei confronti delle sollecitazioni sismiche (esempio i versanti, le frane quiescenti, ecc.), gli effetti di sito o di amplificazione sismica locale interessano tutti i terreni che mostrano un comportamento stabile nei confronti delle sollecitazioni sismiche attese. Quest'ultimi sono rappresentati dall'insieme di modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico (terremoto di riferimento), relativo ad una formazione rocciosa di base (bedrock), può subire, durante l'attraversamento degli strati di terreno sovrastanti il bedrock, a causa dell'interazione delle onde sismiche con le strutture locali.

Gli effetti di sito si distinguono in due gruppi che possono essere contemporaneamente presenti nella stessa area:

- *gli effetti di amplificazione topografica*: si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie superficiali più o meno articolate e da irregolarità topografiche in generale; tali condizioni favoriscono la focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta del rilievo a seguito di fenomeni di riflessione sulla superficie libera e di interazione fra il campo d'onda incidente e quello difratto. Se l'irregolarità topografica è rappresentata da substrato roccioso (bedrock) si verifica un puro effetto di amplificazione topografica mentre nel caso di rilievi costituiti da materiali non rocciosi, l'effetto amplificatorio è la risultante dell'interazione (difficilmente separabile) tra l'effetto topografico e quello litologico di seguito descritto;
- *gli effetti di amplificazione litologica*: 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.

## 5. LA RISPOSTA SISMICA LOCALE PER IL TERRITORIO DI CODOGNO

Al fine di individuare gli effetti di sito locali, la D.G.R. 8/7374/2008 prevede che, in fase di pianificazione urbanistica, venga affrontata una analisi della pericolosità sismica del territorio secondo livelli di approfondimento successivi.

Tale metodologia prevede tre livelli di approfondimento con grado di dettaglio crescente: i primi due sono obbligatori in fase di pianificazione (con le opportune differenze in funzione della zona sismica di appartenenza), mentre il terzo è obbligatorio in fase di progettazione; nella tabella seguente si riportano gli adempimenti in funzione della zona sismica di appartenenza:

	<b>LIVELLI DI APPROFONDIMENTO E FASI DI APPLICAZIONE</b> <i>PSL= Pericolosità sismica locale</i>		
	<i>1° Livello Fase pianificatoria</i>	<i>2° Livello Fase pianificatoria</i>	<i>3° Livello Fase progettuale</i>
<b>Zona sismica 2-3</b>	obbligatorio	Nelle zone PSL Z3 e Z4 se interferenti con urbanizzato o urbanizzabile, ad esclusione delle aree già inedificabili	- Nelle aree indagate con il 2° livello quando Fa calcolato > valore soglia comunale - Nelle zone PSL Z1, Z2 e Z5
<b>Zona sismica 4</b>	obbligatorio	Nelle zone PSL Z3 e Z4 solo per edifici strategici e rilevanti (elenco tipologico di cui al d.d.u.o. n. 19904/03)	- Nelle aree indagate con il 2° livello quando Fa calcolato > valore soglia comunale; - Nelle zone PSL Z1, Z2 e Z5 per edifici strategici e rilevanti

Nel caso specifico del Comune di Codogno, l'analisi territoriale (basata sui dati innanzi acquisiti) ha definito un generale scenario di Pericolosità Sismica Locale “Z4a - Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi”, esteso all'intero ambito comunale: l'effetto atteso nei confronti delle onde sismiche è quindi quello di una amplificazione litologica.

Secondo le informazioni stratigrafiche e di prima caratterizzazione geotecnica, si tratta di depositi granulari da poco a mediamente addensati e terreni limo-argillosi, presumibilmente identificabili con una categoria di suolo del tipo C (*“Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri”*, caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 e 360 m/s)<sup>(1)</sup>.

Nella definizione degli scenari di pericolosità sismica, inoltre, è stato evidenziato l’orlo di terrazzo principale al margine meridionale del Comune di Codogno, in corrispondenza del quale il Livello Fondamentale della Pianura risulta terrazzato sulle alluvioni oloceniche (valle del Po): tale lineamento, di altezza prossima ai 10 m, è identificabile con lo scenario di pericolosità sismica locale Z3a, per il quale è atteso un effetto di amplificazione topografica.

<b>Sigla</b>	<b>SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE</b>	<b>EFFETTI</b>
<b>Z1a</b>	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi	Instabilità
<b>Z1b</b>	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti	
<b>Z1c</b>	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana	
<b>Z2</b>	Zone con terreni di fondazione particolarmente scadenti (riporti poco addensati, terreni granulari fini con falda superficiale)	Cedimenti e/o liquefazioni
<b>Z3a</b>	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
<b>Z3b</b>	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite - arrotondate	
<b>Z4a</b>	Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi.	Amplificazioni litologiche e geometriche
<b>Z4b</b>	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	
<b>Z4c</b>	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)	
<b>Z4d</b>	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	

<sup>1</sup>  $V_{s30}$  è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio, calcolata come

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n H_i / V_i}$$

dove  $H_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio  $\gamma < 10^{-6}$ ) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

La carta della pericolosità sismica locale costituisce il riferimento per l'applicazione dei successivi livelli di approfondimento, come mostrato nella tabella seguente:

<b><i>SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE</i></b>	<b><i>Classe di Pericolosità Sismica</i></b>
<b>Z1a</b>	H3
<b>Z1b</b>	H2- livello di approfondimento 3°
<b>Z1c</b>	
<b>Z3a</b>	H2- livello di approfondimento 2°
<b>Z3b</b>	
<b>Z4a</b>	H2- livello di approfondimento 2°
<b>Z4b</b>	
<b>Z5</b>	H2- livello di approfondimento 3°

Considerati gli scenari di pericolosità sismica locale individuati sul territorio di Codogno, in caso di pianificazione o progettazione di strutture strategiche e rilevanti (classificate dal D.d.u.o. n. 19904/03 della Regione Lombardia), si dovranno affrontare successivi livelli di approfondimento, così come previsto dalla D.G.R. n. 8/7374/2008.

Nell'allegato 1 viene illustrata l'analisi di 2° livello compiuta, ai sensi della citata D.G.R., per le aree destinate a ospitare (secondo le previsioni di Piano) alcune strutture fra quelle classificate dal citato elenco della Regione Lombardia.

## **6. CONCLUSIONI**

Lo studio relativo alla pericolosità sismica locale evidenzia come l'intero territorio comunale sia soggetto a fenomeni di amplificazione locale generati dalle caratteristiche litologiche dei terreni. Per tale ragione, qualsiasi trasformazione d'uso del suolo legata alla realizzazione di opere strategiche e rilevanti (elenco tipologico di cui al D.d.u.o. n. 19904/03) dovrà essere preventivamente accompagnata da una valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'attuazione del 2° livello di approfondimento, secondo quanto riportato nella D.G.R. 8/7374/2008.

Qualora lo studio di valutazione confermasse che il fattore  $F_a$  di sito è maggiore di quello di soglia, in fase progettuale dovrà essere eseguita specifica analisi sismica di 3° livello finalizzata a definire l'azione sismica di progetto.

Tuttavia, anche nel caso in cui il fattore  $F_a$  di sito risultasse inferiore a quello di soglia ( $F_a \text{ norma} > F_a \text{ sito}$ ) lo spettro previsto dalla normativa potrebbe non cogliere alcuni aspetti correlati a processi di amplificazione molto marcati per specifici periodi: per questo si consiglia, in fase di progettazione di edifici pubblici e con valenza strategico-rilevante, di effettuare comunque l'approfondimento sismico di 3° livello.

In ogni caso, nella definizione del modello geologico e geotecnico da eseguire a corredo di ogni progetto di infrastruttura o edificio (reso obbligatorio dal D.M. 11.03.1988 e dal D.M. 14.01.2008 e ss.mm.ii.), dovranno essere analizzati anche gli aspetti derivanti dalla pericolosità sismica locale.

## **ALLEGATI**

## 7. ALLEGATO 1: VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI SITO

L'analisi sismica di I livello ha individuato due scenari di pericolosità sismica, come descritto nei capitoli precedenti e sintetizzato nella "Carta di pericolosità sismica locale".

