

## **INDICE**

1. PREMESSA E NORMATIVE DI RIFERIMENTO .....	1
2. CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA .....	5
3. INDAGINE GEOFISICA IN SITO.....	9
3.1 Generalità .....	9
3.2 Strumentazione utilizzata .....	11
3.3 RE.MI (Refraction Microtremor) .....	12
3.4 "Masw" (Multichannel Analysis of Surface Waves) .....	15
4. MODELLO SISMICO E PARAMETRI DINAMICI DEL SOTTOSUOLO.....	18
5. PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE E VALUTAZIONE DELL'ACCELERAZIONE MASSIMA DEL SITO AI SENSI DELLE NTC/2008 .....	22
6. VALUTAZIONE DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE AI SENSI DELLA D.G.R. N. IX/2616 DEL 30.11.2011 .....	28
7. VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE DEL TERRENO .....	34
8. CONCLUSIONI .....	36

## **ALLEGATI**

Allegato 1 PROVE SISMICHE SUPERFICIALI RE.MI E MASW

## 1. PREMESSA E NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La presente relazione è finalizzata a definire le caratteristiche sismiche dell'area del complesso produttivo Industrie Cosmetiche Riunite (ICR S.p.A.) ubicato al margine nord del comune di Lodi al km 2.8 della S.P n°25 (cfr. Fig.1, Fig.2 e Fig.3) dove sono previsti degli interventi di ampliamento dello stabilimento. Come visualizzato nella planimetria generale riportata in Fig.4 il progetto prevede la costruzione di due strutture prefabbricate A e B con dimensioni in pianta rispettivamente di 78.75x139 m e 92.5x160 m con altezza 15 m, un fabbricato a pianta trapezoidale per la zona vendita-spaccio prodotti, nonché l'ampliamento del parcheggio nell'area sud dello stabilimento. In particolare si è proceduto a definire la sismicità dell'area con le seguenti finalità:

- illustrare la sismicità dell'area sulla base della classificazione sismica nazionale ai sensi dell'OPCM n.3274 del 20 marzo 2003 come recepita dalla D.g.r. n.14964 del 7 novembre 2003;
- definizione del modello sismico del sottosuolo ovvero della categoria del suolo di fondazione attraverso i profili di velocità delle onde di taglio  $v_s$  ottenuti con le prove geofisiche in sito secondo quanto specificato al paragrafo 3.2.2 del D.M. 14 gennaio 2008 - "Nuove norme tecniche per le costruzioni";
- valutazione della pericolosità sismica locale mediante l'individuazione dell'accelerazione orizzontale massima del terreno  $a_{max}$  (ai sensi delle NTC/2008) e del fattore di amplificazione  $F_a$  del sito (ai sensi della D.g.r. n.IX/2616 del 30.11.2011);
- stima della suscettibilità alla liquefazione dei terreni di fondazione.

