
Comune di FOMBIO
Provincia di LODI



**PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO:
STUDIO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E SISMICO**

Legge Regionale 11 marzo 2005, n. 12
D.G.R. 30 novembre 2011, n. 9/2616

OTTOBRE 2016

AGGIORNAMENTO DELLA COMPONENTE SISMICA



GEOLAMBDA
Engineering S.r.l.

Sede operativa: via A. Diaz, 22 – 26845 Codogno (LO)
tel. (+39) 0377.433021 - fax (+39) 0377.402035
www.geolambda.eu – pec: geolambda@geolambda.vipec.it
e-mail: marco.daguati@geolambda.it

1. PREMESSA

In seguito alla pubblicazione della D.g.r. n. X/2129 del 11 luglio 2014 “*Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia*”, il Comune di Fombio è passato **dalla zona sismica 4 (figura 1) alla zona sismica 3 (figura 2)**.

Ciò comporta, come disposto dalla citata Deliberazione, che i comuni riclassificati provvedano “*ad aggiornare la componente sismica degli studi geologici a supporto degli strumenti urbanistici, secondo le disposizioni di cui ai vigenti criteri attuativi dell’art.57 della l.r. 12/2005*”, definiti nella D.g.r. IX/2616/2011 “*Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio in attuazione dell’art.57 comma 1 della l.r. 11 marzo 2005 n.12*”.

Si rende quindi obbligatorio il 2° livello di approfondimento nelle zone PSL Z3 e Z4 (individuate attraverso il 1° livello) interferenti con urbanizzato e/o con le aree di espansione urbanistica (tabella 1).

Per quanto riguarda l’individuazione delle PSL Z3 e Z4, si rimanda al 1° livello di approfondimento sismico esteso a tutto il territorio comunale (inserito nello “Studio geologico, idrogeologico e sismico” del vigente PGT).

	<i>1° Livello Fase Pianificatoria</i>	<i>2° Livello Fase Pianificatoria</i>	<i>3° Livello Fase Progettuale</i>
<i>Zona sismica 2-3</i>	obbligatorio	<u>Nelle zone PSL Z3 e Z4 se interferenti con urbanizzato e urbanizzabile, ad esclusione delle aree già inedificabili</u>	Nelle aree indagate con il 2° livello quando Fa calcolato > valore soglia comunale Nelle zone PSL Z1 e Z2
<i>Zona sismica 4</i>	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 e Z2 per edifici strategici e rilevanti

Tabella 1: Livelli di approfondimento sismico e fasi di applicazione in funzione della zona sismica.

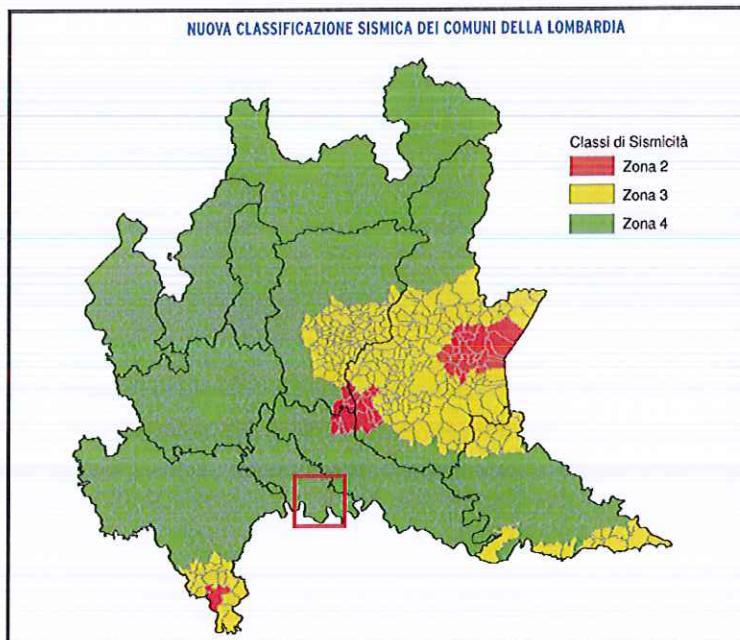


Figura 1: Classificazione sismica dei comuni della Lombardia in seguito all'Ordinanza 3274/2003 (D.G.R. n.7/14964 del 7 novembre 2003).

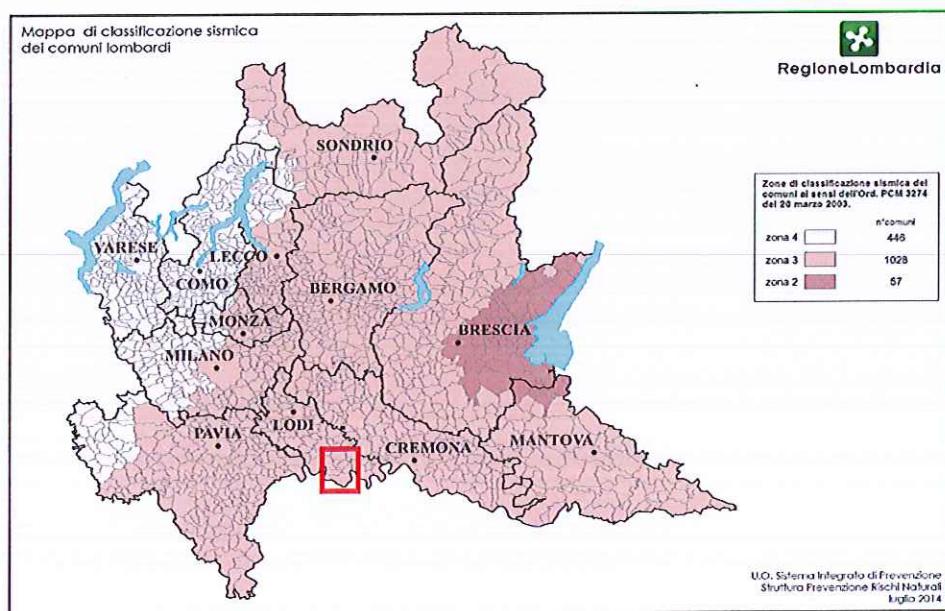


Figura 2: Classificazione sismica dei comuni della Lombardia (D.g.r. n. X/2129 del 11.07.2014).

Il passaggio dalla zona sismica 4 alla zona 3 deriva dal recepimento da parte della Regione Lombardia della O.P.C.M. 3519/2006 “*Criteri generali per l’identificazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*” con la quale viene fornita la Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento a scala nazionale ed i valori soglia per l’attribuzione delle zone sismiche (*tabella 2*).

Zona	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni [a _g]	Accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico [a _g]
1	0.25 < a _g ≤ 0.35 g	0.35 g
2	0.15 < a _g ≤ 0.25 g	0.25 g
3	0.05 < a _g ≤ 0.15 g	0.15 g
4	≤ 0.05 g	0.05 g

Tabella 2: Valori di accelerazione orizzontale per l'attribuzione della zona sismica (OPCM 3519/2006).

In figura 3 si riporta un estratto della mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (elaborazione INGV 2006 e 2008 - valore di accelerazione orizzontale con la probabilità del 10% di essere ecceduto almeno una volta nei prossimi 50 anni su suolo rigido – periodo di ritorno di 475 anni) centrato sul territorio di Fombio, da cui si ricava che l'accelerazione orizzontale massima attesa su suolo rigido è contenuta nell'intervallo tra 0.075g e 0.100 g, ovvero superiore alla soglia della zona 4 (la mappa di pericolosità sismica costituisce il riferimento di partenza per il calcolo dell'azione sismica del D.M. 14.01.2008 “Norme tecniche per le costruzioni”).