Come previsto dalla D.G.R. 8/7374/2008, in caso di contemporaneità di effetti litologici (Z4) e morfologici (Z3), in fase di pianificazione/progettazione di strutture considerate strategiche o rilevanti si deve procedere all'analisi dei fattori di amplificazione di entrambi i casi per poi scegliere quello più sfavorevole (analisi di II livello).

La procedura di cui all'Allegato 5 prevede il confronto del valore di Fa dell'area rispetto al valore di Fa caratteristico del territorio comunale in cui l'area è inserita: tale valore, detto "*di soglia*", è contenuto in un apposito elenco redatto dalla Regione Lombardia.

Il risultato conduce a due situazioni: il valore di Fa è inferiore o uguale al valore di soglia oppure superiore. Nel primo caso la normativa antisismica è sufficiente nel considerare i possibili effetti di amplificazione topografica/litologica del sito, consentendo l'applicazione dello spettro previsto dalla normativa (classe di pericolosità H1); viceversa la normativa è insufficiente e devono essere effettuate analisi più approfondite (3° livello) in fase di progettazione strutturale (classe di pericolosità H2).

Per il Comune di Codogno i valori di Fa di soglia (stabiliti con D.G.R. 8/7374/2008), riferiti all'intervallo 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s per le diverse categorie di suolo soggette ad amplificazioni litologiche (B, C, D e E), sono i seguenti:

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.1-0.5 s				
Comune	Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Codogno	1.4	1.8	2.2	1.9

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.5-1.5 s				
Comune	Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Codogno	1.7	2.4	4.1	3.0

**Tabella 1a:** valori di soglia del fattore di amplificazione  $F_a$  per il comune di Codogno.

I due intervalli per i quali viene calcolato il valore di  $F_a$  derivano dal periodo proprio delle tipologie costruttive che costituiscono la maggior parte del patrimonio edilizio: in particolare l'intervallo tra 0.1-0.5 s si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e rigide (massimo 5 piani), mentre l'intervallo 0.5-1.5 s si riferisce a strutture più alte e più flessibili (edifici con più di 5 piani).

### **AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA**

Lo scenario della zona di scarpata (Z3a) è caratterizzato da una irregolarità morfologica con fronti di altezza ( $H$ ) uguale o superiore a 10 m ed inclinazione ( $\alpha$ ) del fronte principale uguale o superiore a  $10^\circ$ . In figura 1 si riportano i criteri di riconoscimento che consentono di individuare la relativa classe di riferimento.

Sulla base delle caratteristiche geometriche della scarpata morfologica in esame, la classe di appartenenza risulta essere la n. 1, caratterizzata da un **fattore di amplificazione  $F_a = 1.1$**  ed una zona di influenza A dei fenomeni di amplificazione sismica pari all'altezza della scarpata.



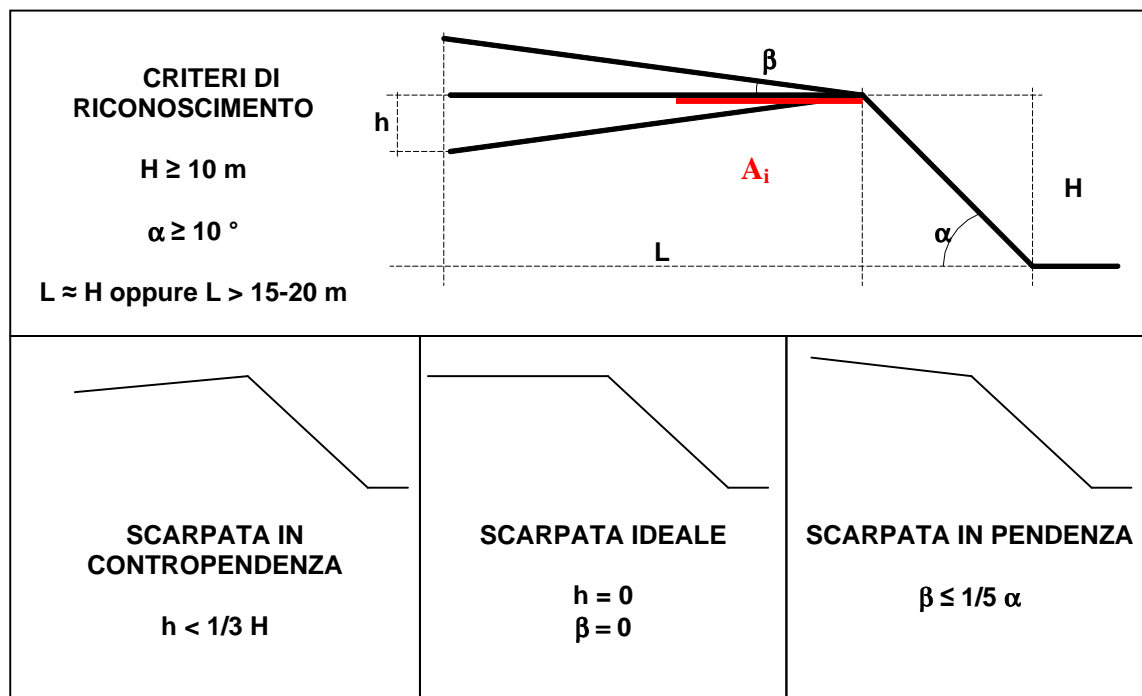


Figura 1a: criteri geometrici di riconoscimento per le scarpate.

Classe di appartenenza	Classe altimetrica	Classe di inclinazione	Valore di Fa	Area di influenza
A	$10 \text{ m} \leq H \leq 20 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	1.1	$A_i = H$
B	$20 \text{ m} < H \leq 40 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	1.2	$A_i = \frac{3}{4} H$
C	$H > 40 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$	1.1	$A_i = \frac{2}{3} H$
		$20^\circ < \alpha \leq 40^\circ$	1.2	
		$40^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	1.3	
		$60^\circ < \alpha \leq 70^\circ$	1.2	
		$\alpha > 70^\circ$	1.1	

Tabella 2a: Classi di appartenenza per amplificazione sismiche di tipo topografico.

### **AMPLIFICAZIONE LITOLOGICA**

Lo scenario Z4a identifica la possibilità che si verifichino effetti di amplificazione sismica legati alle caratteristiche lito-stratigrafiche e meccaniche dei terreni che costituiscono il sottosuolo (amplificazione di tipo litologico).

Per effettuare l'analisi di 2° livello con uno scenario Z4a è necessaria la conoscenza dei seguenti parametri:

- litologia prevalente dei materiali presenti nel sito;
- stratigrafia del sito;
- andamento delle Vs con la profondità e spessore e velocità di ciascuno strato.

Tali parametri possono essere ricavati con metodi differenti, ciascuno contraddistinto da un diverso grado di attendibilità, così come riportato nella tabella seguente.

<i><b>Dati</b></i>	<i><b>Attendibilità</b></i>	<i><b>Tipologia</b></i>
<b>Litologici</b>	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Alta	Da prove di laboratorio e da prove in sito
<b>Stratigrafici (spessori)</b>	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette (penetrometriche e/o geofisiche)
	Alta	Da indagini dirette (sondaggi)
<b>Geofisici (Vs)</b>	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette e relazioni empiriche
	Alta	Da prove dirette (sismica in foro o sismica superficiale)

***Tabella 3a: Livelli di attendibilità per la stima del rischio sismico e delle amplificazioni di sito.***

Al fine di valutare le possibili influenze sulla pericolosità sismica di base dovute alle proprietà litotecniche dei terreni che costituiscono il territorio comunale è stata eseguita un'apposita campagna di indagini geofisiche con la metodologia MASW al fine di ricostruire il modello sismico monodimensionale (Vs-z); per i particolari relativi alla strumentazione utilizzata ed