Fig.1

Foto aerea

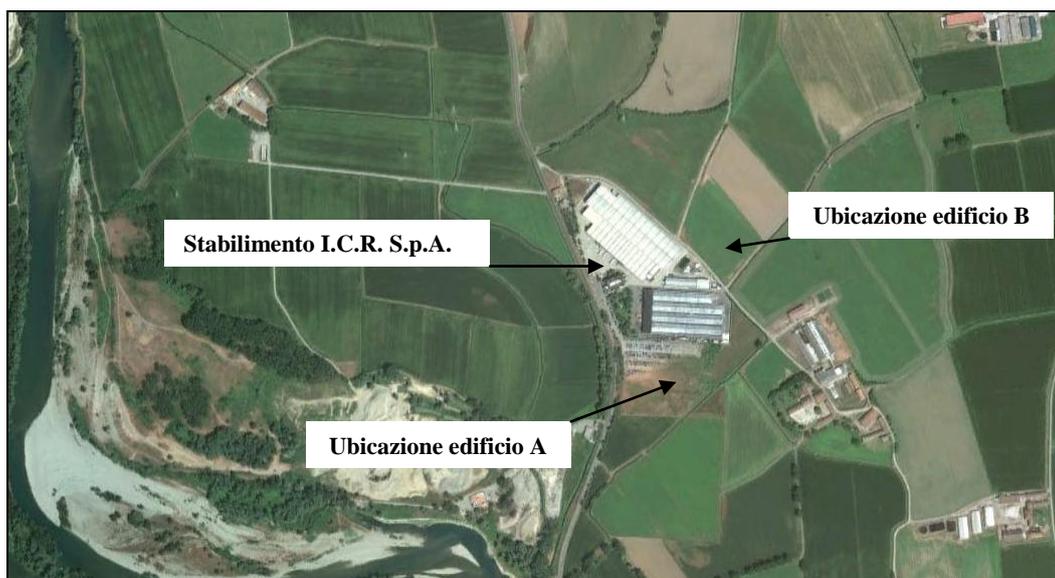


Fig. 2  
Corografia - Stralcio CTR, sezione B6e5

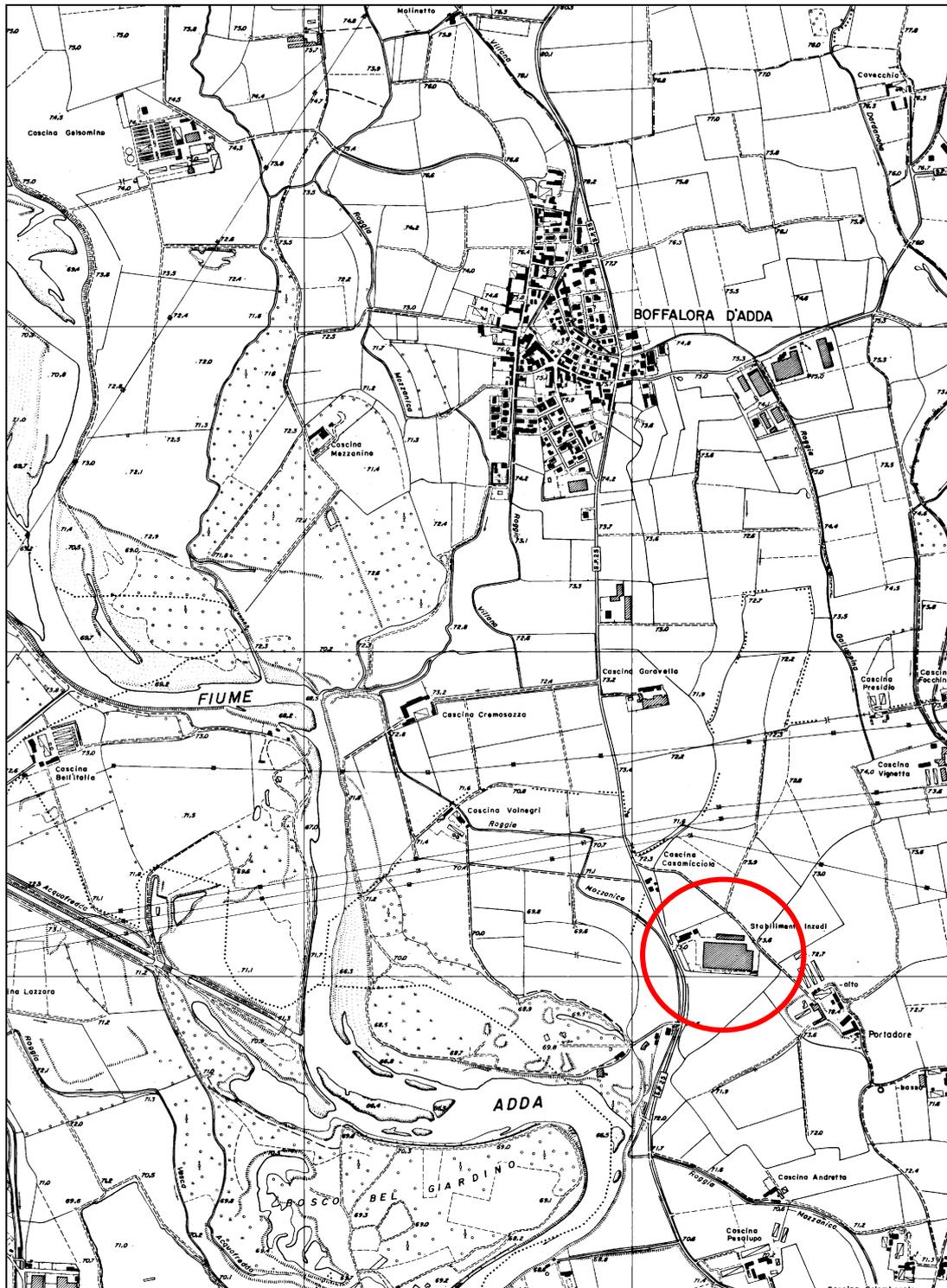


Fig. 3

Planimetria aereofotogrammetrica

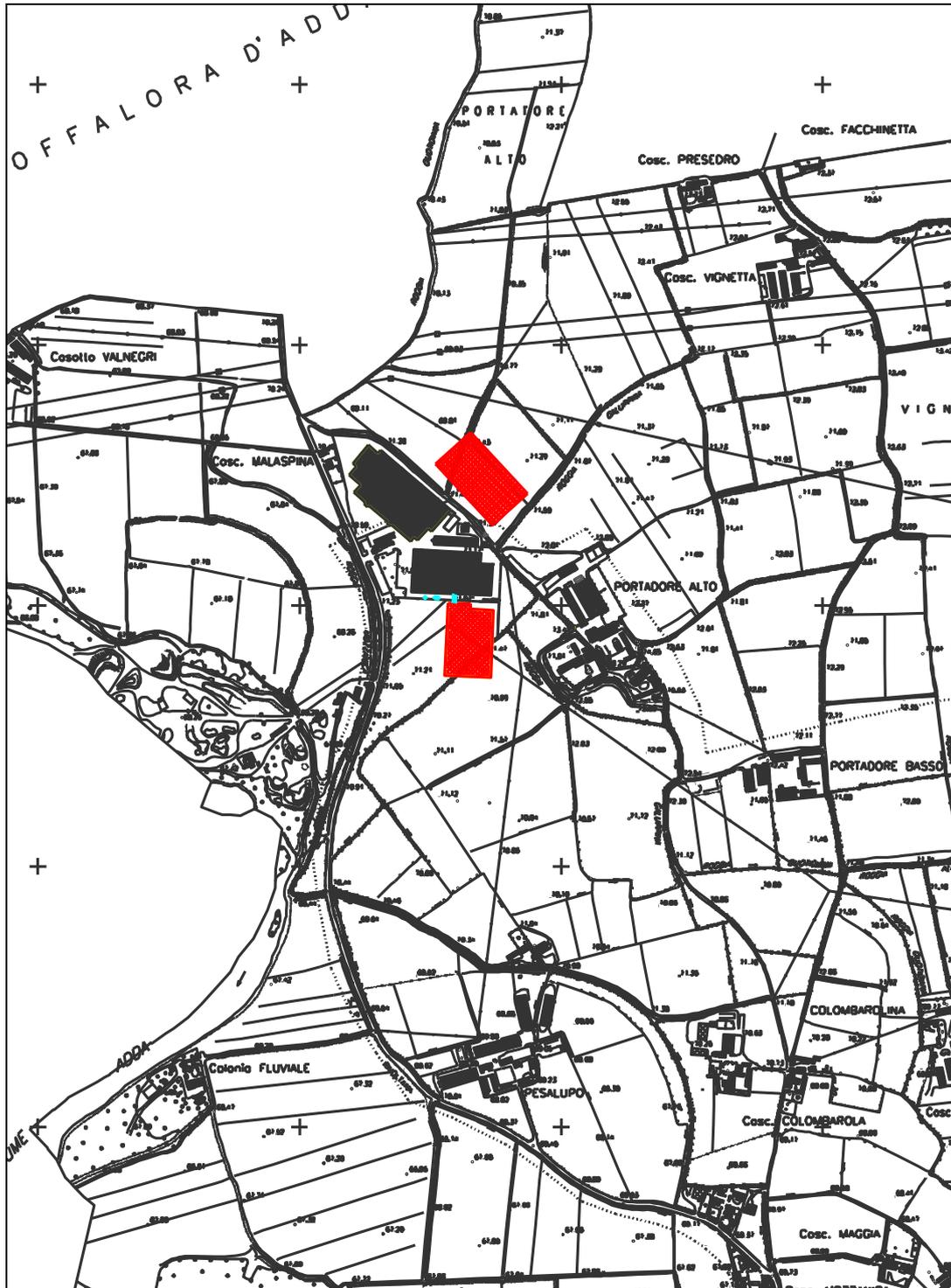
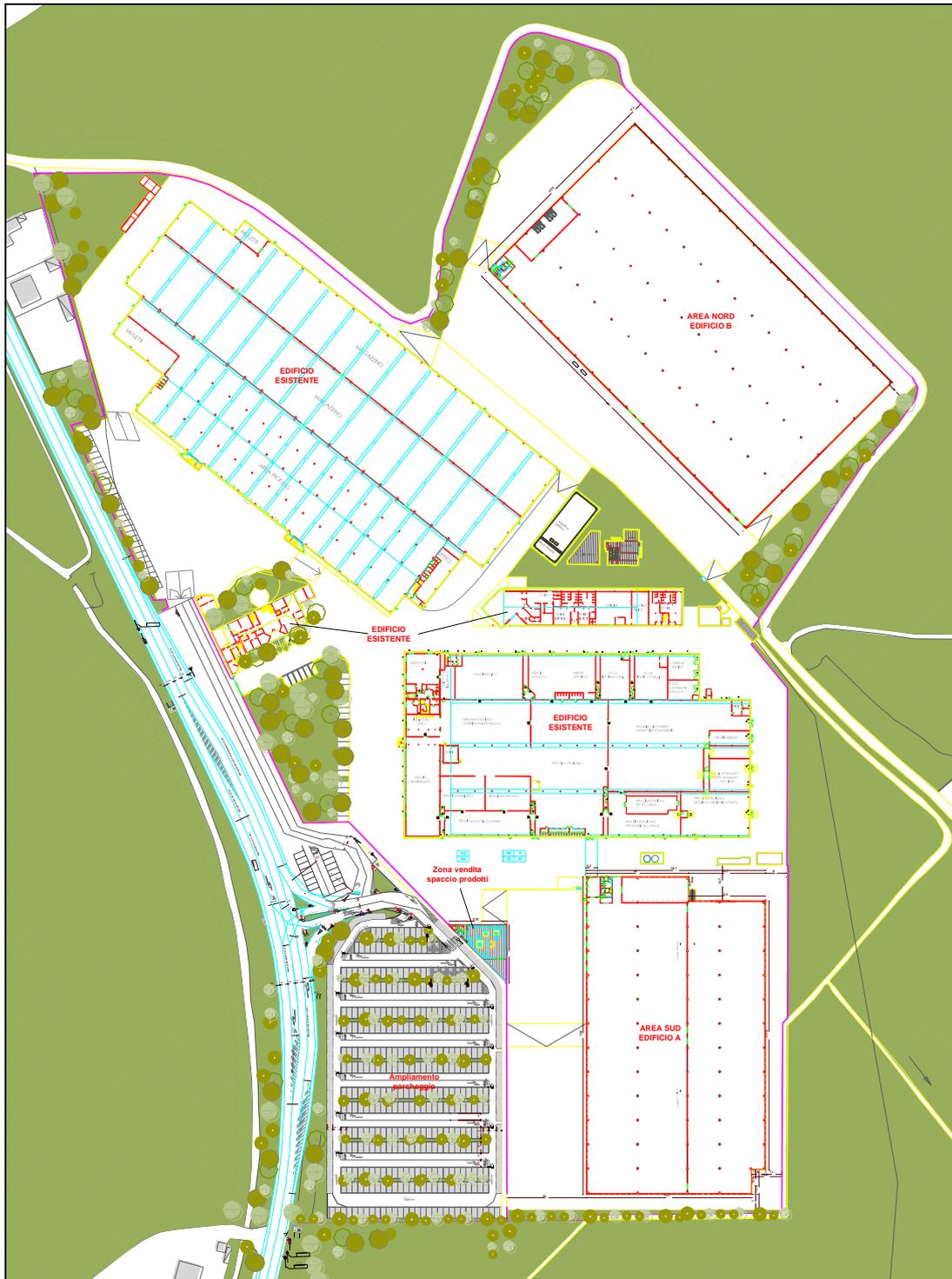


Fig. 4

*Planimetria di progetto ampliamento complesso produttivo*



Le normative di riferimento sono:

- D.M. 14 gennaio 2008 - *"Nuove norme tecniche per le costruzioni"*
- Circolare 2 febbraio 2009 n.617 C.S.LL.PP. - *"Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008"*
- OPCM n.3274 del 20 marzo 2003 - *"Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zone sismiche"*
- OPCM n.3519 del 28 aprile 2006 - *"Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle stesse zone"*
- D.g.r. n.IX/2616 del 30 novembre 2011 - *"Aggiornamento dei Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell'art.57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n.12", approvati con D.g.r. 22 dicembre 2005, n.8/1566 e successivamente modificati con D.g.r. 28 maggio 2008, n.8/7374"*
- D.g.r. n. 14964 del 7 novembre 2003 - *"Disposizioni preliminari per l'attuazione dell'ordinanza del presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*

## 2. CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA

Il panorama legislativo in materia sismica è stato profondamente trasformato dalle recenti normative nazionali ovvero dall'OPCM n°3274/2003 che è entrata in vigore dal 25 ottobre 2005, data coincidente con la pubblicazione della prima stesura delle norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14 settembre 2005) e dalla successiva OPCM n°3519/2006. La riclassificazione sismica del territorio nazionale prevede che tutto il territorio sia classificato sismico sulla base della **Mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale** riportata in Fig.5 espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi. In relazione alla pericolosità sismica di Fig. 5, il territorio nazionale è stato suddiviso in quattro zone con livelli decrescenti di pericolosità (*cf.* Fig.6 e tabella sottostante) in funzione a quattro differenti valori di accelerazione orizzontale massima al suolo  $a_{g475}$ , ossia quella riferita al 50esimo percentile, ad una vita di riferimento di 50 anni e ad una probabilità di superamento del 10% riferiti a suoli rigidi caratterizzati da  $V_{s30} > 800$  m/s.

Zona 1	$a_{g475} \geq 0.25g$
Zona 2	$0.25 < a_{g475} \leq 0.15g$
Zona 3	$0.15 < a_{g475} \leq 0.05g$
Zona 4	$a_{g475} < 0.05g$

Fig.5

Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale

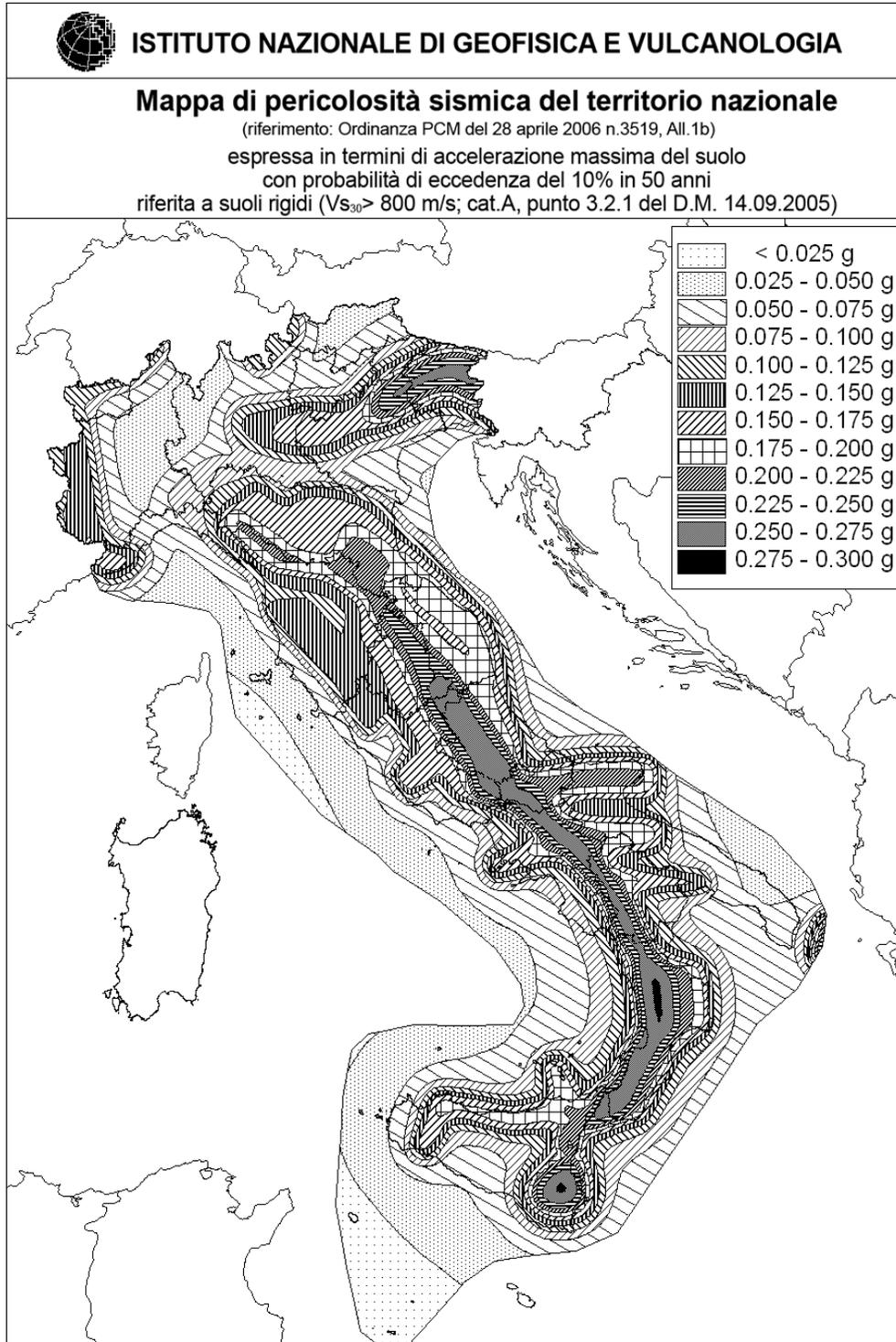
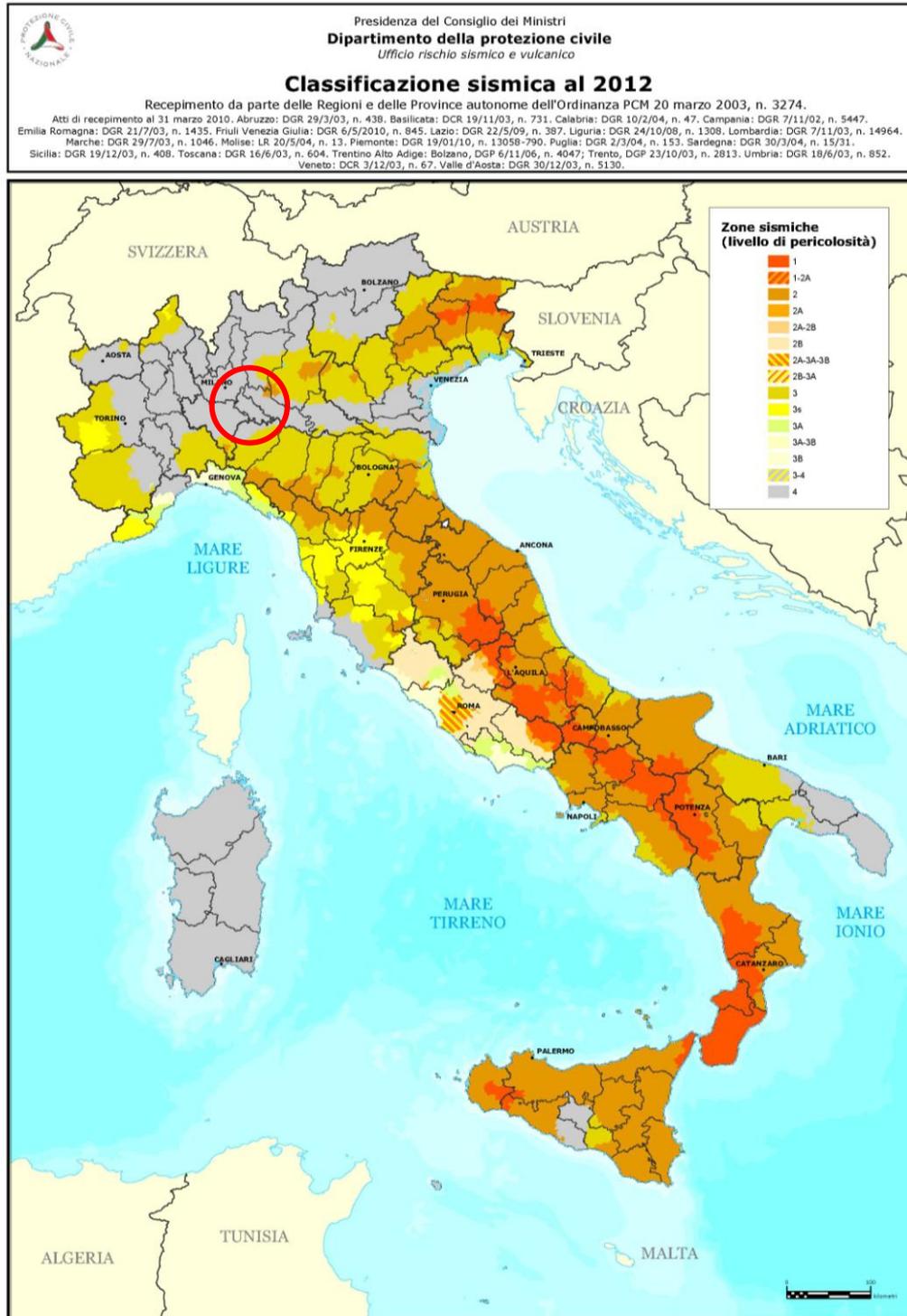