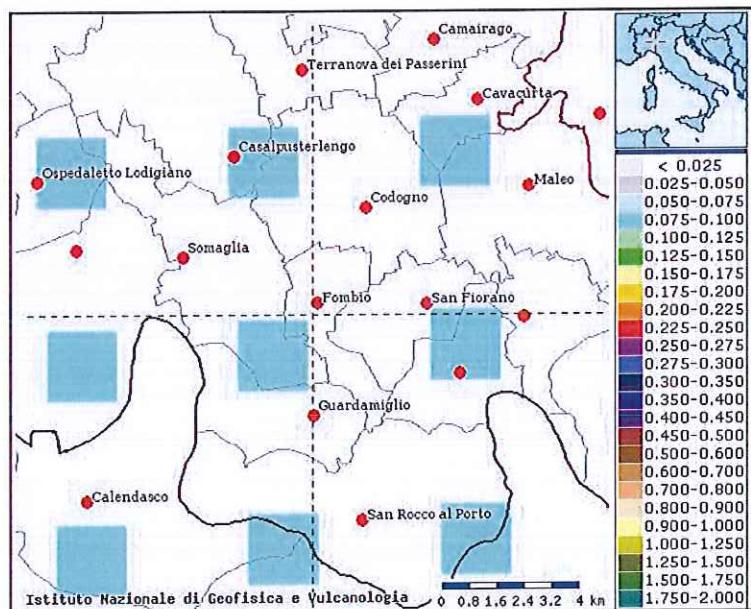


Figura 3: Mappa della pericolosità sismica relativa all'area di Fombio.

L'aggiornamento della componente sismica dello studio geologico a supporto del PGT consente di dotare il Comune di Fombio di uno strumento aggiornato di previsione degli **effetti locali del suolo in caso di sisma**, caratterizzando in modo quantitativo gli effetti di modifica della pericolosità sismica di base dovuta alle caratteristiche litologiche e sismiche dei terreni che costituiscono il territorio in esame.

Ciò permette di valutare l'adeguatezza dell'approccio semplificato previsto dalla normativa antisismica nazionale nel considerare gli effetti locali nella definizione dell'azione sismica (Cap. 3.2.2 *Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche* – D.M. 14.01.2008).

2. PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE PER IL TERRITORIO DI FOMBIO

Dalla sovrapposizione tra i diversi geo-tematismi riportati nello studio geologico del PGT è stato effettuata l'analisi sismica di 1° livello (tabella 1) e predisposta la Carta della Pericolosità sismica Locale in scala 1:10.000 (*figura 4*), alla quale si rimanda per ogni dettaglio. Nella predetta carta vengono identificate le aree suscettibili di modifica del moto sismico, riconducibile a caratteristiche geologiche, geomorfologiche e geotecniche (scenario di pericolosità sismica locale): tutto il territorio comunale è caratterizzato da un generale scenario di pericolosità sismica identificato come Z3a, i cui potenziali effetti sono legati ad amplificazioni di natura litologica e geometrica (*tabella 3*).

Nella Carta di P.S.L. è stato inoltre evidenziato l'orlo di terrazzo fluviale di altezza prossima a 10 m sviluppato al margine meridionale del terrazzo pleistocenico (Livello Fondamentale della Pianura), a cui è stato associato lo scenario di pericolosità sismica locale Z3a (amplificazione topografica).

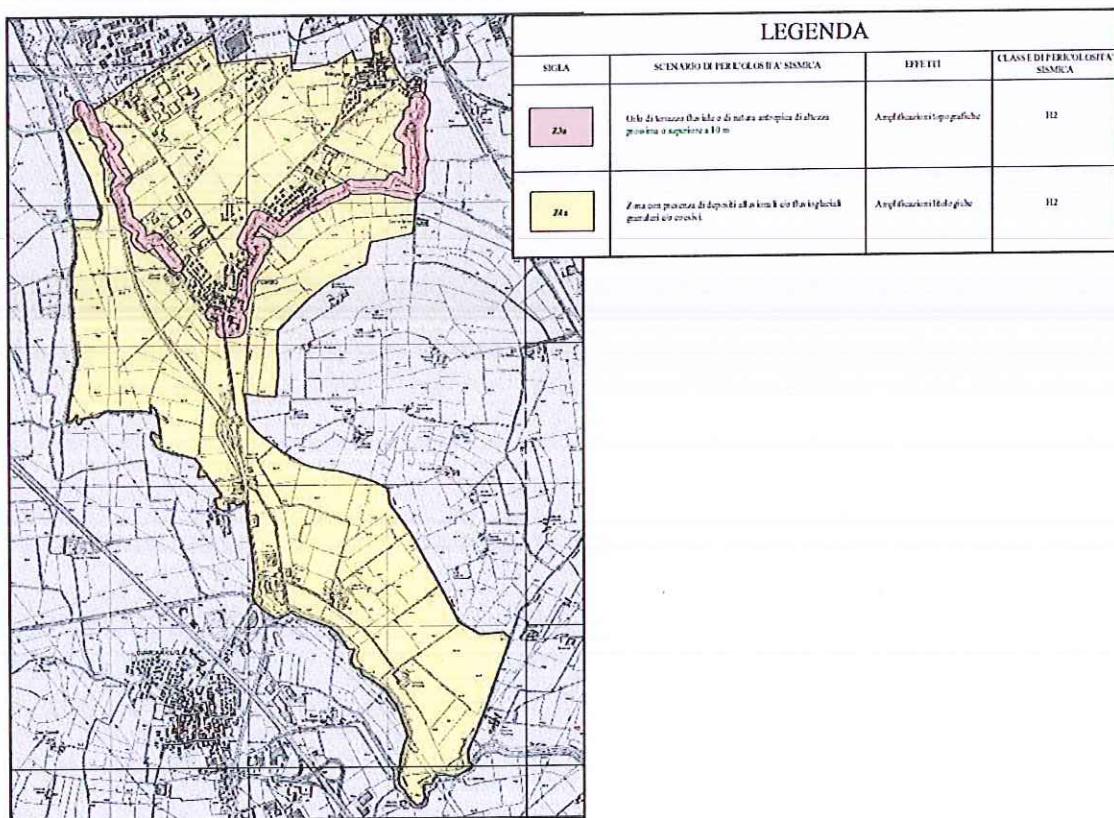


Figura 4: Carta della pericolosità sismica locale allegata allo studio geologico comunale (2008)

Sigla	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi	Instabilità
Z1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti	
Z1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana	
Z2a	Zone con terreni di fondazione saturi particolarmente scadenti (riporti poco addensati, depositi altamente compressibili, ecc.)	Cedimenti
Z2b	Zone con depositi granulari fini saturi	Liquefazioni
Z3a	Zona di ciglio H > 10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica, ecc.)	Amplificazioni topografiche
Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite - arrotondate	
Z4a	Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali 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-coluviale	
Z5	Zona di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-mecaniche molto diverse	Comportamenti differenziali

Tabella 3: Scenari di Pericolosità Sismica Locale – Analisi sismica di 1° livello D.g.r. IX/2616/2011.

2.1 Analisi sismica di 2° livello

L’analisi sismica dl 2° livello prevista dalla D.g.r. IX/2616/2011 consiste nella caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi e si concretizza con una stima della risposta sismica dei terreni in termini di Fattore di amplificazione (Fa).

La valutazione del fattore Fa permette di “quantificare” l’effetto prodotto dalle caratteristiche stratigrafiche e/o morfologiche capaci di modificare l’intensità delle onde sismiche generate da un terremoto (pericolosità di base).

La procedura prevede il confronto tra il valore di Fa caratteristico dell’area ed il valore di Fa caratteristico del territorio comunale: quest’ultimo valore, detto di “soglia”, è contenuto in un apposito elenco redatto dalla Regione Lombardia.

Per il Comune di Fombio i valori di Fa di soglia, riferiti all’intervallo 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s per le diverse categorie di sottosuolo soggette ad amplificazioni litologiche (B, C, D e E), sono i seguenti:

Fa_Soglia				
Intervallo	Suolo B	Suolo C	Suolo D	Suolo E
0.1-0.5	1.4	1.8	2.2	1.9
0.5-1.5	1.7	2.4	4.1	3.0

Tabella 4: Valori di soglia del fattore di amplificazione per il comune di Fombio - Regione Lombardia.