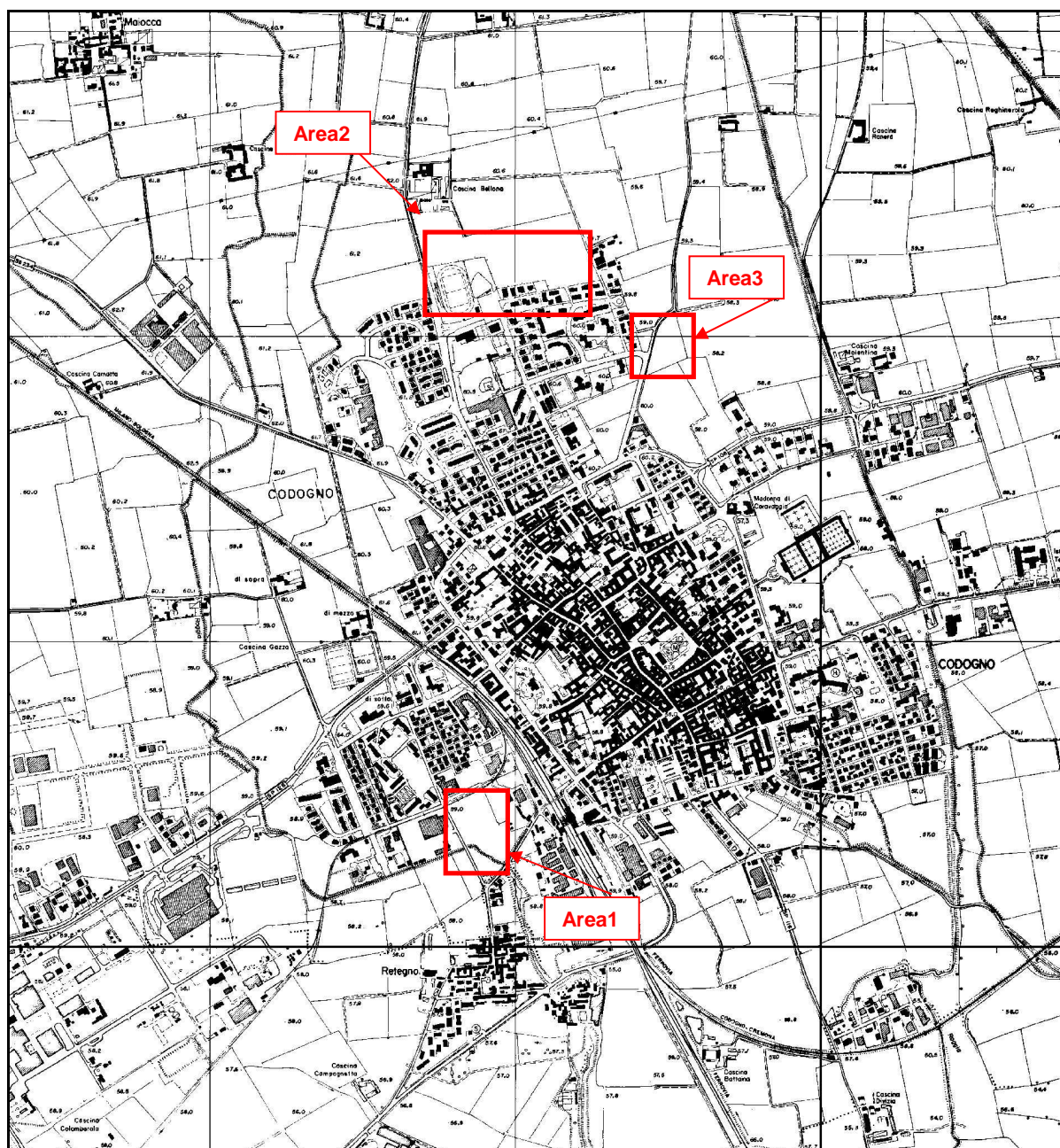
all’elaborazione delle prove si rimanda all’allegato 2 “Indagini geofisiche con la metodologia MASW”.

In figura 2a si riporta, sulla Carta Tecnica Regionale (volo 1994), l’ubicazione delle tre aree per le quali è stata effettuata l’analisi dei fattori di amplificazione sismica: all’interno di queste aree, così come indicato dal documento di piano del PGT, si prevede la localizzazione di edifici con servizi di interesse pubblico (edifici strategici e rilevanti - elenco tipologico di cui al d.d.u.o. n.19904/03).

	Livelli di approfondimento e fasi di applicazione		
	1° Livello Fase pianificatoria	2° Livello Fase pianificatoria	3° Livello Fase progettuale
<b>Zona sismica 2-3</b>	obbligatorio	Nelle zone PSL Z3 e Z4 se interferenti con urbanizzato o urbanizzabile, ad esclusione delle aree già inedificabili	- Nelle aree indagate con il 2° livello quando Fa calcolato > valore soglia comunale - Nelle zone PSL Z1, Z2 e Z5
<b>Zona sismica 4</b>	obbligatorio	Nelle zone PSL Z3 e Z4 solo per edifici strategici e rilevanti (elenco tipologico di cui al d.d.u.o. n.19904/03)	-Nelle aree indagate con il 2° livello quando Fa calcolato > valore soglia comunale; - Nelle zone PSL Z1, Z2 e Z5 per edifici strategici e rilevanti

PSL = pericolosità sismica locale.

Tabella 3a: livelli di approfondimento.



*Figura 2a: Ubicazione delle aree all'interno delle quali sono state effettuate le prove sismiche.*

Di seguito si riportano i modelli di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità ottenuti dall'esecuzione dei profili sismici:

<b>Area 1</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0,71	<b>204,86</b>	0,71
2	0,89	<b>219,51</b>	1,59
3	1,11	<b>182,00</b>	2,70
4	1,38	<b>156,58</b>	4,08
5	1,73	<b>212,88</b>	5,81
6	2,16	<b>250,91</b>	7,97
7	2,70	<b>242,05</b>	10,68
8	3,38	<b>288,09</b>	14,05
9	4,22	<b>370,05</b>	18,27
10	5,28	<b>377,30</b>	23,55
11	6,60	<b>317,73</b>	30,15
12	7,54	<b>570,16</b>	37,68

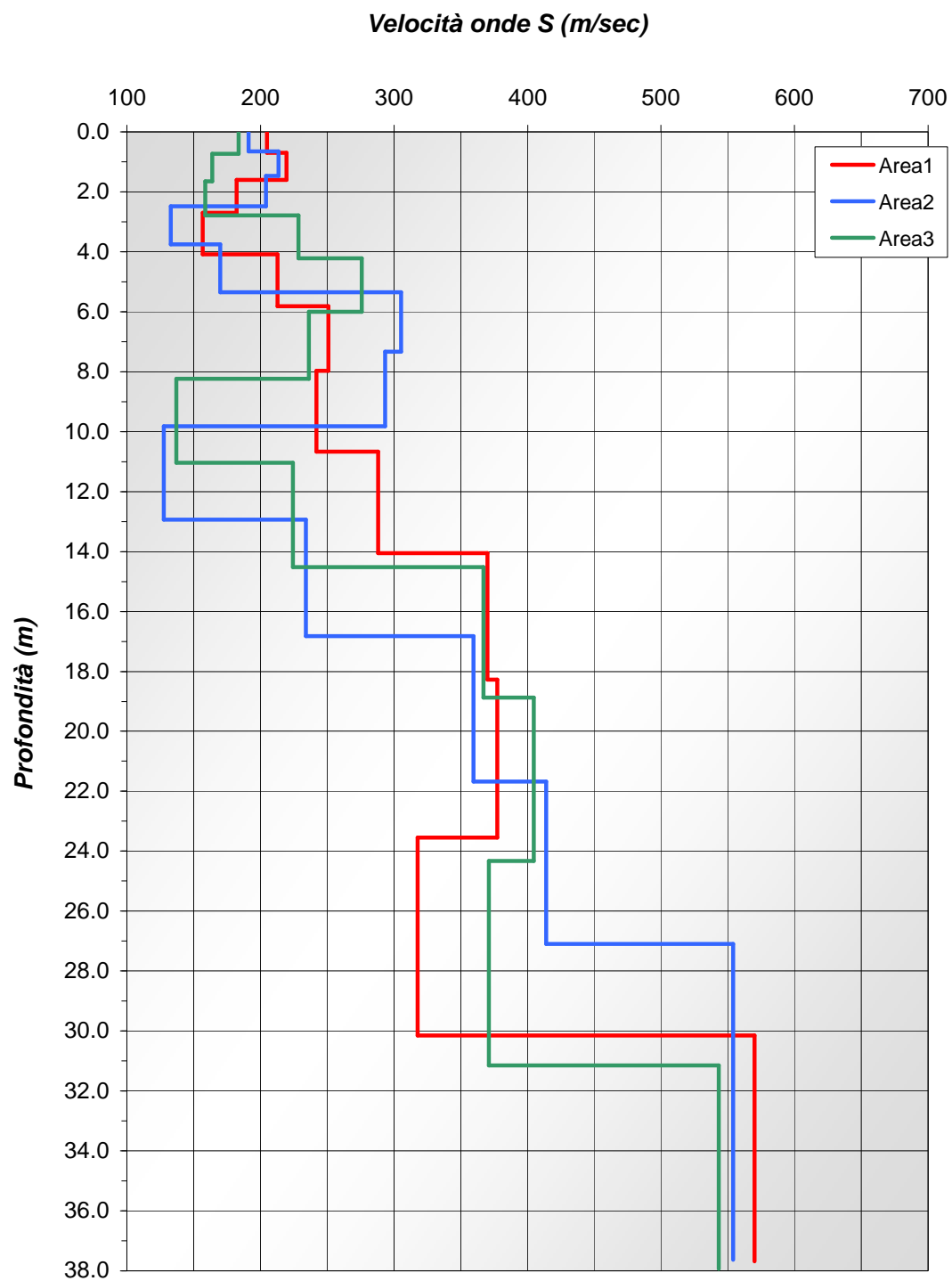
**Tabella 4a:** AREA 1 -modello sismico monodimensionale.