Fig.6

Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale

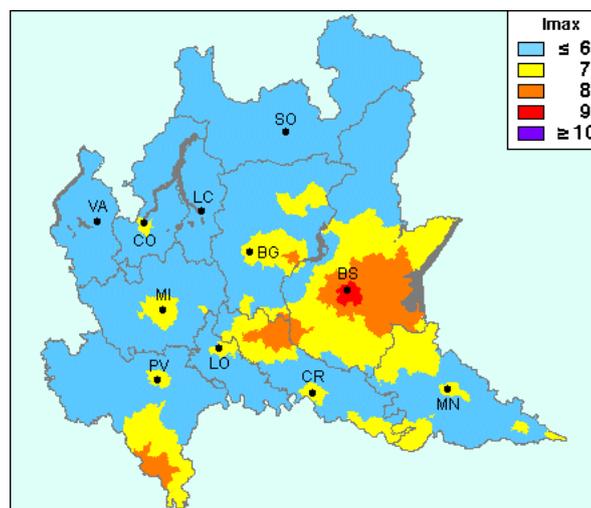


**Relazione sismica**

L'appartenenza ad una delle quattro zone viene stabilita rispetto alla distribuzione sul territorio dei valori di  $a_{g475}$  con una tolleranza 0.025g. Come si evince dalla tabella a ciascuna zona o sottozona è attribuito un valore di pericolosità di base, espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido ( $a_g$ ). Tale valore di pericolosità di base non ha però influenza sulla progettazione. Infatti le nuove Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008 in vigore dal 1° luglio 2009 hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva ai fini progettuali: per ciascuna zona, e quindi territorio comunale, precedentemente veniva fornito un valore di accelerazione di picco e quindi di spettro di risposta elastico da utilizzare per il calcolo delle azioni sismiche. Dal 1 luglio 2009 con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, per ogni costruzione ci si deve riferire ad una accelerazione di riferimento "propria" individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, indipendentemente dai confini amministrativi comunali. La classificazione sismica (zona sismica di appartenenza del comune) rimane utile solo per la gestione della pianificazione e per il controllo del territorio da parte degli enti preposti (Regione, Genio civile, ecc.).

Il territorio comunale di Lodi sulla base della normativa nazionale e regionale sopra menzionata è stato classificato in Zona sismica 4 (sismicità molto bassa). Per quanto riguarda la massima intensità macrosismica  $I_{max}$  (che rappresenta una misura degli effetti che il terremoto ha prodotto sull'uomo, sugli edifici e sull'ambiente) si fa riferimento alla classificazione del Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti GNDT. Per la Lombardia i valori dell'intensità macrosismica MCS sono indicati nella Fig.7 nonché elencati per ogni singolo comune nel database del GNDT.

Fig.7

Intensità macrosismica  $I_{max}$ 

Per il comune di Lodi la pericolosità sismica di base, la classificazione sismica e la magnitudo di riferimento sono le seguenti:

Accelerazione orizzontale massima al suolo normativa	$a_{g475} < 0.05g$
Zona sismica	zona 4 (sismicità molto bassa)
Intensità macrosismica	$I_{max} = 7$
Magnitudo	$M = 5$

### 3. INDAGINE GEOFISICA IN SITO

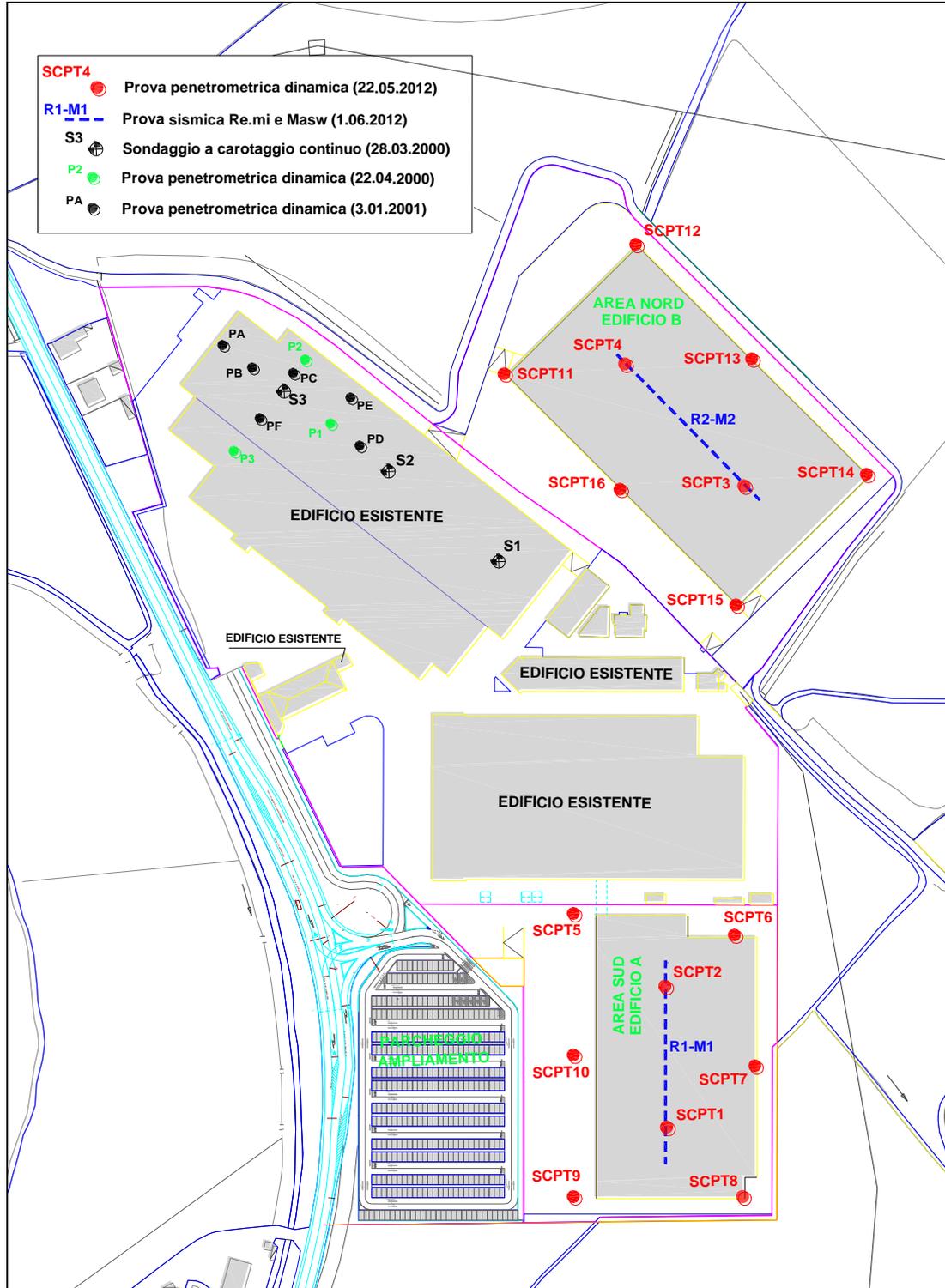
#### 3.1 Generalità

Per la definizione delle caratteristiche sismiche del terreno di fondazione (profilo stratigrafico secondo le categorie previste dalle NTC/08) sono state eseguite due prove sismiche condotte con due metodologie che possono essere considerate complementari:

- RE.MI - Refraction Microtremor;
- MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves.

La metodologia **RE.MI** è una tecnica "passiva" in quanto si basa sulla registrazione del rumore sismico indotto dalle attività antropiche (traffico, fabbriche ecc.). E' adatta in ambienti fortemente antropizzati e consente elevate profondità di indagine, anche in presenza di terreni con bassa velocità delle onde di taglio ( $v_s$ ), per la capacità di campionare basse frequenze. Al contrario non è adatta in ambienti poco "rumorosi" e vi è la possibilità di sovrastimare i valori di  $v_s$  in presenza di rumore fortemente direzionale non ortogonale allo stendimento sismico. Viceversa la metodologia **MASW** è una tecnica "attiva" in quanto si basa sulla registrazione del segnale sismico indotto da una massa battente. E' adatta in ambienti "non rumorosi" ed è caratterizzata da una buona capacità di definizione dei valori di  $v_s$ , soprattutto per quanto riguarda gli orizzonti più superficiali (primi 20÷30m). E' invece poco adatta in ambienti fortemente antropizzati e rumorosi, consente limitate profondità di indagine, in presenza di terreni con bassa velocità delle onde di taglio ( $v_s$ ). Difficilmente, prima di realizzare l'indagine, è possibile valutare qual è la tecnica che può fornire i risultati migliori, quindi in campagna si procede con la realizzazione di entrambe le tecniche, e solo dopo, in fase di elaborazione, saranno confrontati i profili di velocità ottenuti. Come già accennato, la tecnica "**Masw**" consente di stimare in modo più preciso i valori di  $v_s$  degli orizzonti più superficiali, mentre il metodo "**Re.Mi.**" permette di ottenere una maggiore profondità d'indagine. In generale le tecniche, con i dovuti accorgimenti operativi, permettono di ottenere risultati, seppur parzialmente, "sovrapponibili", mentre solo in alcuni casi una tecnica si rileva "chiaramente" migliore dell'altra. L'ubicazione degli stendimenti sismici indicati con le sigle R1-M1 e R2-M2 è visualizzata nella Fig.8.

Fig. 8  
Planimetria con ubicazione prove sismiche



### 3.2 Strumentazione utilizzata

Il "Geode" è un sismografo modulare a 24 bit (*cf.* Fig.9 e Foto 1) che rappresenta l'ultima frontiera dei sistemi di registrazione sismica combinando il meglio dei tradizionali sismografi Geometrics con la flessibilità di un sistema distribuito. Geode è un sismografo ad elevata dinamica (144 dB di range dinamico totale - 105 dB istantanei a 2 msec di campionamento). Grazie all'ampia banda d'ingresso (1.75÷20 kHz, con velocità di campionamento da 0.02 msec a 16 msec), esso è perfettamente idoneo per un'ampia gamma di applicazioni: sismica a rifrazione, sismica a riflessione (anche ad altissima risoluzione), monitoraggio di vibrazioni, applicazioni sismologiche, downhole e VSP. In acquisizione sono disponibili tutte le funzioni di filtri, pre-amplificazione, line-test e instrument-test, tipiche dei sistemi di registrazioni evoluti. Più precisamente l'attrezzatura utilizzata è composta da:

- Sismografo modulare Geode 3-1000+ canali
- Massa battente da 10 Kg
- Piastra di battuta in alluminio 15x15x2,5cm
- Batteria ricaricabile 12 V
- Cavo per sismica a rifrazione stranded, 130 mt con 24 takeouts SPT-21 a 5 metri di intervallo e due code da 7.5 mt l'una terminate con connettore Bendix 61S
- Geofoni GS20DX, 4.5 Hz verticali, 395 Ohm con puntale da 3" ed 1,5 mt di cavo terminato con mueller clip singola MC-20-SP
- Computer portatile ACER.