I due intervalli per i quali viene calcolato il valore di Fa 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).

Il periodo proprio di un edificio può essere in prima analisi definito utilizzando la seguente l'espressione semplificata $T_0=C_1H^{3/4}$ dove H è l'altezza dell'edificio in metri dal piano fondazionale mentre C1 è un fattore che dipende dal tipo di struttura portante dell'edificio (D.M. 14.01.2008).

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 e inclinazione (α) del fronte principale uguale o superiore a 10°. In figura 5 si riportano i criteri di riconoscimento che consentono di individuare la relativa classe di riferimento.

Sulla base delle geometrie della scarpata morfologica in esame, la classe di appartenenza è la n. 1, caratterizzata da un **fattore di amplificazione Fa = 1.1** ed una zona di influenza A dei fenomeni di amplificazione sismica pari all'altezza della scarpata (tabella 5). Per tale condizione geometrica le NTC08 individuano una categoria topografica di tipo T2 caratterizzata da un coefficiente di amplificazione topografico $S_T=1.2$, ovvero superiore al valore di Fa definito. Per tale ragione, in caso di nuove costruzioni ubicate all'interno dello scenario di PSL Z3a, è possibile utilizzare il fattore di amplificazione topografico definito dalle NTC08, in quanto sufficiente nel considerare tali aspetti.

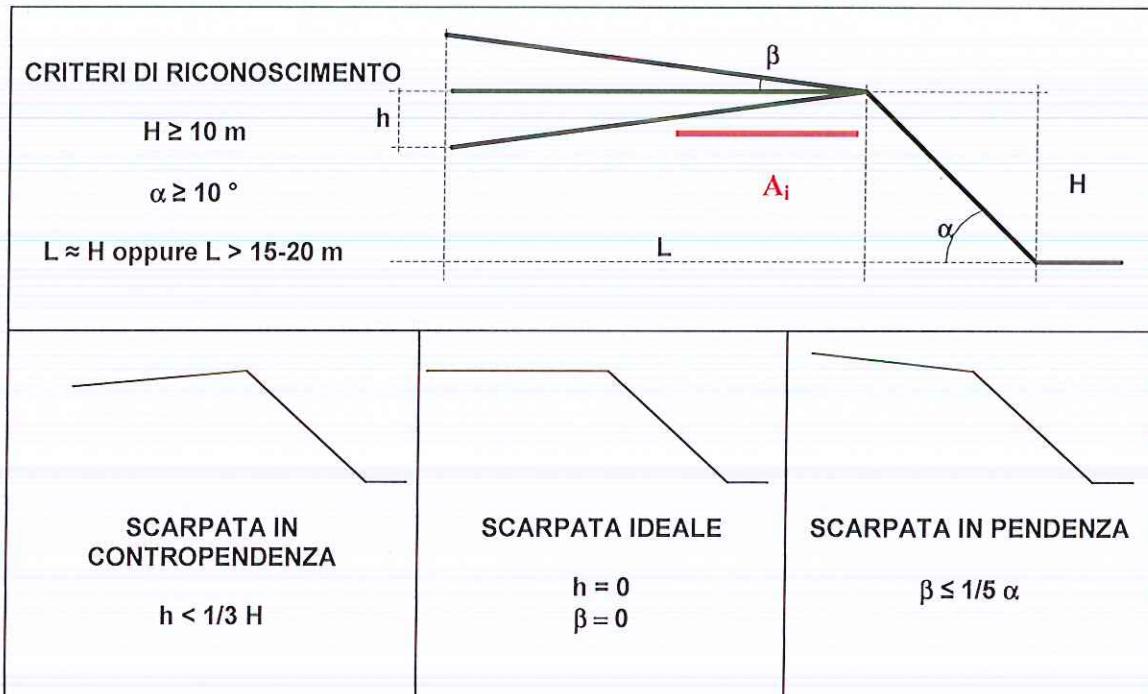


Figura 5: criteri geometrici di riconoscimento per le scarpate.

Classe di appartenenza	Classe altimetrica	Classe di inclinazione	Valore di F_a	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 5: Classi di appartenenza per amplificazione sismiche di tipo topografico.

AMPLIFICAZIONE LITOLOGICA

Lo scenario Z4a descrive la possibilità che si verifichino effetti di amplificazione sismica correlabili alle caratteristiche stratigrafiche e meccaniche dei terreni che costituiscono il substrato (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 posso essere ricavati con metodi differenti, ciascuno contraddistinto da un diverso grado di attendibilità, così come riportato nella tabella seguente.

<i>Dati</i>	<i>Attendibilità</i>	<i>Tipologia</i>
Litologici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Alta	Da prove di laboratorio e da prove in situ
Stratigrafici (spessori)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette (penetrometriche e/o geofisiche)
	Alta	Da indagini dirette (sondaggi)
Geofisici (Vs)	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 6: Livelli di attendibilità per la stima del rischio sismico e delle amplificazioni di sito.

La valutazione dei fattori di amplificazione è stata effettuata attraverso specifica campagna di indagini geofisiche per gli ambiti di trasformazione individuati nel DdP; l'ubicazione delle aree di indagine è mostrata in figura 6.

Per tali aree è stato ricostruito l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità (Vs-z – modello sismico monodimensionale) attraverso il quale sono state valutate le possibili modifiche della pericolosità sismica di base (accelerazione attesa su suolo rigido o suolo A) dovute alle proprietà dei terreni che costituiscono l'area stessa (fattori di amplificazione Fa).

In figura 7 si riportano i profili di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità ricostruiti per le aree indagate.