<b>Area 2</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0,65	<b>191,22</b>	0,65
2	0,82	<b>213,51</b>	1,47
3	1,02	<b>204,10</b>	2,49
4	1,27	<b>132,74</b>	3,76
5	1,59	<b>169,78</b>	5,35
6	1,99	<b>305,26</b>	7,34
7	2,49	<b>293,58</b>	9,83
8	3,11	<b>127,58</b>	12,94
9	3,89	<b>233,87</b>	16,82
10	4,86	<b>359,31</b>	21,68
11	5,42	<b>413,85</b>	27,10
12	10,53	<b>553,86</b>	37,63

**Tabella 5a:** AREA 2 -modello sismico monodimensionale.

<b>Area 3</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0,73	<b>183,67</b>	0,73
2	0,92	<b>163,67</b>	1,65
3	1,14	<b>158,73</b>	2,79
4	1,43	<b>228,46</b>	4,22
5	1,79	<b>275,95</b>	6,01
6	2,23	<b>236,31</b>	8,24
7	2,79	<b>136,80</b>	11,03
8	3,49	<b>224,45</b>	14,52
9	4,36	<b>366,80</b>	18,88
10	5,45	<b>404,64</b>	24,34
11	6,82	<b>371,20</b>	31,15
12	6,79	<b>543,23</b>	37,94

**Tabella 6a:** AREA 3 -modello sismico monodimensionale.



*Figura 3a: andamento Vs-profondità per le aree analizzate.*

### **Stima degli effetti litologici**

Secondo la procedura prevista per il 2° livello di approfondimento, il primo passo consiste nell'individuare la scheda litologica di riferimento (tra quelle presentate nella DGR 7374/2008) che meglio approssima l'andamento del profilo Vs-z proprio del sito in esame (andamento Vs-z posto all'interno del "campo di validità" della scheda<sup>2</sup>).

All'interno della scheda stabilita, in funzione della profondità e della velocità delle onde S dello strato superficiale, è stata scelta la curva più appropriata per la valutazione del valore di Fa, calcolando successivamente il periodo proprio del sito con la seguente espressione:

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

dove  $h_i$  e  $V_{s_i}$  sono lo spessore e la velocità dello strato i-esimo del modello fino al bedrock sismico (strato con  $V_s > 800$  m/s).

Non essendo stato rilevato direttamente, il bedrock sismico è stato ipotizzato assegnando un gradiente di tipo logaritmico delle velocità delle onde S con la profondità, desunto dai dati misurati nella prova.

In questo modo, utilizzando l'equazione propria della curva stabilita, è stato possibile determinare il fattore di amplificazione Fa.

Sulla base dei modelli monodimensionali ricostruiti, si ottengono i seguenti risultati:

---

<sup>2</sup> Allo stato attuale sussistono dei limiti di nell'applicazione dell'analisi di 2° livello derivante dalla messa a punto da parte della Regione Lombardia di una metodologia basata su schede di riferimento ricavate da un numero limitato di dati geofisici (andamento delle Vs con la profondità). Tale fattore può comportare che il profilo Vs-z relativo alla litologia che caratterizza il sito sia differente da quello previsto dalla stessa litologia nella scheda di riferimento. La procedura prevede che, nel caso in cui l'andamento delle Vs con la profondità non ricada nel campo di validità della scheda litologica corrispondente, sia utilizzata la scheda che presenta l'andamento delle Vs più simile a quello riscontrato nell'indagine.



Area	Curva	Scheda	Periodo T <sub>0</sub>	Fa (0.1-0.5)	Fa (0.5-1.5)
1	1	Limoso-sabbiosa 2	0.45 s	2.36	1.43
2	1	Limoso-sabbiosa 2	0.46 s	2.35	1.44
3	1	Limoso-sabbiosa 2	0.47 s	2.35	1.45

**Tabella 7a** : valutazione dei fattori di amplificazione per le aree indagate.

### Analisi dei dati e considerazioni

I valori di Fa proprio del sito sono stati confrontati con il valore Fa di soglia (tabella 1a), differente per le diverse categorie di suolo.

Le categorie di suolo di fondazione, secondo l'OPCM 3274 e il DM 14.01.2008, risultano così identificate:

Categoria	Descrizione del profilo stratigrafico	Parametri		
		V <sub>s30</sub> (m/s)	N <sub>SPT</sub>	C <sub>u</sub> (kPa)
A	<u>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</u> , caratterizzati da valori di V <sub>s30</sub> superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m	> 800	-	-
B	<u>Rocce tenere e da grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</u> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	360-800	>50	>250
C	<u>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</u> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	180-360	15-50	70-250
D	<u>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</u> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	<180	<15	<70
E	<u>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</u> , posti sul substrato di riferimento (con Vs>800 m/s).			

in cui  $V_{s30}$  è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio, calcolata con la seguente espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n H_i / V_i}$$

dove  $H_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio  $\gamma < 10^{-6}$ ) dello strato  $i$ -esimo, per un totale di  $N$  strati presenti nei 30 m più superficiali.

A partire dai profili  $V_s$ -profondità ricostruiti per le aree campione è stato possibile calcolare, con la formula sopra riportata, il valore di  $V_{s30}$  (i 30 m di profondità sono stati misurati convenzionalmente dal piano campagna), ottenendo i seguenti risultati:

Area	$V_{s30}$ [m/s]	Categoria di suolo
1	278.51	C
2	252.04	C
3	259.64	C

e confrontando i valori del fattore di amplificazione del sito con quelli di soglia risulta che

$\mathbf{Fa_{sito} > Fa_{soglia}}$ per $0.1 < T_o < 0.5$ s $\mathbf{Fa_{sito} < Fa_{soglia}}$ per $0.5 < T_o < 1.5$ s
--

Ciò implica che la normativa antisismica (D.M. 14.01.2008) non considera in modo esaustivo i possibili effetti di amplificazione litologica, rendendo insufficiente l'applicazione dello spettro previsto dalla normativa per edifici con periodo proprio compreso tra 0.1 e 0.5 s.

Considerata la sostanziale uniformità sismica che caratterizzata il territorio è possibile ipotizzare che l'intero territorio comunale sia soggetto a fenomeni di amplificazione sismica

locale tali da produrre valori di  $F_a$  di sito superiori a quello di soglia nell'intervallo tra 0.1 e 0.5 s.

Tale considerazione supporta ulteriormente la necessità (già imposta dalla D.G.R. 8/7374/2008) che, per qualsiasi trasformazione d'uso del suolo legata alla realizzazione di edifici strategici e rilevanti, il cui periodo proprio sia contenuto nell'intervallo tra 0.1 e 0.5 s, venga preventivamente valutata la pericolosità sismica locale attraverso il 2° livello di approfondimento (Allegato 5 della D.G.R. 8/7374); qualora venisse confermato il superamento del  $F_a$  di soglia, si dovrà procedere alla definizione dell'azione sismica di progetto attraverso l'analisi di 3° livello, in quanto la condizione  $F_{a_{\text{sito}}} < F_{a_{\text{soglia}}}$  non viene raggiunta nemmeno utilizzando la categoria di suolo successiva (suolo di tipo D), così come previsto dalla DGR 8/7374.