Fig.9

Sismografo geode collegato al pc



Foto 1

*Particolare sismografo geode collegato al pc durante l'esecuzione della prova sismica*



### **3.3 RE.MI (Refraction Microtremor)**

La prova **RE.MI (Refraction Microtremor)** è una prova sismica di recente introduzione nel campo delle indagini geofisiche che consente di valutare la velocità delle onde di taglio  $v_s$  con la profondità mediante la registrazione del rumore di fondo ambientale con uno stendimento sismico normalmente utilizzato per la sismica a rifrazione. La metodologia d'indagine più applicata per la determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio  $v_s$ , è stata proposta e sperimentata da *J.N.Louie* del *Seismological Laboratory and Dept. of Geological Sciences* dell'Università del Nevada, ed è basata su due aspetti fondamentali:

**Relazione sismica**

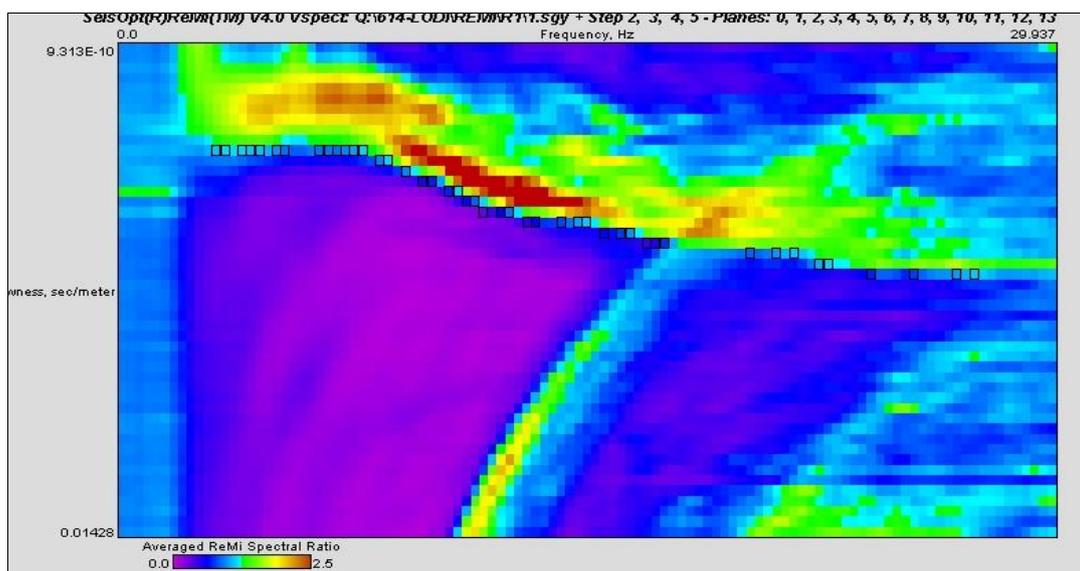
- uno pratico, rappresentato dal fatto che alcuni sistemi di acquisizione di sismica a rifrazione (con dinamica a 24bit) sono in grado di registrare onde di superficie con frequenze fino a 2 Hz per intervalli di tempo sufficientemente lunghi (30 sec);
- uno teorico, sulla base del quale una semplice trasformata bidimensionale (p-f) slowness-frequency della registrazione di un rumore di fondo (microtremor) è in grado di separare le onde di Rayleigh (onde di superficie) da altri tipi di onde che compongono il sismogramma, rendendo possibile il riconoscimento delle vere velocità di fase dalle velocità apparenti.

L'acquisizione dei dati per la definizione della  $v_{s30}$  è stata svolta tramite l'acquisizione e la registrazione del noise ambientale impiegando geofoni da 4.5Hz ed un acquisitore digitale multicanale a 24 canali con dinamica a 24bit. Sono stati acquisiti 2 profili sismici costituiti da stendimenti di 24 geofoni equispaziati di 5 m. Per ogni profilo sono stati raccolti, oltre 30 records di lunghezza di 30 sec. con campionamento ogni 2 ms.

La procedura di elaborazione adottata per la classificazione dei profili del suolo di fondazione ha utilizzato la tecnica sopra descritta utilizzando il pacchetto software specifico (SeisOpt Re.Mi. 2.0 prodotto dalla Optim Software LLC). Come prima fase è stata eseguita un'analisi spettrale del sismogramma (*cf.* Fig.10) che ha consentito di elaborare un'immagine della distribuzione del segnale di velocità sismica in funzione delle diverse frequenze che lo compongono.

Fig. 10

## Analisi spettrale sismogramma prova R1



**Relazione sismica**

Da tale elaborazione è stata poi estrapolata la curva di attenuazione del segnale caratteristico o curva di dispersione (*cfr.* Fig. 11 e 12) e in funzione del suo andamento si è risaliti alla stratigrafia sismica in termini di velocità delle onde di taglio  $v_s$  (*cfr.* Fig.13 ed All. 1).

Fig. 11

Curva di dispersione prove R1 ed R2

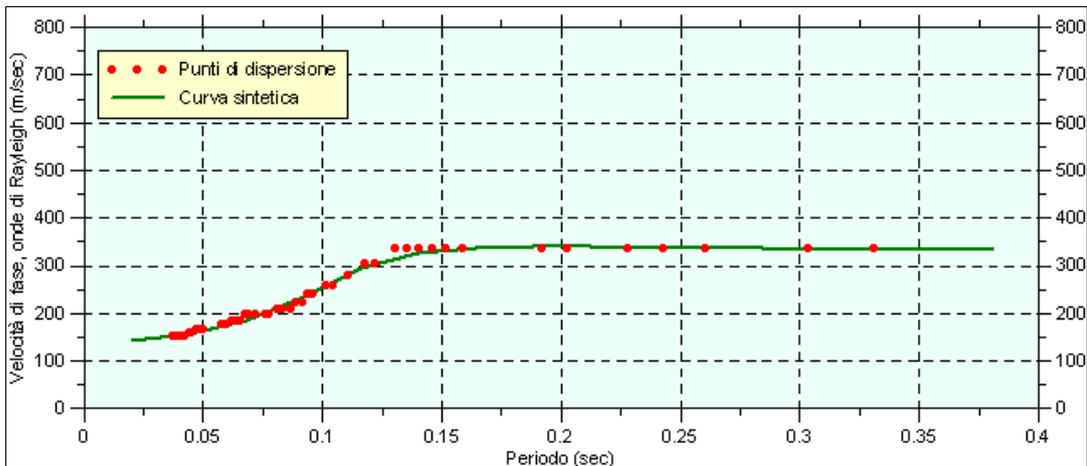


Fig. 12

Curva di dispersione prove R1 ed R2

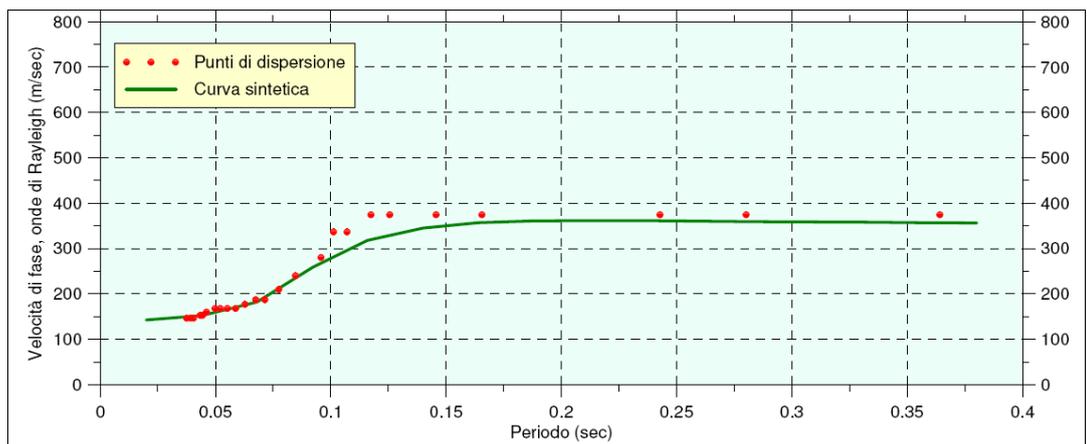
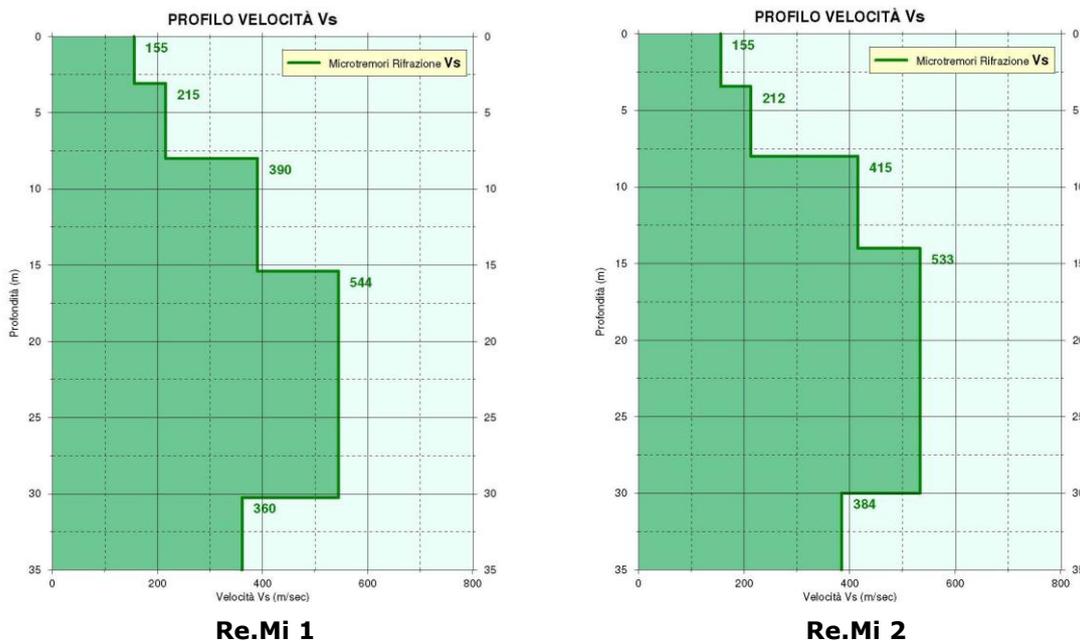


Fig. 13

Grafico velocità di propagazione onde sismiche trasversali  $v_s$  prove R1 e R2

### 3.4 "Masw" (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Il metodo **MASW** è una tecnica di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi e ciò limita i costi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $v_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi.

Le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate lungo uno stendimento lineare di sensori.

Il metodo consente generalmente, di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente, nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 20÷30 m, in funzione della rigidità del suolo. L'elaborazione dei dati con il metodo MASW prevede tre fasi di lavoro:

1. *la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale*
2. *la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica*
3. *la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $v_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $v_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $v_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.*

Il modello di suolo e quindi il profilo di velocità delle onde di taglio verticali possono essere individuati con procedura manuale o con procedura automatica o con una combinazione delle due. Generalmente si assegnano il numero di strati del modello, il coefficiente di Poisson, la densità di massa e si variano lo spessore  $h$  e la velocità  $v_s$  degli strati. Nella procedura manuale l'utente assegna per tentativi diversi valori delle velocità  $v_s$  e degli spessori  $h$ , cercando di avvicinare la curva di dispersione numerica alla curva di dispersione sperimentale.

Nella procedura automatica la ricerca del profilo di velocità ottimale è affidata ad un algoritmo di ricerca globale o locale che cerca di minimizzare l'errore tra la curva sperimentale e la curva numerica. In genere quando l'errore relativo, tra curva sperimentale e curva numerica è compreso tra il 5% e il 10% si ha un soddisfacente accordo tra le due curve e il profilo di velocità delle onde di taglio  $v_s$  e quindi il tipo di suolo sismico conseguente rappresentano una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico.

Per quanto riguarda le modalità esecutive della prova sono stati utilizzati gli stessi stendimenti delle prove Re.Mi., costituiti da allineamento di 24 geofoni spazati di 5 m. La lunghezza delle registrazioni è stata di 1 sec, con un passo di campionamento di 0.250 ms. L'energizzazione, realizzata a distanze di 5 m e dal primo geofono e dall'ultimo geofono, è stata ottenuta con una massa battente di 10 Kg (cfr Foto 2). Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è il "**SurfSeis**" della Kansas Geological surveys. In una prima fase è stata calcolata la velocità di fase o curva di dispersione apparente sperimentale (cfr. Fig.14).