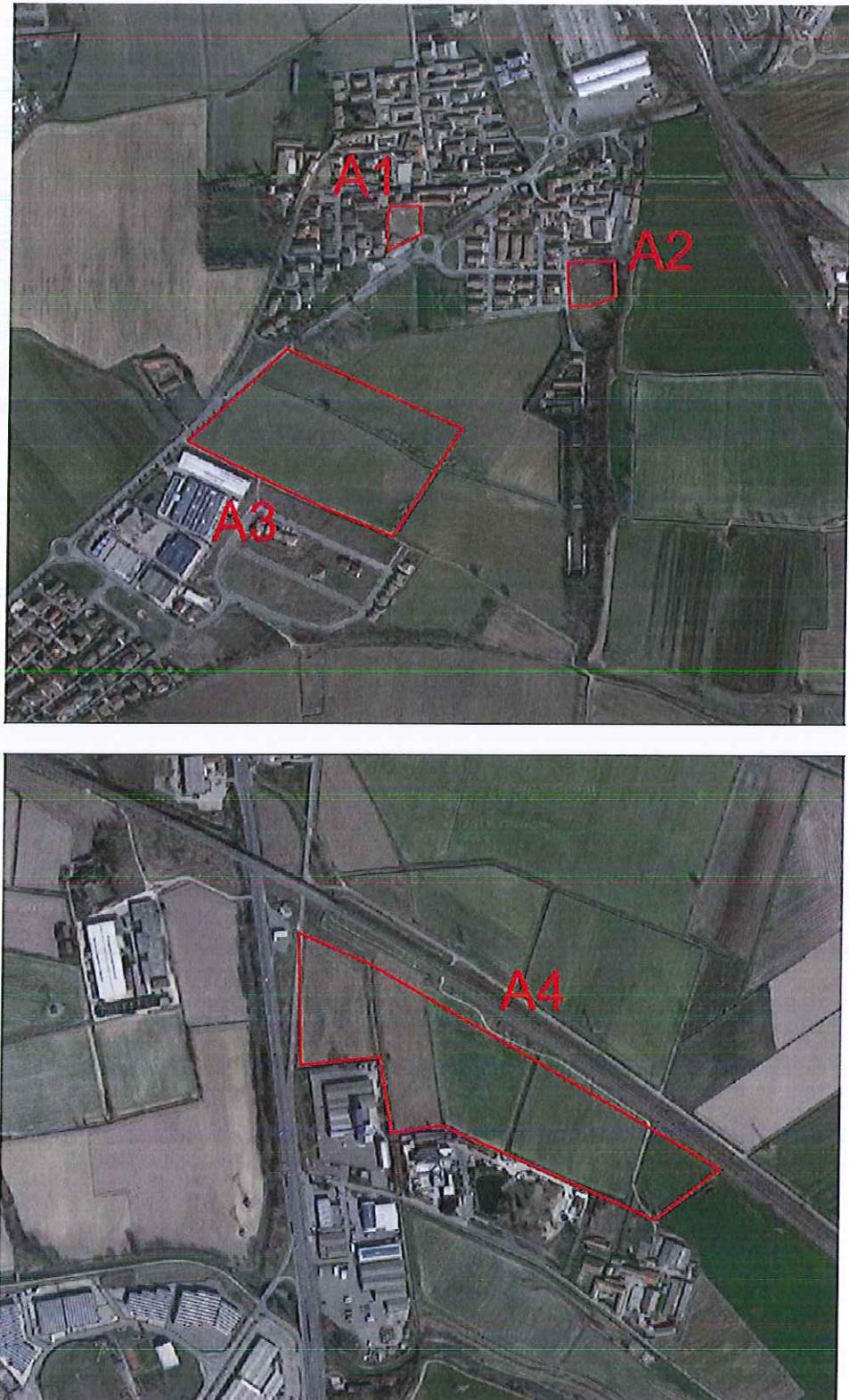


Figura 6: Individuazione delle aree all'interno delle quali sono state eseguite le indagini geofisiche.

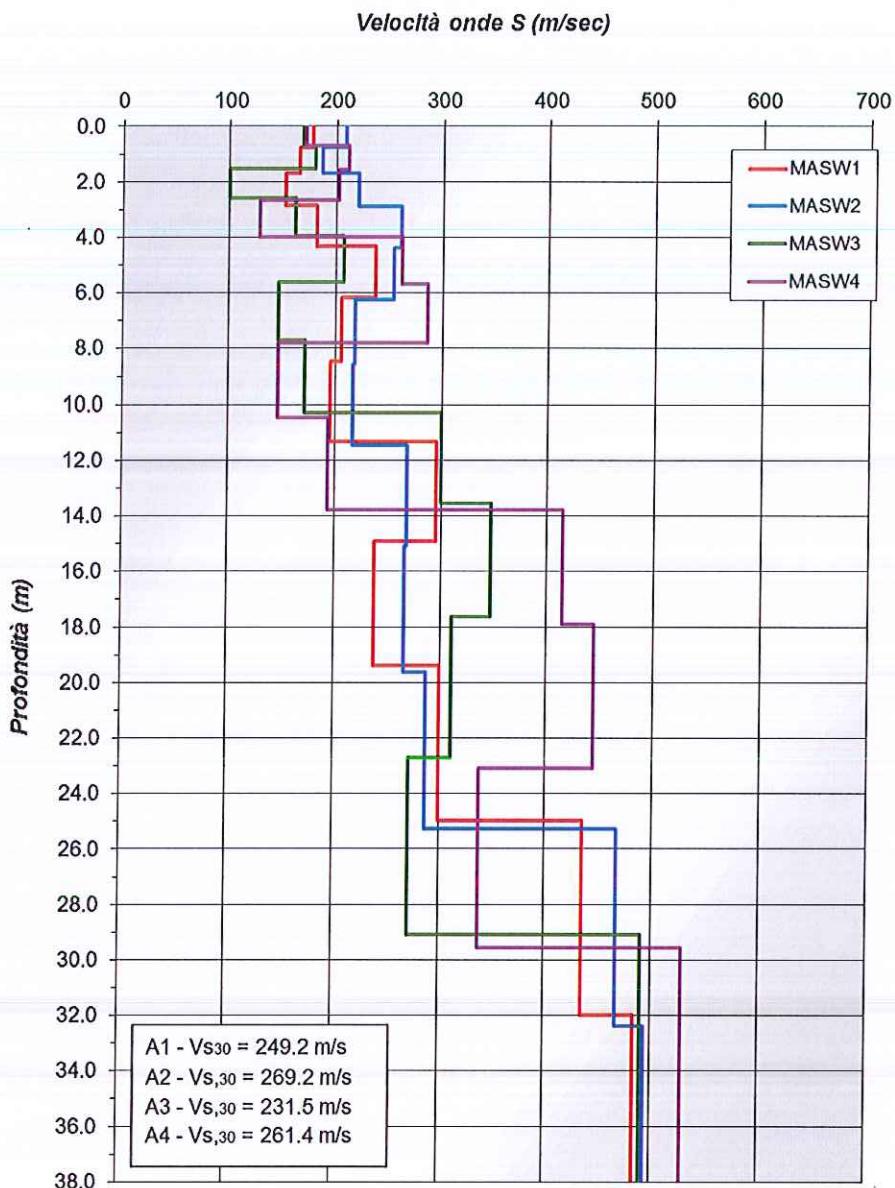


Figura 7: Andamento con la profondità della velocità delle onde sismiche di taglio per le aree indagate.

Secondo la procedura prevista per il 2° livello di approfondimento, il primo passo consiste nell'individuare la scheda litologica di riferimento 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 scheda¹).

¹ 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.

All'interno della scheda stabilità, 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 F_a , 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 nelle prove. In questo modo, utilizzando l'equazione propria della curva stabilità, è stato possibile determinare il fattore di amplificazione F_a .

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

Area	Categoria Sottosuolo da $V_s,30$	Scheda	Curva	Periodo T_0 [s]	F_a (0.1-0.5)	F_a (0.5-1.5)
<i>A1</i>	C	Sabbiosa	2	0.61	1.3	2.0
<i>A2</i>	C	Sabbiosa	2	0.60	1.3	2.0
<i>A3</i>	C	Sabbiosa	2	0.62	1.3	2.0
<i>A4</i>	C	Sabbiosa	2	0.56	1.3	1.9

Tabella 7: Valutazione dei fattori di amplificazione per le aree in esame.

Sebbene l'individuazione della scheda di riferimento sia stata effettuata principalmente sull'andamento delle V_s con la profondità, è stata considerata anche la granulometria prevalente dei terreni che costituiscono il sottosuolo, caratterizzato da una successione di sabbie prevalenti con locali intercalazioni di lenti/orizzonti limoso-argillosi di spessore variabile.

Successivamente i valori di Fa ottenuti con l'analisi di 2° livello (tabella 7) sono stati confrontati con i corrispettivi valori di Fa di soglia (tabella 4), da cui risulta:

Area	Cat. Sottosuolo	Fa (0.1-0.5)		Verifica	Fa (0.5-1.5)		Verifica
		sito	soglia		sito	soglia	
A1	C	1.3	1.8+0.1	Si	2.0	2.4+0.1	Si
A2	C	1.3	1.8+0.1	Si	2.0	2.4+0.1	Si
A3	C	1.3	1.8+0.1	Si	2.0	2.4+0.1	Si
A4	C	1.3	1.8+0.1	Si	1.9	2.4+0.1	Si

Tabella 8: Verifica dei fattori di amplificazione di sito.

Dal confronto emerge che i fattori di soglia per l'intervallo di periodo compreso tra 0.1-0.5 s e tra 0.5-1.5 s sono sufficienti nel valutare gli effetti di amplificazione litologica propri del sito: risulta pertanto possibile utilizzare gli spettri elastici previsti dalla normativa vigente (DM 14.01.2008) per una categoria di sottosuolo C.

Tuttavia si sottolinea che i profili geofisici ricostruiti per le aree indagate si posizionano appena al di sotto del limite di validità della scheda di riferimento “limoso-sabbiosa2”: per questo motivo si è deciso di utilizzare la scheda di riferimento “sabbiosa” (figura 7).