## **8.     ALLEGATO 2: INDAGINE GEOFISICA CON LA METODOLOGIA           MASW**

# Signa srl

## INDAGINI GEOFISICHE

**Committente:** dott geol. Daguati Marco.

**Località:** Comune di Codogno (Lo).

**Indagine:** Indagini geofisiche con la metodologia MASW.

## RAPPORTO TECNICO

Codice documento: 12-10			Numero pagine: 18		
A	07/04/10	EMISSIONE	DG	DG	DG
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato

**SIGNA srl**  
Via A. Diaz, 22 – 26845 Codogno (Lo)  
Tel/Fax 035-806318 – Cell. 347-1445663  
Cod.Fisc. e P.IVA 05388280967  
[www.signasrl.it](http://www.signasrl.it); e-mail: [info@signasrl.it](mailto:info@signasrl.it)



SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

## INDICE GENERALE

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	3
2. INDAGINE GEOFISICA MASW: DESCRIZIONE DEL METODO E DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	5
3. ELABORAZIONE DATI.....	11

### ALLEGATI

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

## 1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione riporta le elaborazioni ed i risultati ottenuti dall'esecuzione di una campagna di indagini geofisiche consistita nella realizzazione di n. 3 profili sismici con la metodologia MASW effettuati in corrispondenza di altrettante aree situate nel territorio comunale di Codogno (Lo).

La campagna di indagini è stata eseguita su incarico del dott. geol. Marco Dagupati nell'ambito dell'adeguamento dello studio geologico comunale alla nuova Legge per il Governo del Territorio (D.G.R. n. 8/7374 recante "*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. n. 11 marzo 2005 n. 12*").

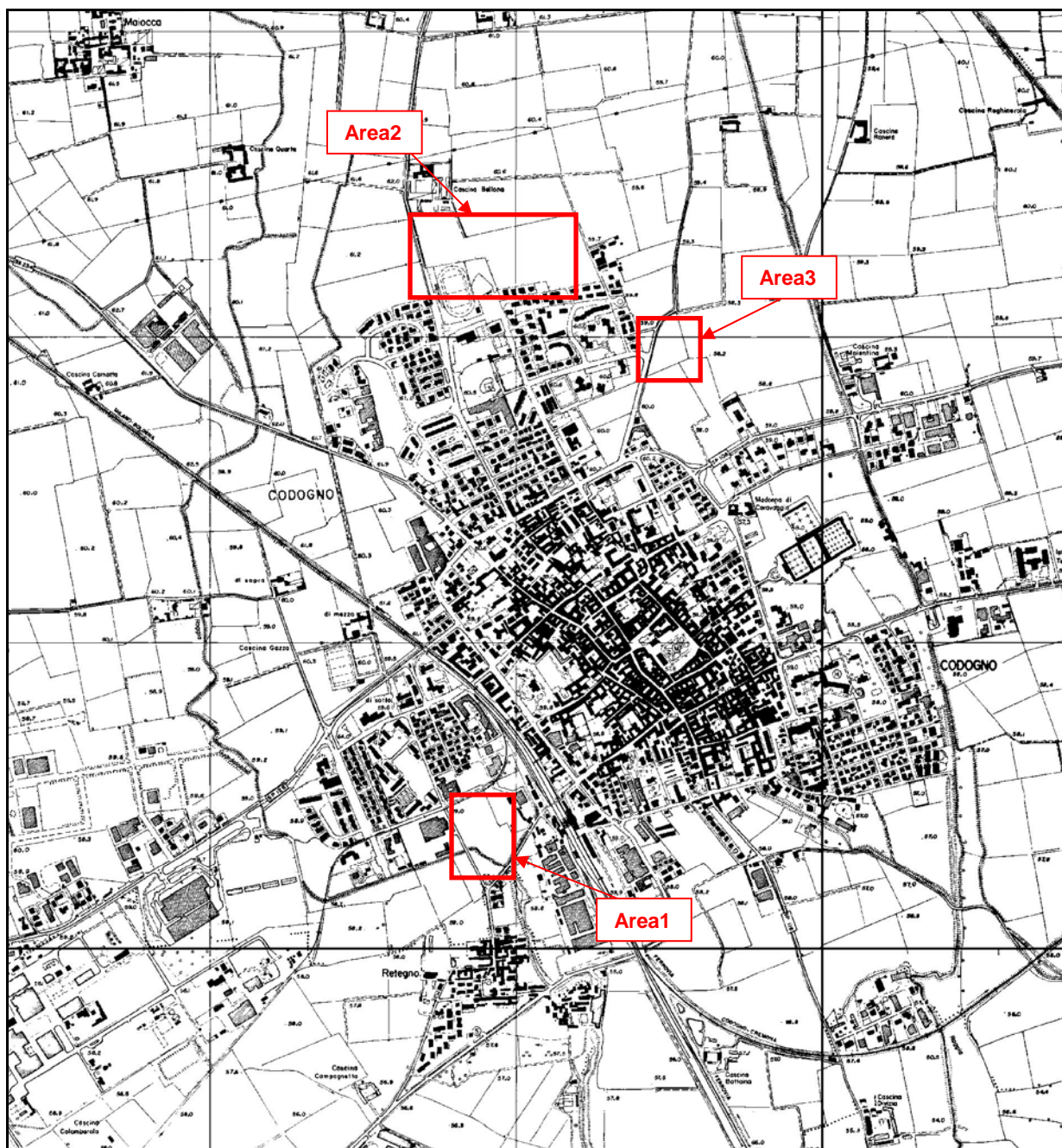
Scopo delle indagini è quello di ricostruire l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità ( $V_s$ -z): i modelli sismici monodimensionali costituiscono infatti la base di partenza per la valutazione degli effetti di amplificazione sismica locale.

Le particolari condizioni sito specifiche possono influenzare, in occasione di eventi sismici, la pericolosità sismica di base: tali effetti devono essere presi in considerazione nella valutazione generale della pericolosità sismica di un'area, soprattutto in fase pianificatoria.

Nei capitoli successivi verranno descritte le modalità d'esecuzione delle misure sperimentali e l'interpretazione geofisica delle stesse.

In figura 1 si riporta l'ubicazione delle aree all'interno delle quali sono state effettuate le prove sismiche tipo MASW (base cartografica: Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000).

Data	07/04/10
N. Commessa	12-10
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche



**Figura 1:** ubicazione delle aree all'interno delle quali sono state effettuate le prove sismiche.



SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

## 2. INDAGINE GEOFISICA MASW: DESCRIZIONE DEL METODO E DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La prova MASW, messa a punto nel 1999 da ricercatori del Kansas Geological Survey (Park et al., 1999) permette di determinare in modo dettagliato l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio (o onde S) in funzione della profondità attraverso lo studio della propagazione delle onde superficiali o di Rayleigh.

Il metodo di indagine MASW si distingue in “attivo” e “passivo” (Zywicki, 1999; Park e Miller, 2006; Roma, 2006):

1) Nel “**metodo attivo**” le onde superficiali sono prodotte da una sorgente impulsiva disposta a piano campagna e vengono registrate da uno stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza (distanza intergeofonica).

2) Nel “**metodo passivo**” lo stendimento presenta le stesse caratteristiche geometriche del metodo attivo ma i ricevitori non registrano le onde superficiali prodotte da una sorgente impulsiva, bensì il rumore di fondo (detto anche “microtremori”) prodotto da sorgenti naturali (vento) e antropiche (traffico, attività industriali).

Le due tecniche indagano bande spettrali differenti: mentre il metodo attivo consente di ottenere una curva di dispersione nel range di frequenza compreso tra 10 e 40 Hz e fornisce informazioni sulla parte più superficiale di sottosuolo (fino a circa 20-30 m di profondità in funzione della rigidità del suolo), il metodo passivo consente di determinare una curva di dispersione nella banda di frequenza tra 4 e 20 Hz e fornisce informazioni sugli strati più profondi (generalmente al di sotto dei 20-30 m).

La combinazione delle due tecniche consente di ottenere uno spettro completo nella banda di frequenza comprese tra 4 e 40 Hz e permette una dettagliata ricostruzione dell'andamento della velocità delle onde di taglio fino a circa 30-40 m di profondità (sempre in funzione della rigidità degli strati).