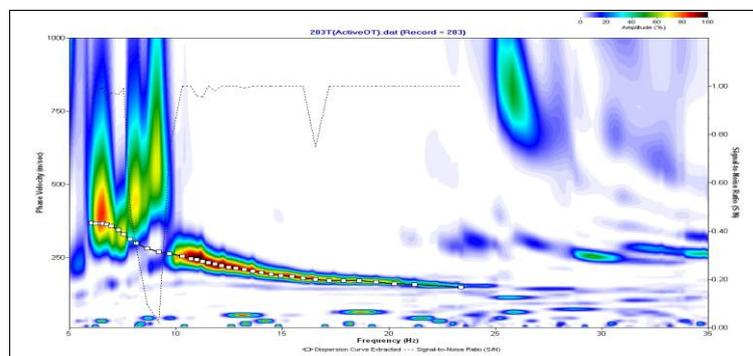
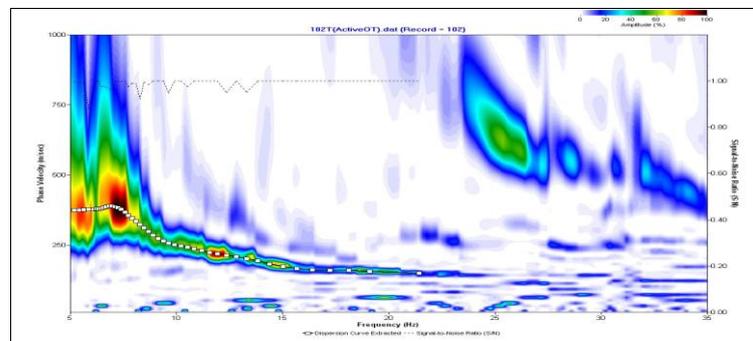
Foto 2

Massa battente di 10 kg e piastra di battuta in alluminio 15x15x2,5cm



Fig. 14

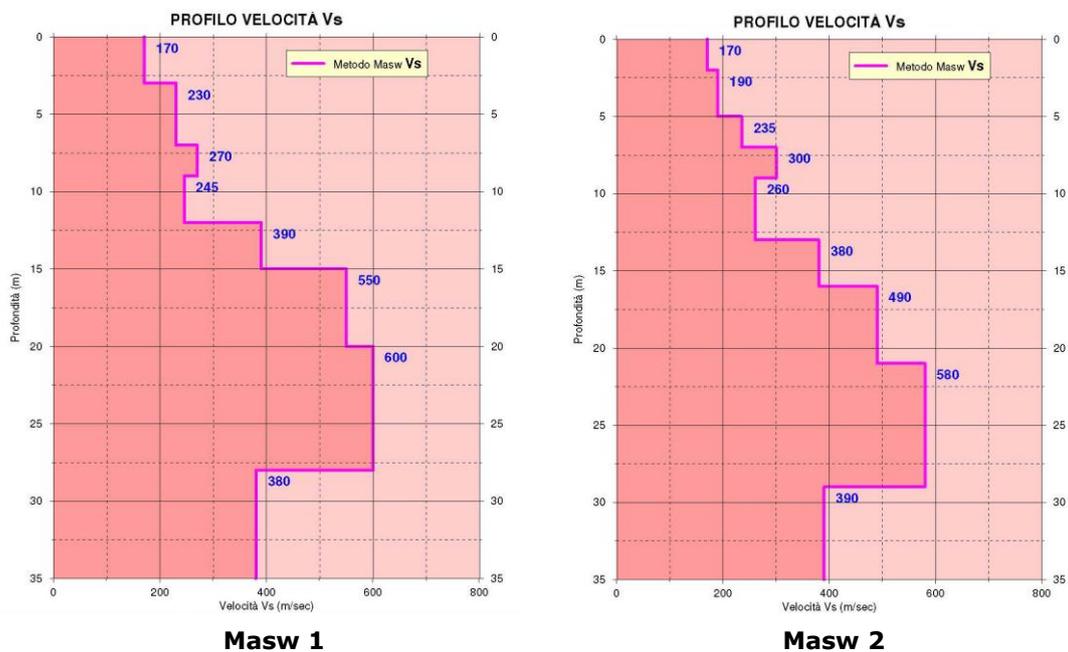
Curva di dispersione apparente sperimentale prova M1 e M2



Successivamente è stato individuato il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $v_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $v_s$  e di compressione  $v_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $v_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase sperimentale e la velocità di fase numerica corrispondente al modello di velocità assegnato. La stratigrafia sismica in termini di velocità delle onde di taglio  $v_s$  nella Fig. 15 è più in dettaglio nell'Al.1.

Fig. 15

Grafico della velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali  $v_s$  prove M1 e M2



#### 4. MODELLO SISMICO E PARAMETRI DINAMICI DEL SOTTOSUOLO

Il modello sismico del sottosuolo è stato definito sulla base della variazione con la profondità della velocità delle onde di taglio  $v_s$  ricavata con le prove sismiche. Dall'analisi dei grafici riportati nel capitolo precedente i profili di velocità ottenuti con le due tipologie di prove eseguite (Re.mi e Masw) risultano sostanzialmente simili, con un maggior dettaglio nella definizione degli strati superficiali nella prova Masw. Il modello sismico delle zone esaminate (area sud e nord dello stabilimento) è stato definito combinando i risultati ottenuti con le due metodologie d'indagine.

In particolare si è tenuto conto dei dati della prova Masw per quanto riguarda gli strati superficiali individuati con maggior precisione e, laddove la stratigrafia risultava simile, per ogni strato è stata fatta una media della velocità delle onde di taglio  $v_s$  ricavata con le due differenti metodologie d'indagine. Si riporta qui di seguito la stratigrafia sismica per le due aree indagate e nel grafico di figura 16 i relativi profili finali di velocità delle onde di taglio  $v_s$ .

#### **Area sud**

<b>STRATO 1:</b> prof. da 0.00÷3.00 m	$v_s = 162$ m/s
<b>STRATO 2:</b> prof. da 3.00÷7.00 m	$v_s = 222$ m/s
<b>STRATO 3:</b> prof. da 7.00÷9.00 m	$v_s = 270$ m/s
<b>STRATO 4:</b> prof. da 9.00÷12.0 m	$v_s = 245$ m/s
<b>STRATO 5:</b> prof. da 12.0÷15.0 m	$v_s = 390$ m/s
<b>STRATO 6:</b> prof. da 15.0÷20.0 m	$v_s = 550$ m/s
<b>STRATO 7:</b> prof. da 20.0÷28.0 m	$v_s = 600$ m/s
<b>STRATO 8:</b> prof. da 28.0÷35.0 m	$v_s = 370$ m/s

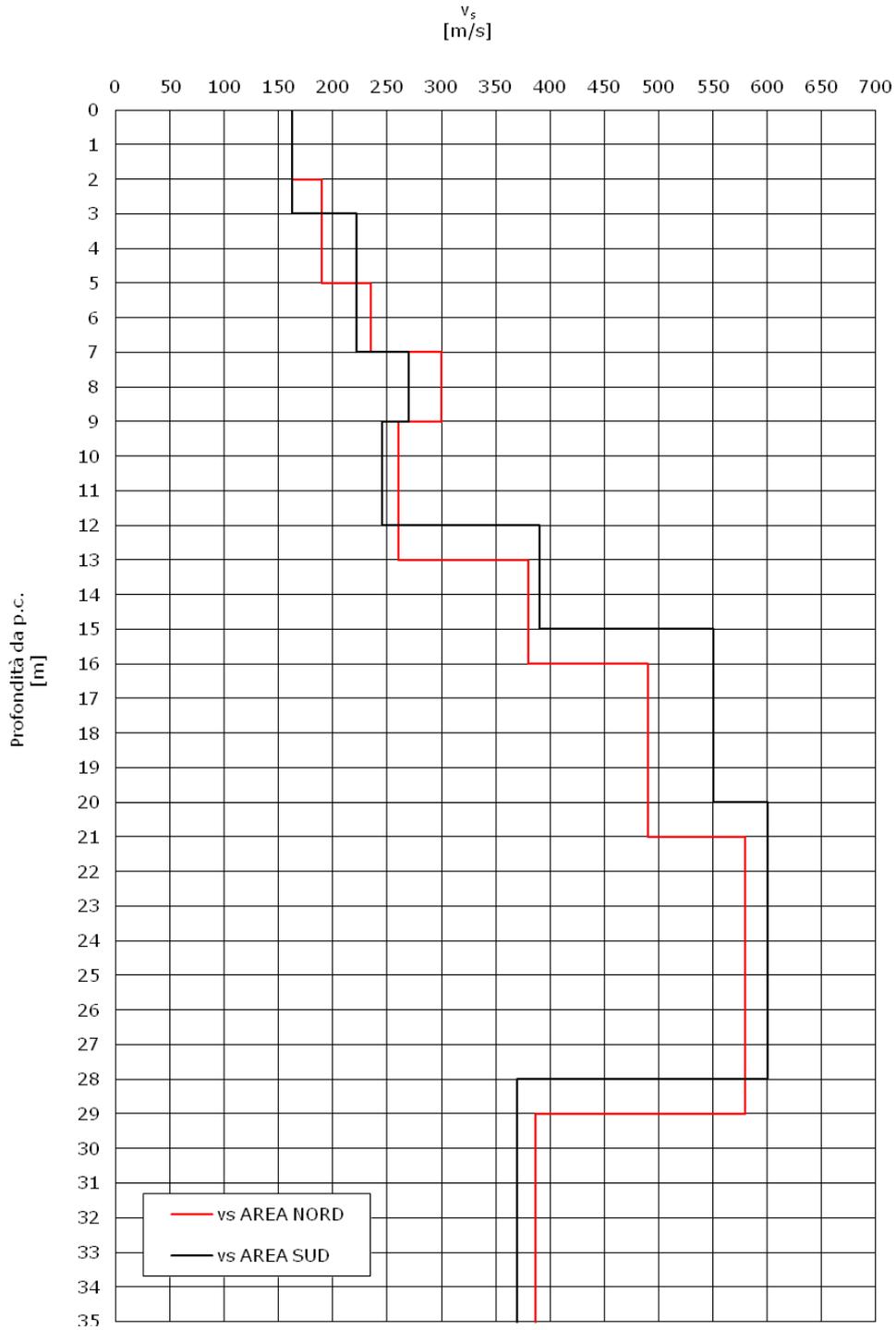
#### **Area nord**

<b>STRATO 1:</b> prof. da 0.00÷2.00 m	$v_s = 162$ m/s
<b>STRATO 2:</b> prof. da 2.00÷5.00 m	$v_s = 190$ m/s
<b>STRATO 3:</b> prof. da 5.00÷7.00 m	$v_s = 235$ m/s
<b>STRATO 4:</b> prof. da 7.00÷9.00 m	$v_s = 300$ m/s
<b>STRATO 5:</b> prof. da 9.00÷13.0 m	$v_s = 260$ m/s
<b>STRATO 6:</b> prof. da 13.0÷16.0 m	$v_s = 380$ m/s
<b>STRATO 7:</b> prof. da 16.0÷21.0 m	$v_s = 490$ m/s
<b>STRATO 8:</b> prof. da 21.0÷29.0 m	$v_s = 580$ m/s
<b>STRATO 9:</b> prof. da 29.0÷35.0 m	$v_s = 387$ m/s

La determinazione della categoria di profilo stratigrafico del suolo di fondazione in accordo con quanto indicato nelle NTC/2008 è stata eseguita con il valore  $V_{S30}$  ricavato con le prove sismiche RE.MI. e MASW calcolato con la seguente relazione:

Fig. 16

Grafico profilo finale  $v_s$  nell'area sud e nord dello stabilimento



**Relazione sismica**

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

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. Utilizzando la formula sopra riportata sono stati ottenuti i seguenti valori di  $V_{S30}$  riferiti al piano campagna:

$$\begin{array}{ll} \text{Re.mi. 1} & V_{S30} = 340 \text{ m/s} & \text{Re.mi. 2} & V_{S30} = 340 \text{ m/s} \\ \text{Masw 1} & V_{S30} = 335 \text{ m/s} & \text{Masw 2} & V_{S30} = 325 \text{ m/s} \end{array}$$

a cui corrisponde la categoria di **suolo di fondazione di Tipo C** ovvero "depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s".