Si ritiene che il comportamento delle aree indagate sia intermedio tra quello previsto dalle due schede: mentre la scheda limoso-sabbiosa2 prevede un fattore di amplificazione maggiore nell'intervallo 01-0.5 s, la scheda sabbiosa prevede un fattore di amplificazione maggiore nell'intervallo 0.5-1.5 s.

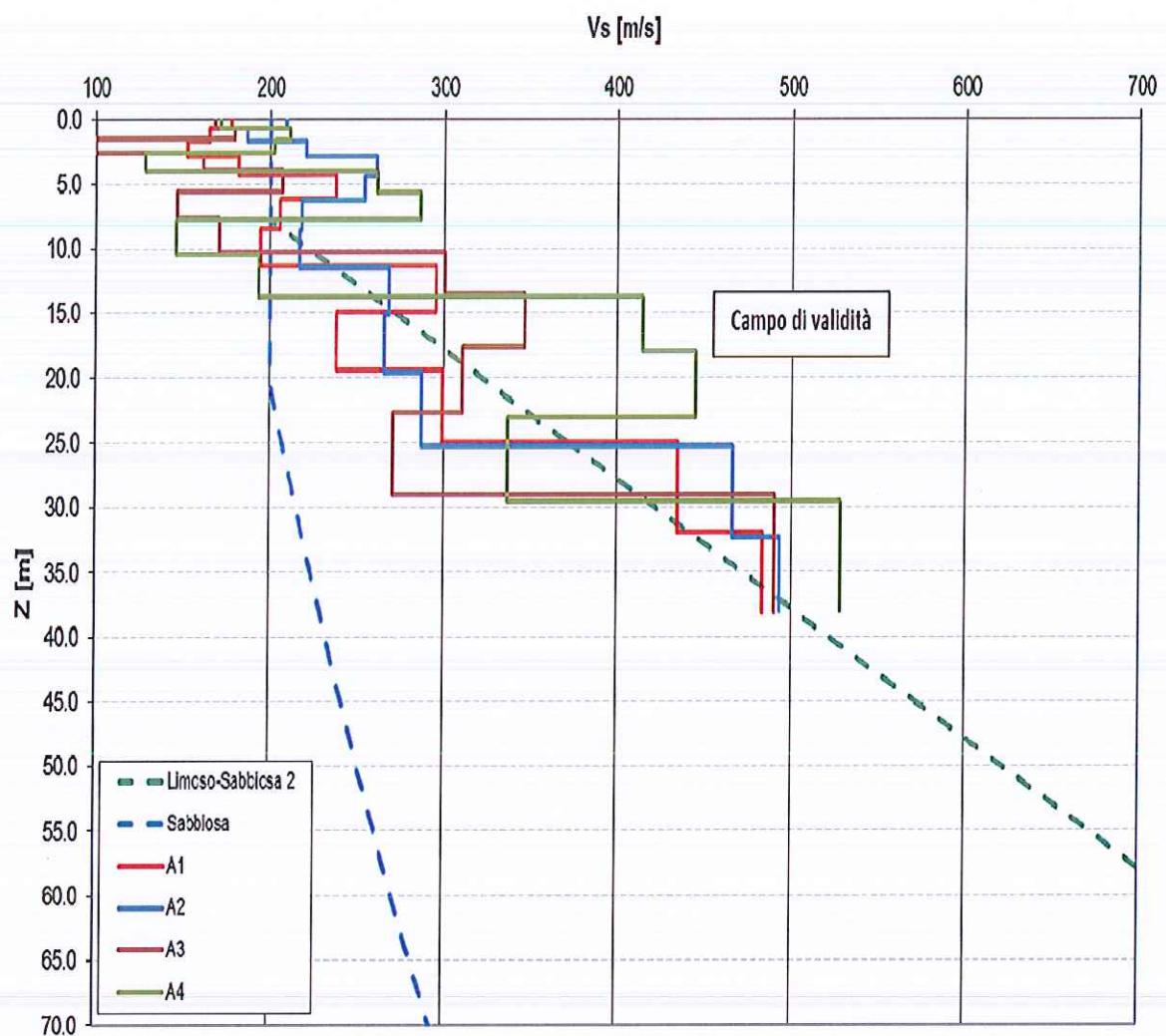


Figura 7: Profili geofisici delle aree indagate e campi di validità delle schede di riferimento (DGR 9/2616/2011).

3. CONCLUSIONI

Lo studio relativo alla pericolosità sismica locale ha evidenziato come l'intero territorio comunale sia soggetto a fenomeni di amplificazione locale generati dalle caratteristiche litologiche dei terreni che costituiscono il sottosuolo.

L'applicazione dell'analisi sismica di 2° livello ai sensi della D.G.R. 9/2616/2011 per le aree di trasformazione individuate nel PGT ha evidenziato, con le assunzioni sopra riportate, che gli spettri previsti dalle NTC08 sono sufficienti a considerare gli effetti di amplificazione stratigrafica propri del sito.

Tale risultato è applicabile alle sole aree indagate nel presente studio; si precisa anche che nelle valutazioni dei fattori di amplificazione tutte le analisi sono state condotte a partire dal piano campagna nello stato di fatto: si potrebbero ottenere delle variazioni dei valori di F_a o della scheda litologica di riferimento in funzione del sottosuolo sismico di riferimento specifico, ovvero del piano di impresa delle fondazioni (invece della scheda "sabbiosa" si potrebbe rientrare nella scheda "limoso-sabbiosa2" che prevede, per il periodo 0.1-0.5 s e per una categoria di sottosuolo di tipo C, valori di F_a di sito superiori a F_a di soglia).

Per tali ragioni, *qualsiasi trasformazione d'uso del suolo e qualsiasi nuova edificazione, dovrà essere preceduta da una valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'attuazione del 2° livello di approfondimento, secondo quanto riportato nella D.G.R. 9/2616/2011. Tale analisi dovrà essere basata su apposite indagini geognostiche (preferibilmente attraverso indagini geofisiche), riferite all'area e all'intervento specifico, in grado di ricostruire il profilo V_s -profondità secondo quanto stabilito dal D.M. 14.01.2008.*

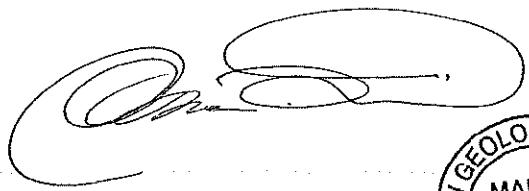
Qualora il fattore $F_{a_{sito}}$ risultasse inferiore a $F_{a_{soglia}}$, in fase progettuale si potrà definire l'azione sismica di progetto attraverso la categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC08. Nel caso in cui invece $F_{a_{sito}}$ risultasse maggiore a $F_{a_{soglia}}$, dovrà essere definita l'azione sismica di progetto, applicando o l'analisi sismica di 3° livello o lo spettro di norma adeguato (categorie di sottosuolo superiori che soddisfino la condizione $F_{a_{sito}} < F_{a_{soglia}}$).

Si sottolinea infine che lo spettro previsto dalla normativa con la procedura semplificata (categorie di sottosuolo) 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 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 (D.g.r. X/5001/2016).

Con riferimento al rischio di liquefazione dei terreni di fondazione, il territorio di Fombio appartiene alla zona sismogenetica 911 (“Tortona-Bobbio”) caratterizzata da una magnitudo di riferimento $Mw=6.14$, un valore di a_{max} di circa 0.122g (valore riferito al centro del territorio comunale) ed una soggiacenza della falda che varia da un massimo di 12 m sul Livello fondamentale della Pianura a un minimo di 2 m a valle del terrazzo pleistocenico. Le condizioni descritte sono tali da richiedere, ai sensi delle NTC08 (Cap. 7.11.3.4.2), *la verifica del potenziale di liquefazione dei terreni attraverso specifiche indagini geognostiche per qualsiasi intervento*.