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

L'analisi delle onde superficiali è stata eseguita utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione disposta sul terreno secondo un array lineare da 24 geofoni con spaziatura pari a 2.0 m (configurazione geometrica uguale per tutte e tre le prove MASW effettuate).

Per ottenere una buona risoluzione in termini di frequenza, oltre ad utilizzare geofoni da 4.5 Hz, è stato utilizzato un sismografo a 24 bit.

Nell'esecuzione della prova MASW attiva è stato utilizzato come sistema di energizzazione una mazza di 8 Kg battente su piattello metallico. Per aumentare il rapporto segnale/rumore si è proceduto alla somma di più energizzazioni (processo di *stacking*).

La sorgente è stata posta ad una distanza di 6, 10 e 14 m dal primo geofono (*Optimum Field Parameters of an MASW Survey*", Park et al., 2005; Dal Moro, 2008).

Terminata l'indagine attiva, con la stessa configurazione geometrica si è passati alla registrazione dei microtremori (MASW passiva) acquisendo in totale 10 registrazioni di rumore, ciascuna della lunghezza di 30 s.

Di seguito si riassumono le principali caratteristiche della strumentazione utilizzata ed i criteri di acquisizione della prova MASW attiva e passiva:

n°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	sismografo GEOMETRICS "GEODE" a 24 bit
24	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
2	Cavi sismici	L = 120 m
1	Sorgente	Mazza battente su piattello metallico

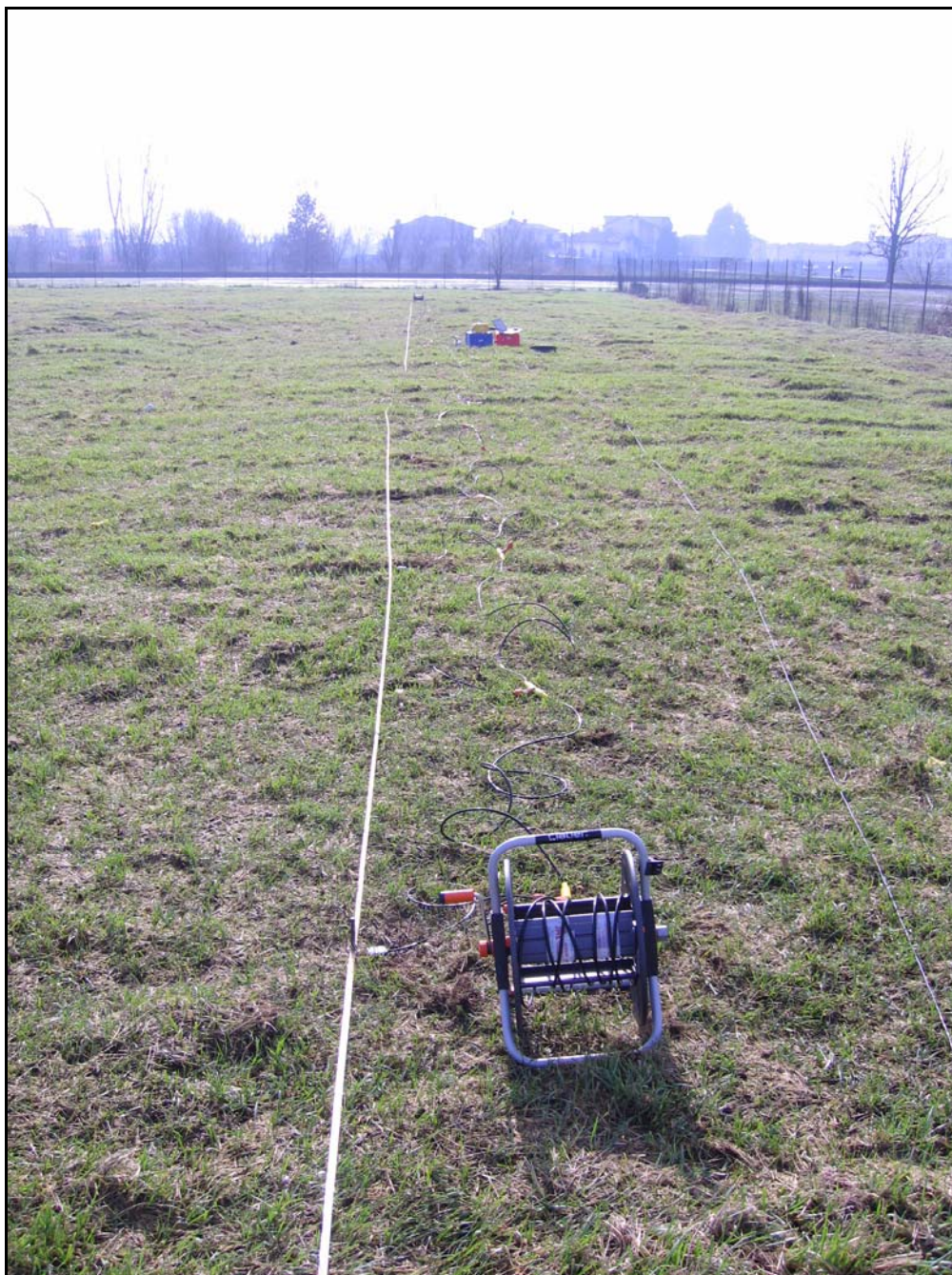
SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche



**Figura 2:** Strumentazione utilizzata per la prova MASW.

Riassunto modalità esecutive della prova MASW ATTIVA	
<i>Spaziatura tra i geofoni</i>	2.0 m
<i>Distanza sorgente 1° geofono</i>	6, 10 e 14 m
<i>Tempo di campionamento</i>	0.5 ms
<i>Tempo di registrazione</i>	1.6 s

Riassunto modalità esecutive della prova MASW PASSIVA	
<i>Spaziatura tra i geofoni</i>	2.0 m
<i>Tempo di campionamento</i>	4.0 ms
<i>Tempo di registrazione</i>	30.0 s
<i>Numero di registrazioni</i>	10



**Figura 3:** Area1 - vista dello stendimento MASW1.



SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche



**Figura 4:** Area 2- vista dello stendimento MASW2.



SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche



**Figura 5:** Area 3- vista dello stendimento MASW3.

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

### 3. ELABORAZIONE DATI

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (**SurfSeis 2.0** della Kansas University).

Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo.

L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "*phase velocity-frequency (c-f)*" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

Gli spettri bidimensionali ottenuti dalle registrazioni con il metodo attivo e con quello passivo, elaborati in fasi separate, vengono successivamente combinati in modo da ottenere uno spettro unico.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Inoltre, la combinazione dei due metodi MASW consente di individuare il "modo fondamentale" delle onde di superficie nel campo di frequenze compreso tra i 4 e i 40 Hz e di ottenere informazioni sia "superficiali" che "profonde".

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (vedi le curve di dispersione combinata presentate in allegato).

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo.

Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio Vs in funzione della profondità.

Dall'inversione delle curve di dispersione si ottengono i seguenti modelli medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, ciascuno rappresentativo dell'area investigata:

<b>Modello 1</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0.71	<b>204.86</b>	0.71
2	0.89	<b>219.51</b>	1.59
3	1.11	<b>182.00</b>	2.70
4	1.38	<b>156.58</b>	4.08
5	1.73	<b>212.88</b>	5.81
6	2.16	<b>250.91</b>	7.97
7	2.70	<b>242.05</b>	10.68
8	3.38	<b>288.09</b>	14.05
9	4.22	<b>370.05</b>	18.27
10	5.28	<b>377.30</b>	23.55
11	6.60	<b>317.73</b>	30.15
12	7.54	<b>570.16</b>	37.68

**Tabella 1:** modello sismico monodimensionale – MASW 1.

<b>Modello 2</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0.65	<b>191.22</b>	0.65
2	0.82	<b>213.51</b>	1.47
3	1.02	<b>204.10</b>	2.49
4	1.27	<b>132.74</b>	3.76
5	1.59	<b>169.78</b>	5.35
6	1.99	<b>305.26</b>	7.34
7	2.49	<b>293.58</b>	9.83
8	3.11	<b>127.58</b>	12.94
9	3.89	<b>233.87</b>	16.82
10	4.86	<b>359.31</b>	21.68
11	5.42	<b>413.85</b>	27.10
12	10.53	<b>553.86</b>	37.63