## Categorie di sottosuolo NTC/2008

Categoria	Profilo stratigrafico	Parametri		
		$V_{S30}$ (m/s)	$N_{SPT}$	$C_u$ (kPa)
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 3 m</i>	> 800	-	-
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità</i>	360÷800	>50	>250
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità</i>	180÷360	15÷50	70÷250
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità</i>	<180	<15	<70
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con <math>V_{S30} &gt; 800</math>m/s</i>			

Sulla base della variazione con la profondità della  $v_s$  sono stati determinati con le relazioni sotto indicate il modulo dinamico di taglio  $G_0$  ed il modulo elastico dinamico  $E_0$  a piccole deformazioni dove  $\gamma$  è il peso di volume naturale,  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $9.81 \text{ m/sec}^2$ ). Per il calcolo di  $E_0$  il coefficiente di *Poisson*  $\nu$  è stato assunto pari 0.3. L'andamento con la profondità dei parametri dinamici  $G_0$  ed  $E_0$  è riportato nei grafici di Fig. 17 e 18.

$$G_0 = \frac{\gamma}{g} \cdot V_S^2 \qquad E_0 = 2 \cdot G_0 \cdot (1 + \nu)$$

Area sud				
Strato sismico [-]	Profondità [m]	$V_s$ [m/s]	$G_0$ [MPa]	$E_0$ [MPa]
STRATO 1	0.00÷3.00	162	48	125
STRATO 2	3.00÷7.00	222	90	234
STRATO 3	7.00÷9.00	270	134	348
STRATO 4	9.00÷12.00	245	110	286
STRATO 5	12.00÷15.00	390	279	725
STRATO 6	15.00÷20.00	550	555	1443
STRATO 7	20.00÷28.00	600	660	1716
STRATO 8	28.00÷35.00	370	251	652
Area nord				
	Profondità [m]	$V_s$ [m/s]	$G_0$ [MPa]	$E_0$ [MPa]
STRATO 1	0.00÷2.00	162	48	125
STRATO 2	2.00÷5.00	190	66	171
STRATO 3	5.00÷7.00	235	101	262
STRATO 4	7.00÷9.00	300	165	429
STRATO 5	9.00÷13.00	260	124	322
STRATO 6	13.00÷16.00	380	265	689
STRATO 7	16.00÷21.00	490	440	1144
STRATO 8	21.00÷29.00	580	617	1604
STRATO 9	29.00÷35.00	387	275	715

## 5. PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE E VALUTAZIONE DELL'ACCELERAZIONE MASSIMA DEL SITO AI SENSI DELLE NTC/2008

Le azioni sismiche di progetto in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

Fig. 17

Grafico modulo dinamico di taglio  $G_0$  nell'area sud e nord dello stabilimento

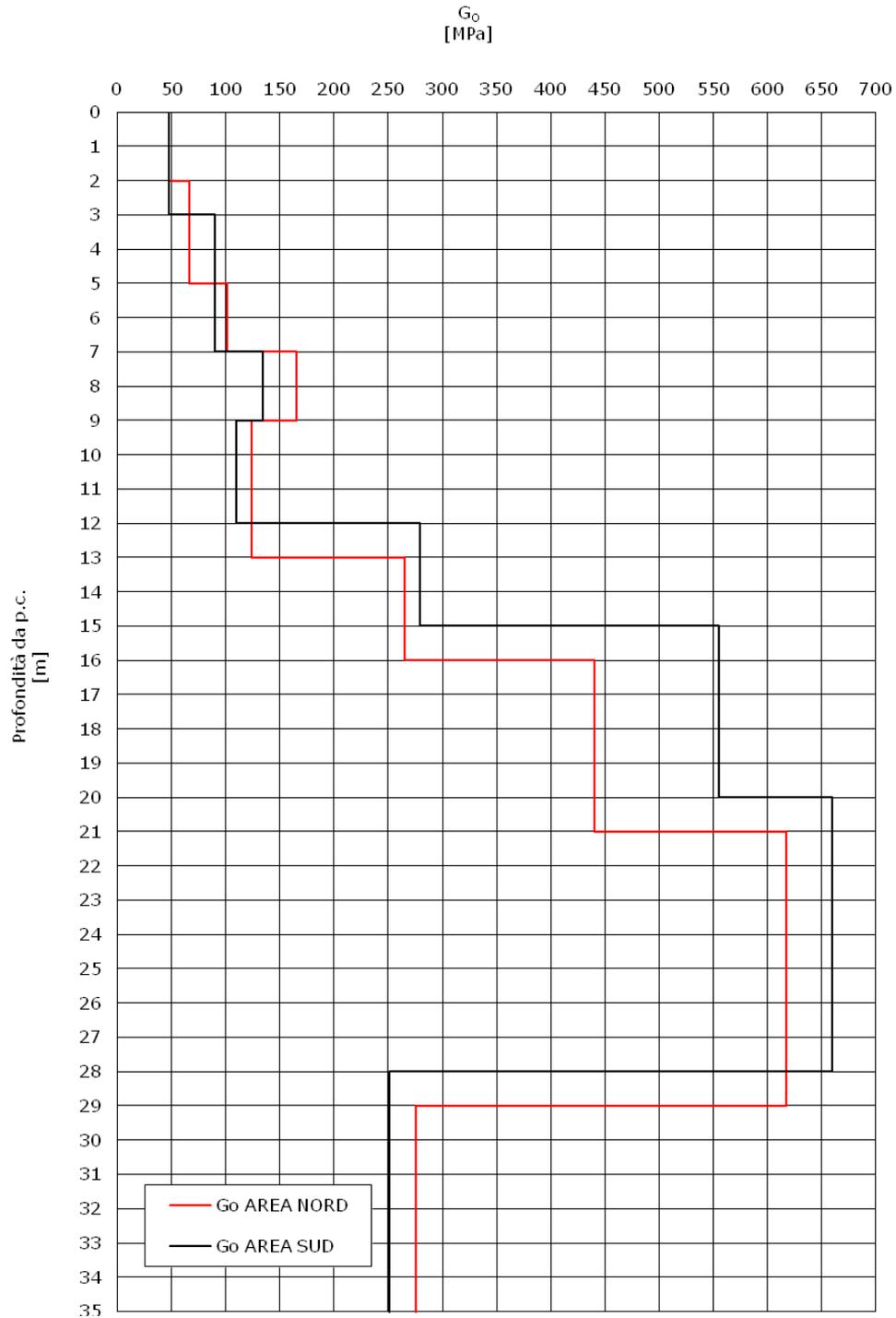
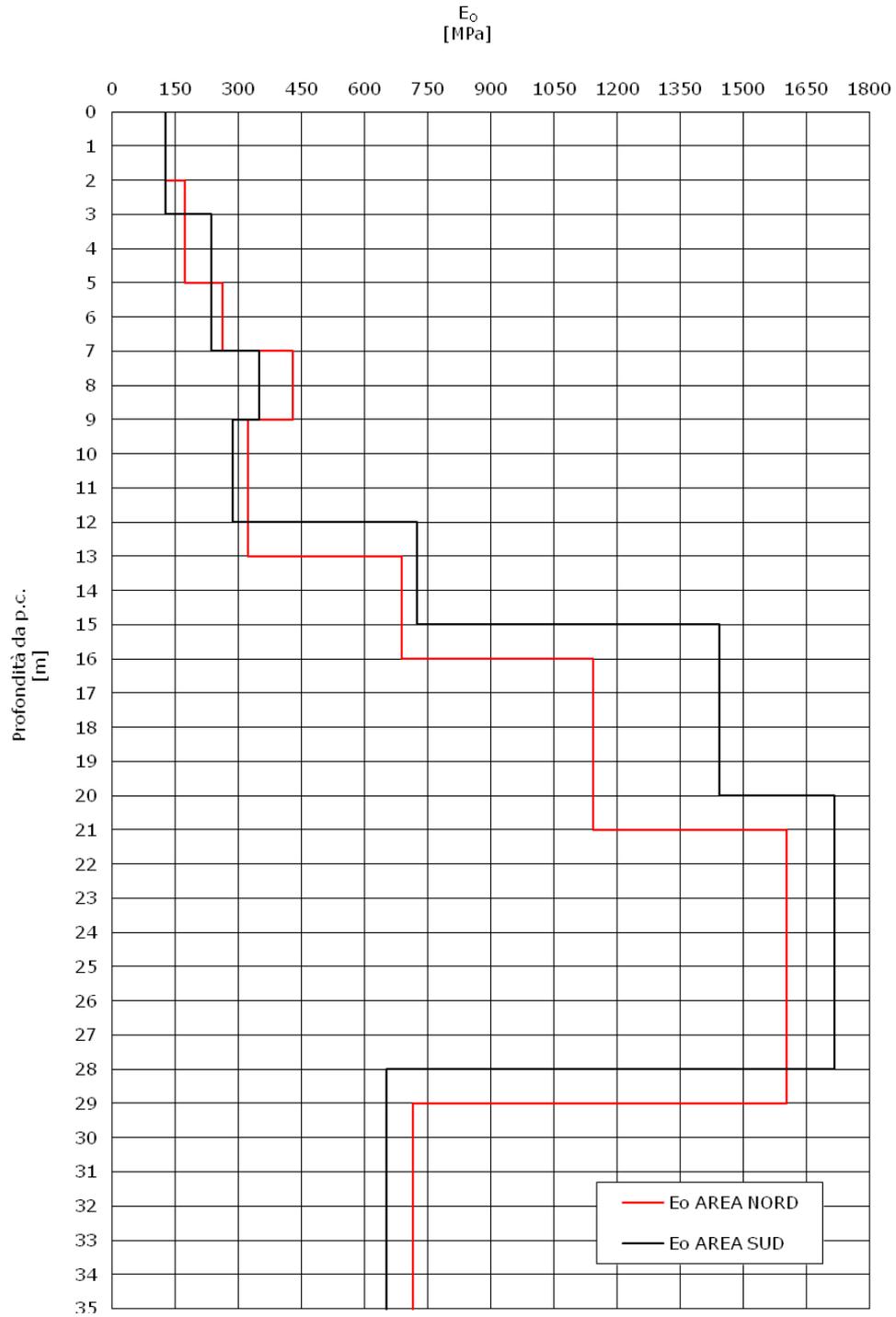


Fig. 18

Grafico modulo elastico dinamico  $E_0$  nell'area sud e nord dello stabilimento



**Relazione sismica**

La valutazione della pericolosità sismica locale è stata definita utilizzando la procedura indicata nelle NTC/2008 e nella successiva Circolare n°617/2009. In tal senso la stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido ( $V_s > 800$  m/s), viene definita mediante un approccio "sito dipendente" e non più tramite un criterio "zona dipendente". Le NTC/08 stabiliscono il principio per cui le azioni sismiche sulle costruzioni si valutano in relazione alla pericolosità del sito definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa su suolo di categoria A ( $a_g$ ) e del corrispondente spettro di risposta elastico. Per accelerazione massima attesa si intende il picco del segnale che ha una certa probabilità  $P_{VR}$  di essere superato in un periodo di riferimento  $V_R$ . Il periodo di riferimento  $V_R$  viene determinato come prodotto della vita nominale della costruzione  $V_N$  e del coefficiente d'uso  $C_U$ . La vita nominale è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Il valore del coefficiente d'uso dipende dalla gravità delle perdite dovute al raggiungimento di un determinato stato limite e quindi riguarda "l'importanza" della struttura. La coppia  $P_{VR}$ ,  $V_R$  che identifica l'accelerazione massima di riferimento per le azioni si può sintetizzare nel periodo di ritorno  $T_R$ . Per definire lo spettro elastico in accelerazione oltre ad  $a_g$  sono necessari altri due parametri:  $F_0$  cioè il valore del rapporto tra il massimo dello spettro e  $a_g$  per quel sito (amplificazione spettrale) e  $T_c^*$ , che rappresenta il periodo finale del ramo piatto dello spettro.