GEOLAMBDA Engineering S.r.l.
dott. geol. Marco Daguati



Allegato

Indagini geofisiche con la metodologia MASW

Signa srl
INDAGINI GEOFISICHE

Committente: Geolambda Engineering S.r.l.

Comune: Fombio (LO).

Indagine: Indagini geofisiche con la metodologia MASW.

RAPPORTO TECNICO

Codice documento: 117-16			Numero pagine: 14		
A	18/10/16	EMISSIONE	DG	DG	DG
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato



SIGNA srl
Via G. Donizetti, 7 – 24040 Boltiere (BG)
Tel/Fax 035-806318 – Cell. 331-8218021
Cod.Fisc. e P.IVA 05388280967
www.signasrl.it; e-mail: info@signasrl.it



SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
	N. Comessa	117-16
	C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio

1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La presente relazione riporta le elaborazioni ed i risultati ottenuti dall'esecuzione di n. 4 profili sismici con la metodologia MASW effettuati in altrettante aree situate nel territorio comunale di Fombio (LO).

La campagna di indagine è stata eseguita nella giornata del 22 settembre 2016 su incarico della società *Geolambda Engineering S.r.l.*, nell'ambito della redazione dell'aggiornamento dello studio geologico comunale ai sensi della nuova Legge per il Governo del Territorio.

Scopo delle indagini geofisiche, la ricostruzione dell'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità (V_s -z) per le aree in esame al fine di consentire una stima degli effetti sismici di sito: il modello sismico monodimensionale consente di valutare l'incidenza delle locali condizioni stratigrafiche nella modifica della pericolosità sismica di base (amplificazioni di natura litologica – D.G.R. n. IX/2616 del 30 novembre 2011 *"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"*).

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

In figura 1 riporta l'ubicazione delle aree all'interno delle quali sono state effettuate le indagini MASW con la relativa identificazione numerica (A1-A4).

Data	18/10/2015
N. Commessa	117-16
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	MASW_Fombio

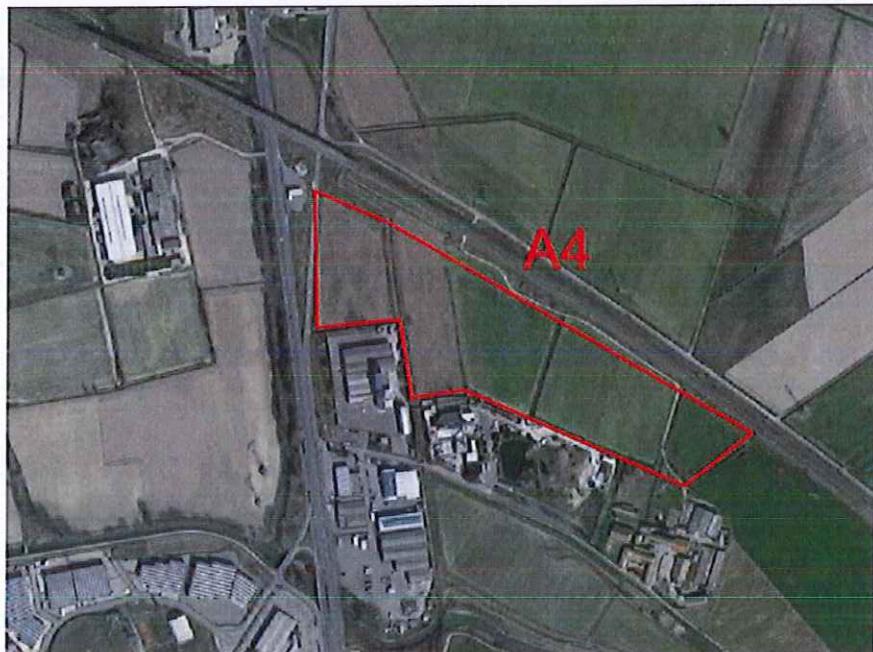
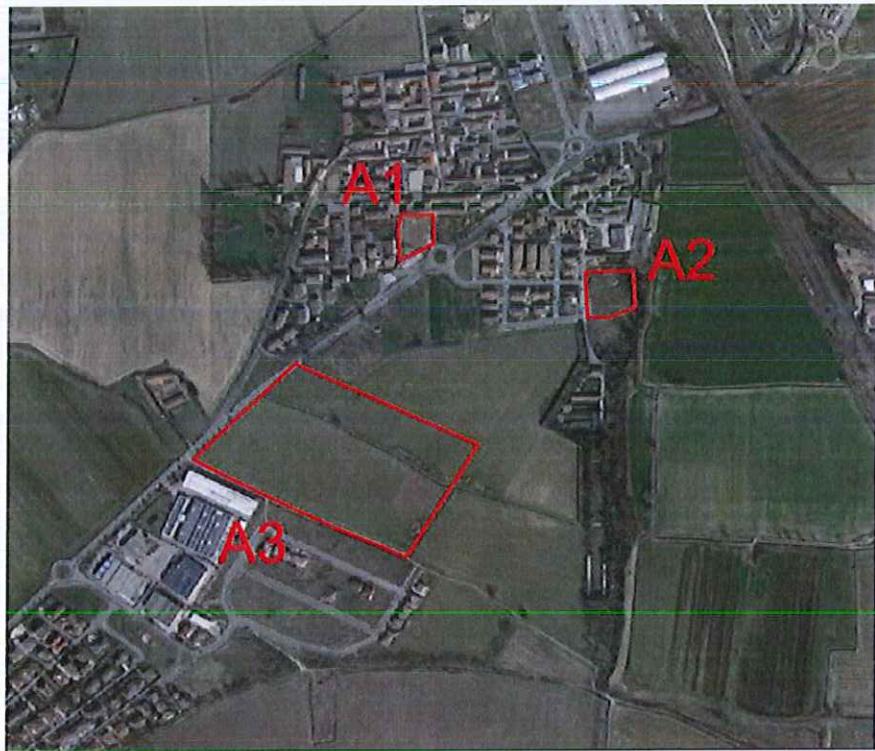


Figura 1: Ubicazione delle aree all'interno delle quali sono state effettuate le prospezioni MASW (immagine tratta da Google Map).

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
	N. Comessa	117-16
	C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio

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 C.B. 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 di Rayleigh.

Il metodo di indagine MASW si distingue in "attivo" e "passivo" (Zywicki D.J., 1999; Park C.B., Miller R.D., 2006; Roma V., 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 rigidezza 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 30 m).

La combinazione delle due tecniche consente di ottenere uno spettro completo nella banda di frequenza compresa 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 rigidezza degli strati).

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 1.5 m (la configurazione geometrica adottata è stata dettata sia dalle condizioni logistiche che dalla necessità di ricostruire al meglio lo spettro di velocità delle onde superficiali di Rayleigh).

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
	N. Commessa	117-16
	C. Documento	01
Indagini geofisiche con la metodologia MASW	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio

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 compresa tra 6 e 15 m dal primo geofono effettuando più energizzazioni in punti differenti (*"Optimum Field Parameters of an MASW Survey"*, Park C.B. et al., 2005; Dal Moro G., 2008; Dal Moro G., 2012).

Terminata l'indagine attiva, con la stessa configurazione geometrica si è passati alla registrazione dei microtremori (MASW passiva) acquisendo in totale 10-12 registrazioni di rumore, ciascuna della lunghezza di 30 s.