**Tabella 2:** modello sismico monodimensionale – MASW 2.

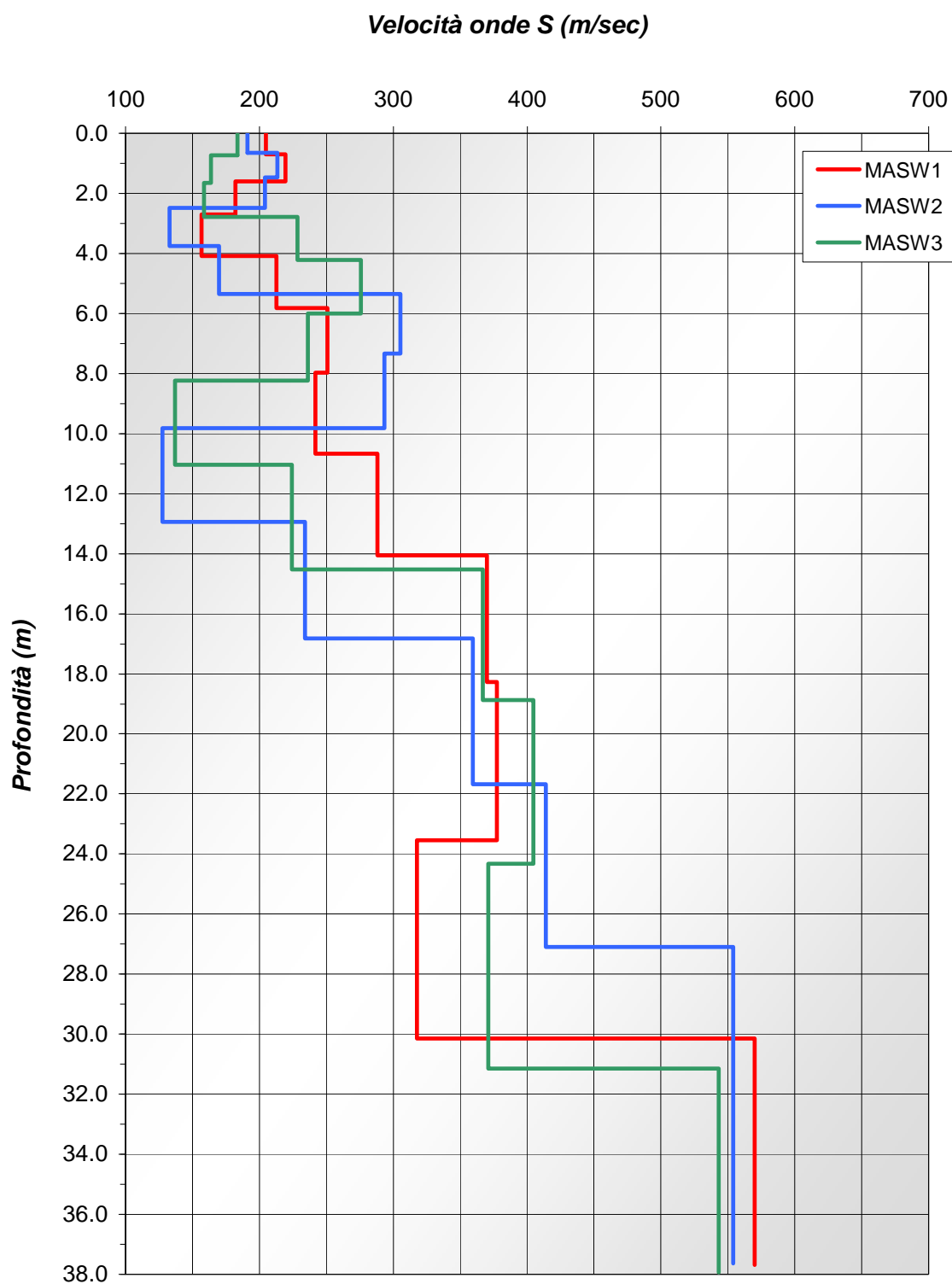


SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<b>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</b>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

<b>Modello 3</b>			
<b>Strato</b>	<b>Spessore [m]</b>	<b>Vs [m/s]</b>	<b>Profondità</b>
1	0.73	<b>183.67</b>	0.73
2	0.92	<b>163.67</b>	1.65
3	1.14	<b>158.73</b>	2.79
4	1.43	<b>228.46</b>	4.22
5	1.79	<b>275.95</b>	6.01
6	2.23	<b>236.31</b>	8.24
7	2.79	<b>136.80</b>	11.03
8	3.49	<b>224.45</b>	14.52
9	4.36	<b>366.80</b>	18.88
10	5.45	<b>404.64</b>	24.34
11	6.82	<b>371.20</b>	31.15
12	6.79	<b>543.23</b>	37.94

**Tabella 3:** modello sismico monodimensionale – MASW 3.

## Shear-Wave Velocity Profile from Surface waves inversion



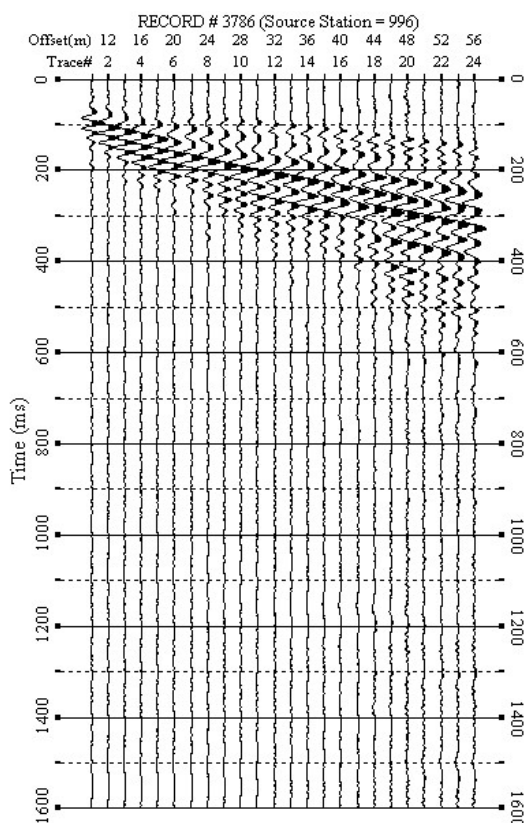
SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	07/04/10
	N. Commessa	12-10
	C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>	Revisione	A (DG)
	Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

## ALLEGATI

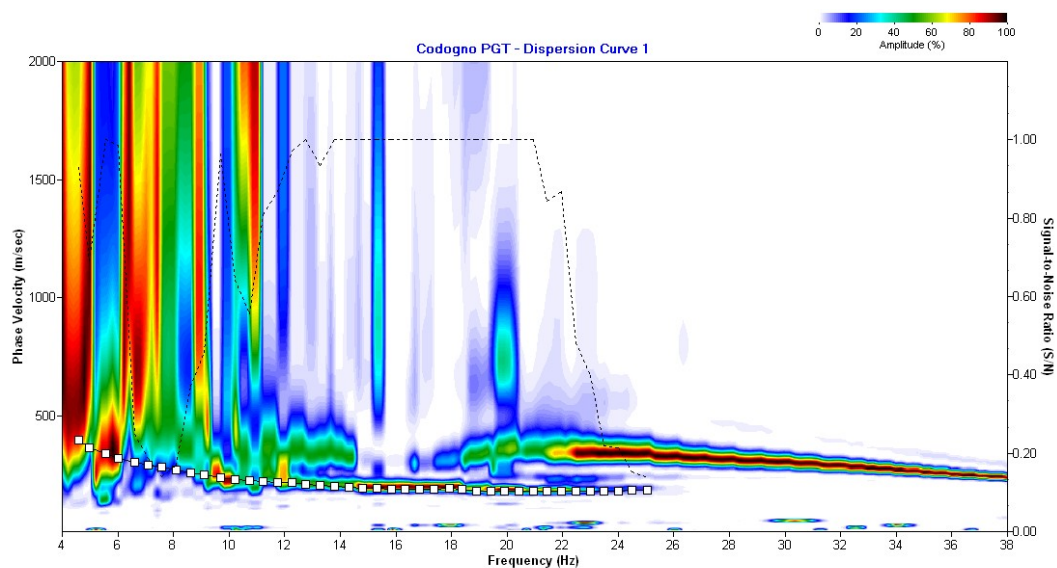
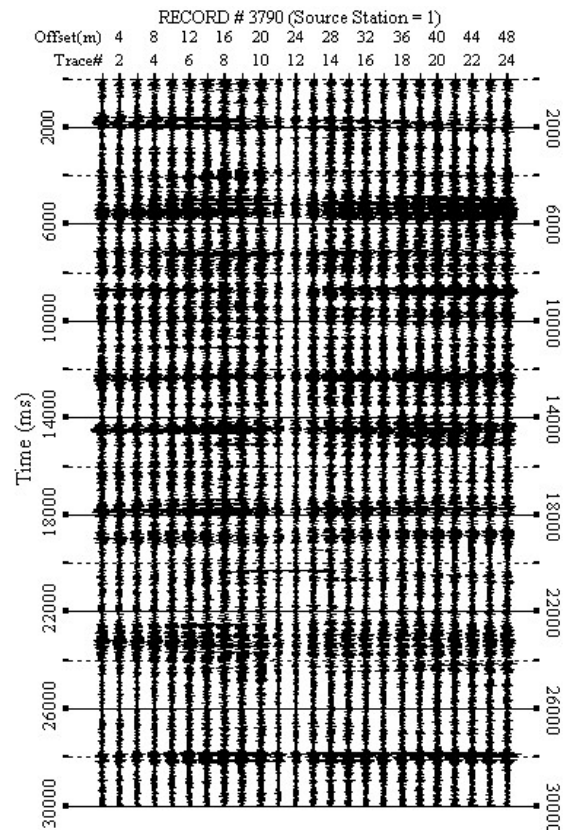
Data	07/04/10
N. Commessa	12-10
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