Le NTC/08 forniscono nell'Allegato B le tabelle dei parametri che definiscono l'azione sismica, con i valori dei tre parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$ , per 10751 nodi di un reticolo di riferimento, riferiti a 9 valori del tempo di ritorno  $T_R$  (30 anni, 50 anni, 72 anni, 101 anni, 140 anni, 201 anni, 475 anni, 975 anni, 2475 anni). I punti di riferimento sono definiti in termini di Latitudine e Longitudine. Per un qualunque punto del territorio nazionale non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$  di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici, attraverso la seguente espressione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 p_i}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

- $p$  valore del parametro di interesse nel punto in esame  
 $p_i$  valore del parametro di interesse nell' $i$ -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame  
 $d_i$  distanza del punto in esame dall' $i$ -esimo punto della maglia suddetta

**Relazione sismica**

Considerando i seguenti valori: Vita nominale  $V_N \geq 50$  anni (opere ordinarie Rif. Tab. 2.4.I NTC/08), Classe d'uso II (Rif. Paragrafo 2.4.2 NTC/08) e Coefficiente d'uso  $C_U$  pari a 1 (Rif. Tab. 2.4.II NTC/08) il periodo di riferimento  $V_R$  è pari a 50 anni. Utilizzando le relazioni di Tab. C.3.2.1. CIRC/09, per  $V_R = 100$  anni si ottengono i seguenti periodi di ritorno  $T_R$  associati allo Stato Limite di Operatività SLO, Stato Limite del Danno SLD, Stato Limite di Salvaguardia della Vita SLV e Stato Limite di prevenzione del Collasso SLC.

81% Operatività (SLO)	$T_R = 30$ anni
63% Danno (SLD)	$T_R = 50$ anni
10% Salvaguardia della vita (SLV)	$T_R = 475$ anni
5% Collasso (SLC)	$T_R = 975$ anni

Per l'area sud (Latitudine 45,340871N-Longitudine 9,501426E) e nord (Latitudine 45,343009N-Longitudine 9,501904E) dello stabilimento le forme spettrali previste dalle NTC/2008 definite dai parametri  $a_g$ ,  $F_0$ , e  $T_c^*$  riferiti ai suddetti periodi di ritorno  $T_R$  e Stato Limite Ultimo calcolati con il programma "Spettri-NTC.ver.1.03" realizzato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, sono riportati nelle tabelle sottostanti, mentre nella Fig.19 sono visualizzati gli spettri di risposta elastici per i diversi stati limite.

Area sud				
STATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [g]	$T_c^*$ [s]
SLO	30	0.026	2.495	0.197
SLD	50	0.032	2.548	0.212
SLV	475	0.070	2.600	0.287
SLC	975	0.088	2.604	0.299

Area nord				
STATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [g]	$T_c^*$ [s]
SLO	30	0.026	2.495	0.197
SLD	50	0.032	2.548	0.212
SLV	475	0.071	2.599	0.287
SLC	975	0.088	2.603	0.299

L'accelerazione massima attesa al sito  $a_{max}$  si ricava dal valore dell'accelerazione orizzontale massima del sito  $a_g$  su suolo rigido con la seguente relazione

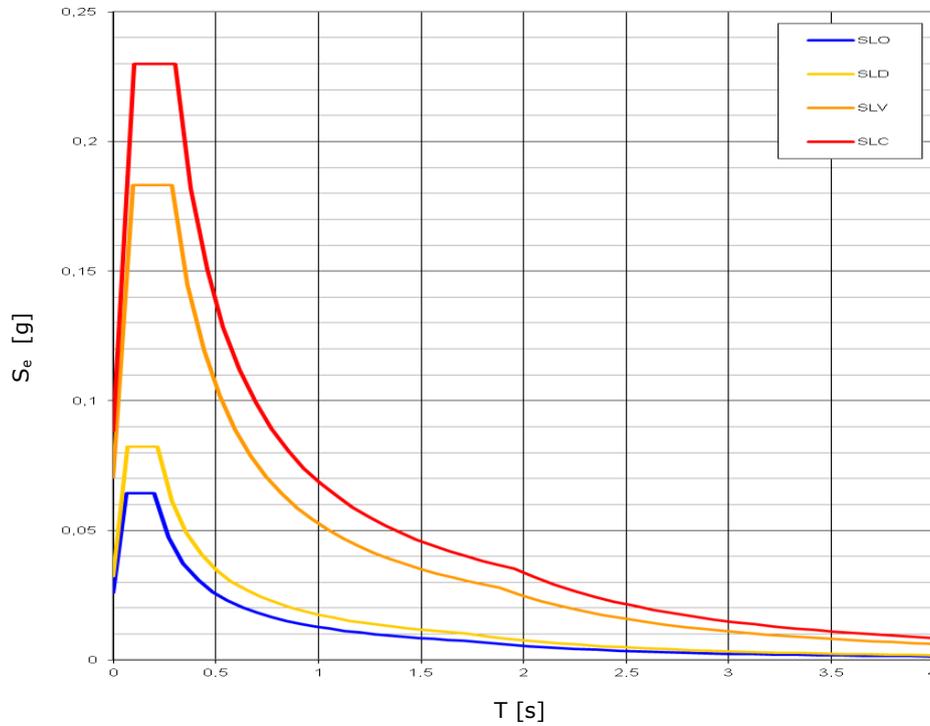
$$a_{max} = a_g \cdot S_S \cdot S_T$$

$S_S$  coefficiente di amplificazione stratigrafica indicato nella Tab. 3.2.V delle NTC/2008 relativo a ciascuna classe di sottosuolo

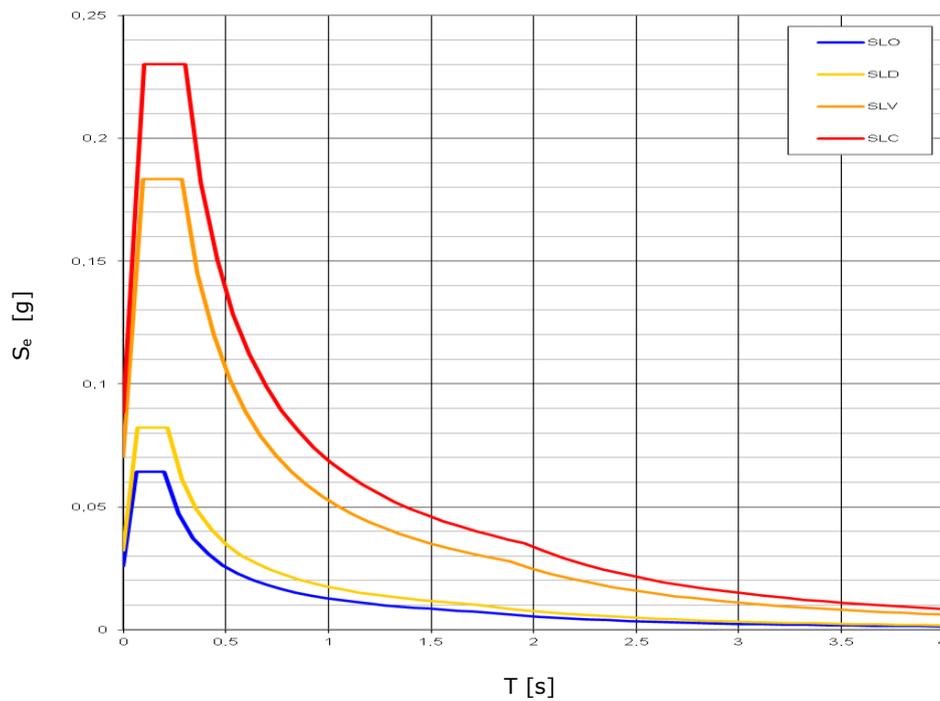
$S_T$  coefficiente di amplificazione topografica riportato nella Tab. 3.2.VI delle NTC/2008

Fig.19

Spettri di risposta elastici di riferimento per i diversi Stati Limite - Area sud



Spettri di risposta elastici di riferimento per i diversi Stati Limite - Area nord



**Relazione sismica**

Le accelerazioni orizzontali massime del sito riferite agli SLO, SLD, SLV e SLC considerando un suolo C ( $S_s=1.5$ ) ed essendo la morfologia dell'area pianeggiante ( $S_T=1$ ) sono le seguenti:

STATO LIMITE		$a_{max}$ Area sud	$a_{max}$ Area nord
Stati limite di esercizio	SLO	0.039	0.039
	SLD	0.048	0.048
Stati limite ultimi	SLV	0.105	0.1065
	SLC	0.132	0.132

Utilizzando il valore dell'accelerazione massima del sito  $a_{max}$  e trascurando il coefficiente di riduzione  $\beta_m$  in quanto la sua applicazione per le fondazioni superficiali è oggetto di discussione in campo scientifico e la normativa non è sufficientemente esaustiva, si ottengono i seguenti coefficienti sismici di accelerazione orizzontale  $k_h$  e verticale  $k_v$ .

STATO LIMITE		$k_h$ Area sud	$k_v$ Area sud	$k_h$ Area nord	$k_v$ Area nord
Stati limite di esercizio	SLO	0.039	0.0195	0.039	0.0195
	SLD	0.048	0.0240	0.048	0.0240
Stati limite ultimi	SLV	0.105	0.0525	0.1065	0.0532
	SLC	0.132	0.0660	0.132	0.0660

## 6. VALUTAZIONE DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE AI SENSI DELLA D.G.R. N. IX/2616 DEL 30.11.2011

La valutazione dell'amplificazione sismica locale è stata definita anche con la metodologia prevista dalla Regione Lombardia nella delibera della giunta regionale n.IX/2616 del 30 novembre 2011 che prevede tre livelli di approfondimento in funzione della zona sismica di appartenenza e degli scenari di pericolosità sismica locale PSL definiti nell'All. 5 della suddetta delibera regionale. In tal senso come indicato nella "Carta della pericolosità sismica locale del territorio comunale" lo scenario di riferimento è PSL Z4a "zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi". Sulla base di quanto indicato nel paragrafo 1.4.3 per gli scenari PSL Z4 ricadenti in zone sismiche 4 è obbligatorio eseguire una verifica di secondo livello, che consiste nella valutazione del fattore di amplificazione  $F_a$  del sito nel modo indicato al punto 2.2.2. dell'All.5, per gli edifici strategici e rilevanti elencati nel d.d.u.o. n°19904/03. Anche se gli edifici in progetto non rientrano nell'elenco di cui sopra si è ritenuto opportuno eseguire l'approfondimento di secondo livello. Tale procedura permette, in relazione alle caratteristiche litologiche, geotecniche e sismiche una valutazione semiquantitativa degli effetti di amplificazione sismica attesi.

**Relazione sismica**

In particolare attraverso la definizione del fattore di amplificazione viene valutato il grado di protezione raggiunto dalla normativa vigente nel tenere in considerazione gli effetti sismici. Più precisamente essendo il sito in esame collocato in pianura si è proceduto a definire il fattore di amplificazione relativo agli effetti litologici mediante le Schede-Litologia opportunamente predisposte dal Politecnico di Milano per conto della Regione Lombardia. La valutazione del grado di protezione viene effettuata in termini di contenuti energetici, confrontando il valore di  $F_a$  ottenuto dalle schede di valutazione con un parametro di analogo significato definito come "Valore di Soglia" calcolato per ciascun comune della Lombardia dal Politecnico di Milano. Tale valore soglia è stato calcolato per le diverse categorie di suolo relativamente ai due intervalli del periodo proprio di oscillazione delle tipologie edilizie presenti con maggior frequenza in Lombardia, ossia per  $0.1s < T < 0.5s$  (intervallo riferito a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide) e per  $0.5s < T < 1.5s$  (intervallo riferito a strutture più alte e più flessibili). Tali parametri sono contenuti nel file "soglie\_lomb.xls" della banca dati regionale e rappresentano i valori di soglia oltre i quali lo spettro proposto dalla normativa risulta insufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito. La procedura prevede pertanto di valutare il valore di  $F_a$  con le schede di valutazione e di confrontarlo con il corrispondente valore di soglia. Si possono presentare quindi due situazioni:

1. il valore di  $F_a$  determinato tramite scheda è inferiore al valore di soglia corrispondente: la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito e quindi si applica lo spettro previsto dalla normativa;
2. il valore di  $F_a$  è superiore al valore di soglia corrispondente: la normativa è insufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica e quindi è necessario in fase di progettazione edilizia, o effettuare analisi più approfondite oppure utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore.

Nella tabella sottostante sono riportati i valori soglia relativi ai due intervalli sopra menzionati per il comune di Lodi.