Di seguito si riassumono le principali caratteristiche della strumentazione utilizzata per l'esecuzione 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
1	Cavo sismico	$L = 60$ m
1	Sorgente	Mazza battente su piattello metallico

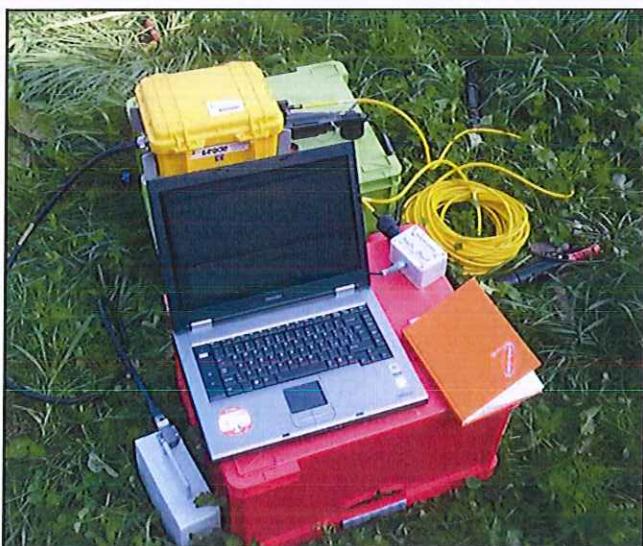


Figura 2: Strumentazione utilizzata per la prova MASW.

SIGNA srl – Indagini geofisiche

Indagini geofisiche con la metodologia MASW

Data	18/10/2015
N. Commessa	117-16
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	MASW_Fombio



Vista dello stendimento MASW 1 – Area A1



Vista dello stendimento MASW 2 – Area A2

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
	N. Comessa	117-16
	C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio



Vista dello stendimento MASW 3 – Area A3



Vista dello stendimento MASW 4 – Area A4

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
	N. Comessa	117-16
	C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio

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 5.0* della Kansas University, Park C. B., 2016).

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 riportate 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.

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
	N. Comessa	117-16
	C. Documento	01
Indagini geofisiche con la metodologia MASW	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio

Dall'inversione delle curve di dispersione (relative al "modo fondamentale" delle onde superficiali di Rayleigh) si ottengono i seguenti modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, ciascuno rappresentativo dell'area investigata.

MASW 1			
Strato	Spessore [m]	Vs [m/s]	Profondità
1	0.8	178	0.8
2	0.9	165	1.7
3	1.2	153	2.9
4	1.5	182	4.3
5	1.8	238	6.2
6	2.3	206	8.5
7	2.9	195	11.3
8	3.6	295	14.9
9	4.5	238	19.4
10	5.6	300	25.0
11	7.0	435	32.0
12	6.1	484	38.1

Tabella 1: modello sismico monodimensionale – MASW1_A1.

MASW 2			
Strato	Spessore [m]	Vs [m/s]	Profondità
1	0.8	209	0.8
2	1.0	187	1.7
3	1.2	221	2.9
4	1.5	261	4.4
5	1.9	254	6.2
6	2.3	218	8.6
7	2.9	217	11.5
8	3.6	268	15.1
9	4.5	266	19.6
10	5.7	287	25.3
11	7.1	467	32.4
12	5.7	494	38.1

Tabella 2: modello sismico monodimensionale – MASW2_A2.

SIGNA srl – Indagini geofisiche		Data	18/10/2015
		N. Commessa	117-16
		C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>		Revisione	A (DG)
		Nome file	MASW_Fombio

MASW 3			
Strato	Spessore [m]	Vs [m/s]	Profondità
1	0.7	168	0.7
2	0.9	180	1.5
3	1.1	100	2.6
4	1.3	161	3.9
5	1.7	207	5.6
6	2.1	147	7.7
7	2.6	171	10.3
8	3.3	300	13.6
9	4.1	347	17.6
10	5.1	311	22.7
11	6.4	271	29.1
12	9.0	490	38.1

Tabella 3: modello sismico monodimensionale – MASW3_A3.

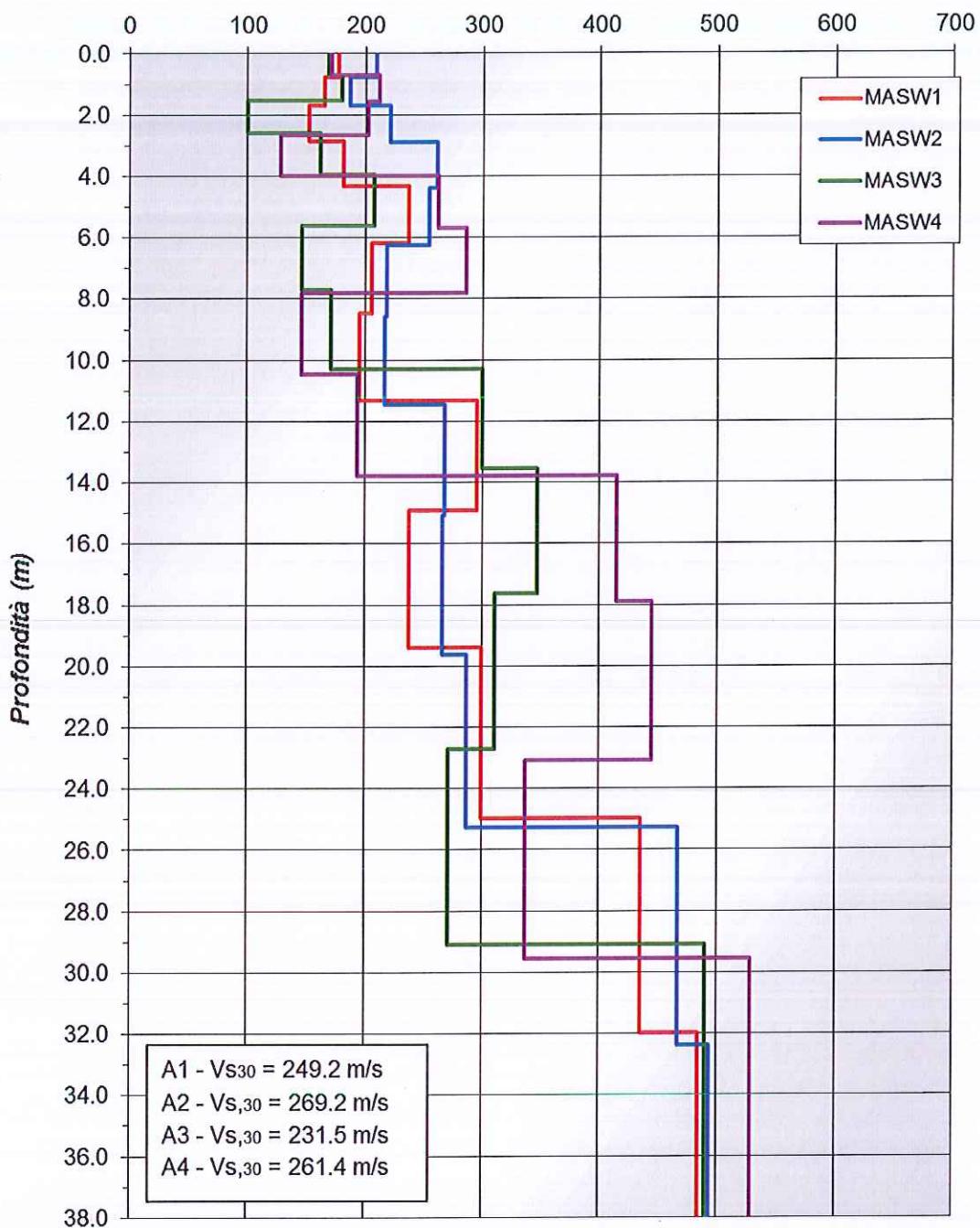
MASW 4			
Strato	Spessore [m]	Vs [m/s]	Profondità
1	0.7	172	0.7
2	0.9	211	1.6
3	1.1	202	2.7
4	1.4	128	4.0
5	1.7	262	5.7
6	2.1	286	7.8
7	2.7	146	10.5
8	3.3	194	13.8
9	4.1	414	17.9
10	5.2	445	23.1
11	6.5	337	29.5
12	8.5	529	38.0

Tabella 4: modello sismico monodimensionale – MASW4_A4.