## MASW1

registrazione attiva



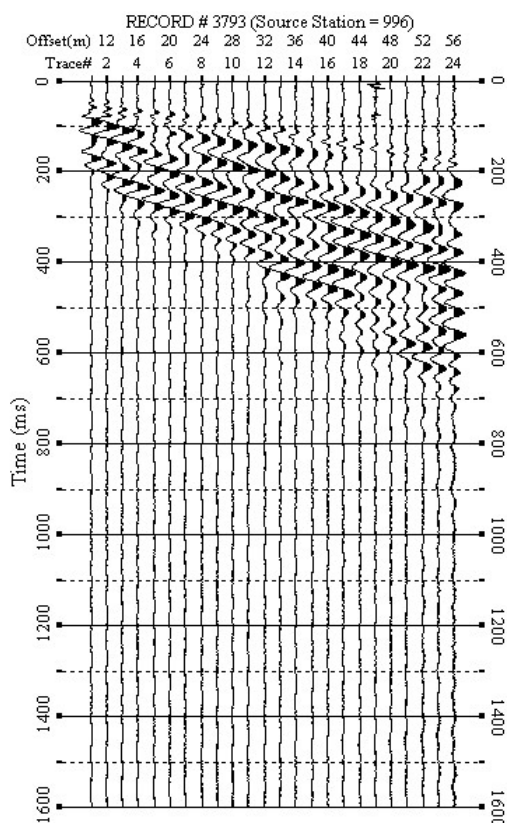
registrazione passiva



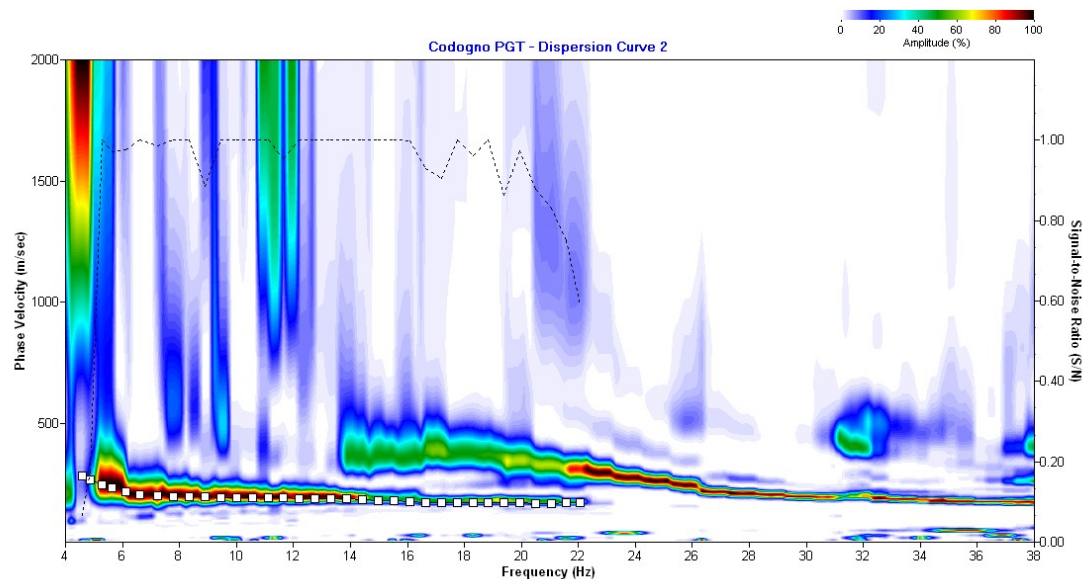
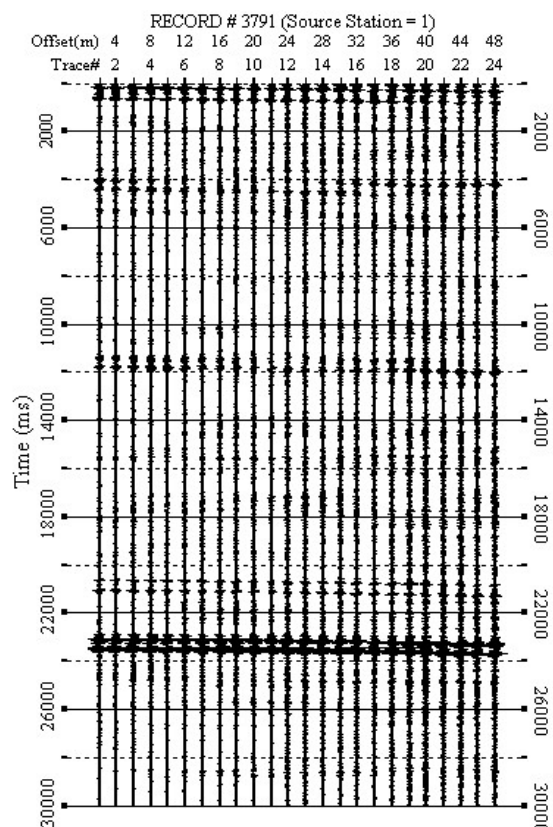
Data	07/04/10
N. Commessa	12-10
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

## MASW2

registrazione attiva



registrazione passiva

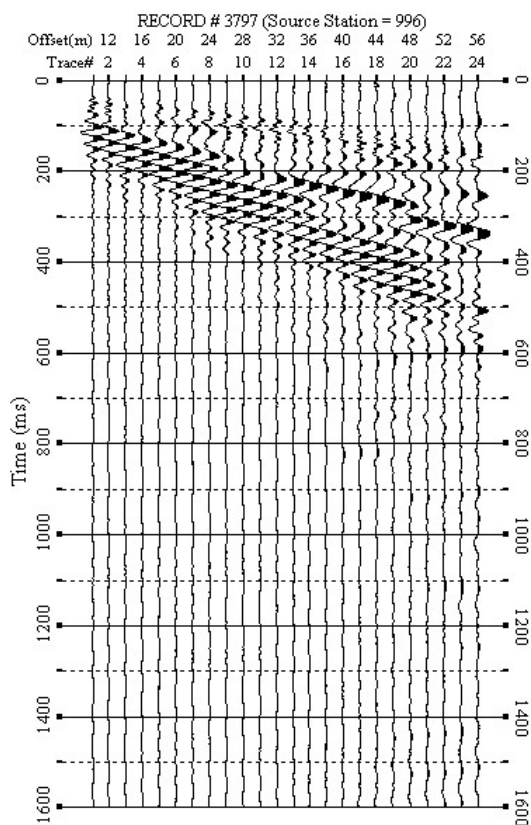




Data	07/04/10
N. Commessa	12-10
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	Codogno_PGT_ind_sismiche

## MASW3

registrazione attiva



registrazione passiva