Data	18/10/2015
N. Comessa	117-16
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	MASW_Fombio

Shear-Wave Velocity Profile from Surface waves inversion

Velocità onde S (m/sec)

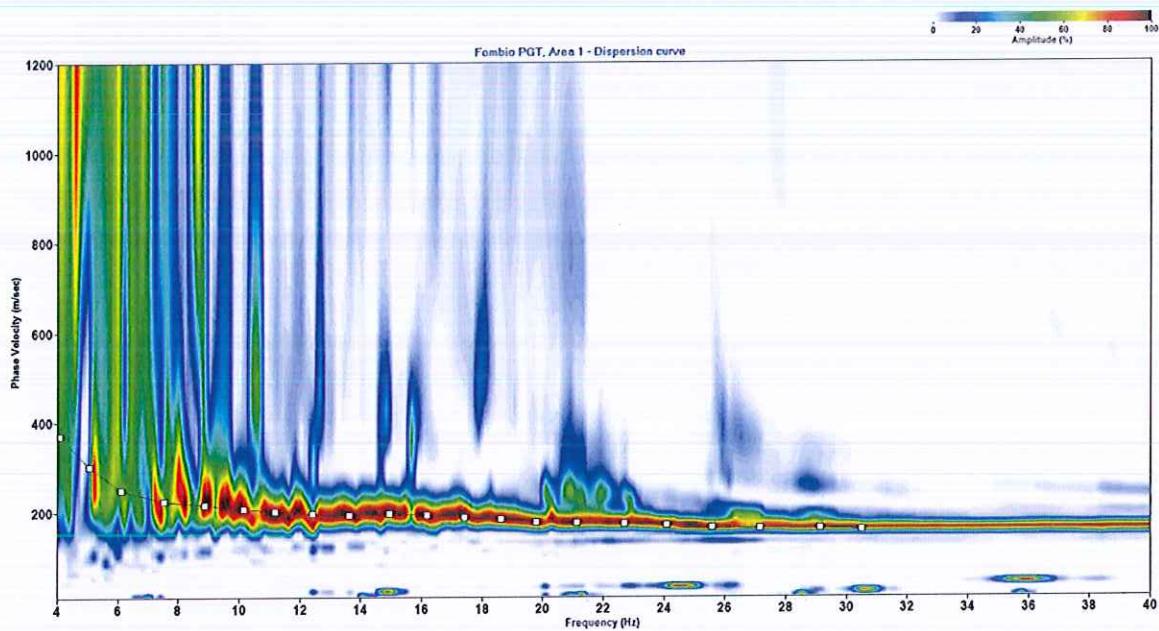


SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
	N. Commessa	117-16
	C. Documento	01
<i>Indagini geofisiche con la metodologia MASW</i>	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio

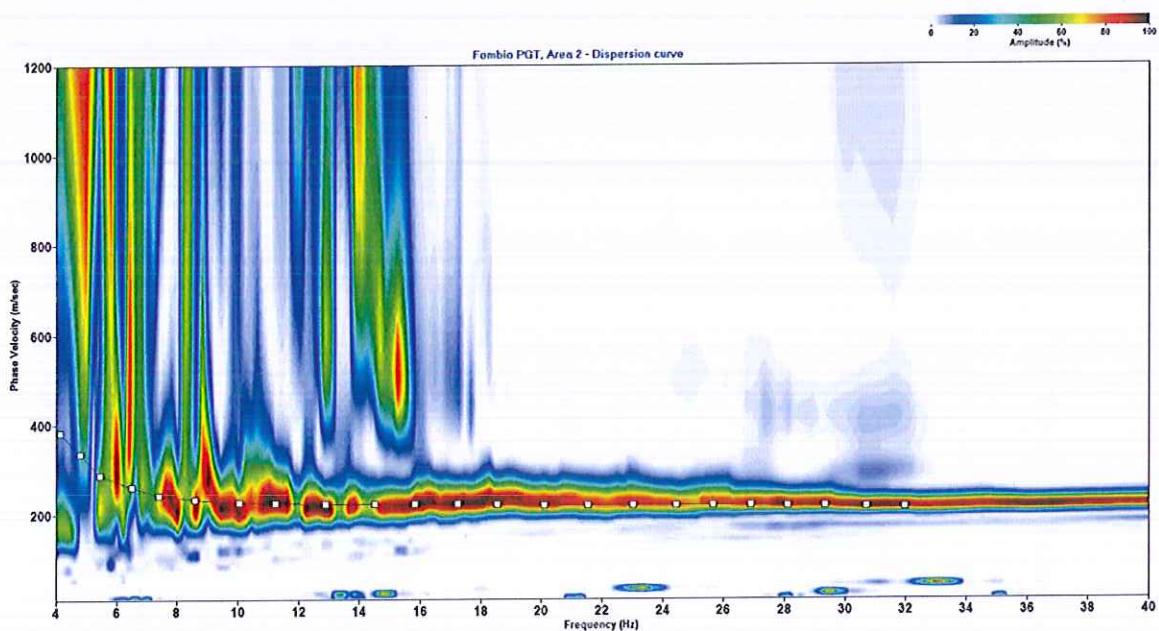
ALLEGATO

SIGNA srl – Indagini geofisiche	Data	18/10/2015
Indagini geofisiche con la metodologia MASW	N. Comessa	117-16
	C. Documento	01
	Revisione	A (DG)
	Nome file	MASW_Fombio

MASW1 - CURVA DI DISPERSIONE



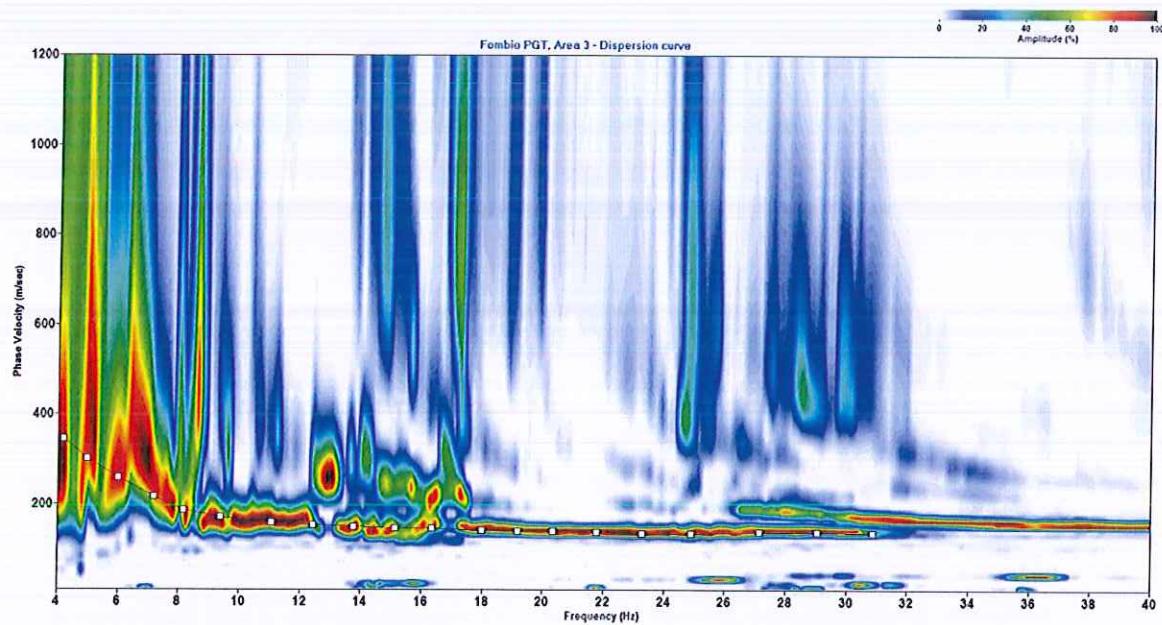
MASW2 - CURVA DI DISPERSIONE



SIGNA srl – Indagini geofisiche
Indagini geofisiche con la metodologia MASW

Data	18/10/2015
N. Comessa	117-16
C. Documento	01
Revisione	A (DG)
Nome file	MASW_Fombio

MASW3 - CURVA DI DISPERSIONE



MASW4 - CURVA DI DISPERSIONE