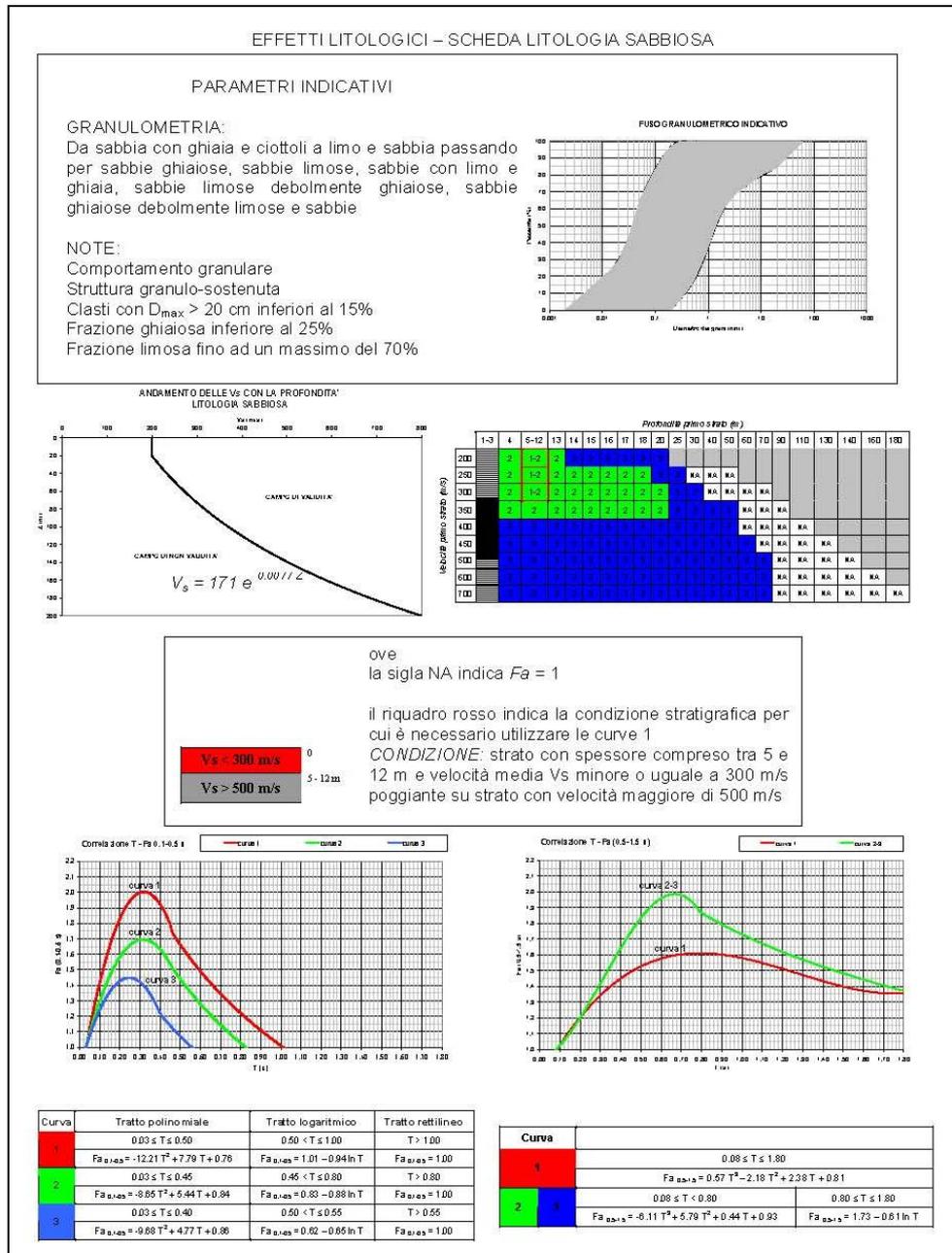
Comune di Lodi			
Zona sismica 4			
Valori di Soglia di $F_a$ nell'intervallo $0.1s < T < 0.5s$			
Suolo B	Suolo C	Suolo D	Suolo E
1.4	1.8	2.2	1.9
Valori di Soglia di $F_a$ nell'intervallo $0.5s < T < 1.5s$			
Suolo B	Suolo C	Suolo D	Suolo E
1.7	2.4	4.1	3.0

**Relazione sismica**

Per il sito in esame sulla base delle caratteristiche litologiche del sottosuolo e confrontando l'andamento con la profondità della velocità delle onde di taglio  $v_s$  (determinata con le prove sismiche) con quello riportato nelle schede litologiche fornite dalla Regione Lombardia, è stata individuata come scheda di riferimento quella a litologia sabbiosa (cfr. Fig. 20).

Fig. 20

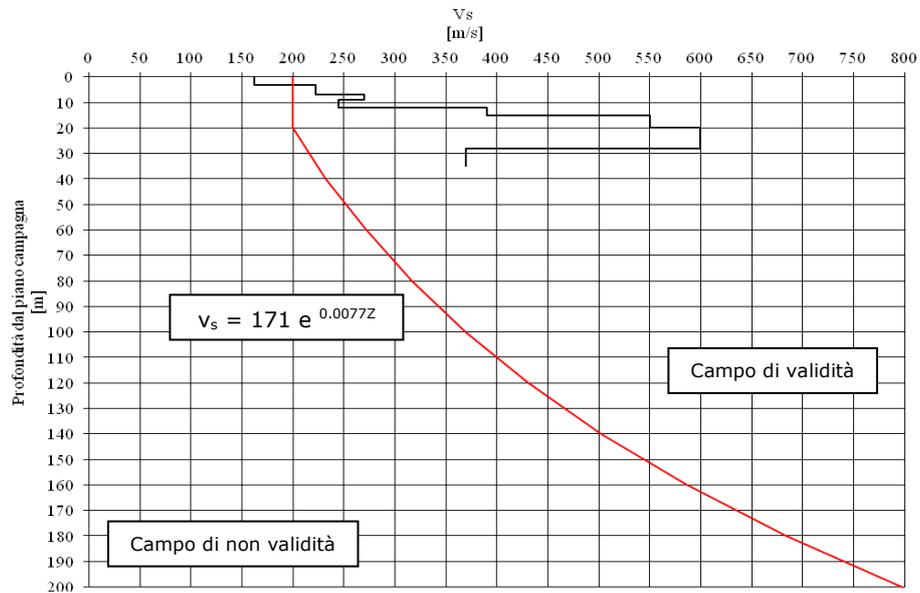
Scheda litologia sabbiosa - All. 5 alla D.g.r. n.IX/2616 del 30 novembre 2011



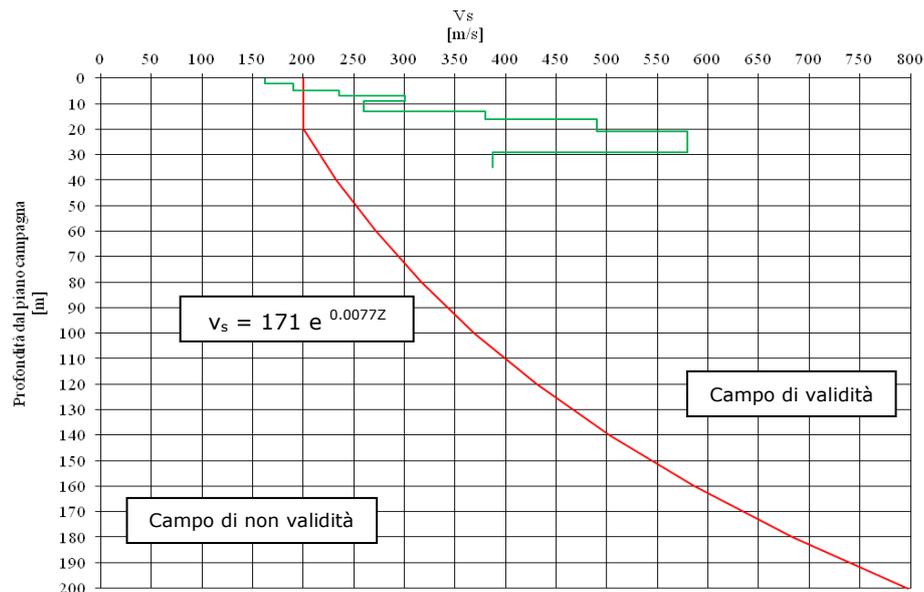
In particolare come visualizzato in Fig. 21 si è provveduto a riportare i valori delle  $v_s$  relativi alle due aree indagate nell'apposito diagramma per verificarne la congruità con il campo di validità della scheda di riferimento. Dai grafici emerge che tutti i valori delle  $v_s$  calcolate ad esclusione dei primi metri stanno al di sopra della linea rossa che divide il campo di validità (sopra la linea) dal campo di non validità (sotto la linea).

Fig. 21

Andamento della velocità delle onde di taglio  $v_s$  con la profondità - area sud



Andamento della velocità delle onde di taglio  $v_s$  con la profondità - area nord



**Relazione sismica**

Successivamente in funzione della velocità delle onde di taglio  $v_s$  dello strato superficiale e del suo spessore è stata selezionata la curva più appropriata per la valutazione del fattore di amplificazione  $F_a$  negli intervalli 0.1s-0.5s e 0.5s-1.5s utilizzando la matrice di Fig.22. Nel caso specifico, lo strato superficiale ha uno spessore inferiore a 4 m pertanto nella scelta della curva è stato assunto lo strato superficiale equivalente al quale è stata assegnata una velocità  $v_s$  calcolata come media pesata dei valori di  $v_s$  degli strati superficiali la cui somma supera i 4 m. Lo spessore e la velocità  $v_s$  dello strato superficiale nell'area sud ed in quella nord sono i seguenti:

Strato superficiale (area sud): spessore = 7 m       $v_s = 196$  m/s

Strato superficiale (area nord): spessore = 5 m       $v_s = 179$  m/s

In entrambi i casi la velocità  $v_s$  dello strato sottostante è inferiore a 500 m/s, pertanto è stata scelta la curva 2 (verde).

Fig. 22

Matrice

		Profondità primo strato (m)																							
		1-3	4	5-12	13	14	15	16	17	18	20	25	30	40	50	60	70	90	110	130	140	160	180		
Velocità primo strato (m/s)	200		2	1-2	2	3	3	3	3	3	3	3													
	250		2	1-2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	NA	NA	NA									
	300		2	1-2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	NA	NA	NA	NA							
	350		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	NA	NA	NA					
	400		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA				
	450		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA			
	500		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA	NA		
	600		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
700		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

Il passo successivo prevede di valutare il periodo proprio di vibrazione del sito T calcolato fino alla profondità in cui il valore della velocità  $v_s$  è uguale o superiore a 800 m/s. Il periodo proprio di vibrazione del sito T è stato calcolato con la relazione sotto riportata

$$T = \frac{4 \cdot \sum_{i=1,N} h_i}{\sum_{i=1,N} v_{si} \cdot h_i}$$

$$T = \frac{\sum_{i=1,N} h_i}{\sum_{i=1,N} v_{si} \cdot h_i}$$

**Relazione sismica**

dove  $h_i$  e  $v_{si}$  sono rispettivamente lo spessore e la velocità dello strato  $i$ -esimo del modello. Il valore di  $T$  calcolato è risultato pari a 0.44 s per l'area sud e 0.47 s per l'area nord. I valori di  $F_a$  relativi all'intervallo  $0.1s < T < 0.5s$  sono stati calcolati utilizzando gli abachi visualizzati nella Fig. 23 e le seguenti formule:

$F_{a\ 0.1s-0.5s} = -8.65T^2 + 5.44T + 0.84 = 1.56$	<b>Fa 0.1s-0.5s = 1.56</b>	<b>Area sud</b>
$F_{a\ 0.5s-1.5s} = -6.11T^3 + 5.79T^2 + 0.44T + 0.93 = 1.72$	<b>Fa 0.5s-1.5s = 1.72</b>	<b>Area sud</b>
$F_{a\ 0.1s-0.5s} = -8.65T^2 + 5.44T + 0.84 = 1.56$	<b>Fa 0.5s-1.5s = 1.48</b>	<b>Area nord</b>
$F_{a\ 0.5s-1.5s} = -6.11T^3 + 5.79T^2 + 0.44T + 0.93 = 1.72$	<b>Fa 0.5s-1.5s = 1.78</b>	<b>Area nord</b>

Fig. 23

Grafico correlazione T-Fa - Intervallo  $0.1s < T < 0.5s$

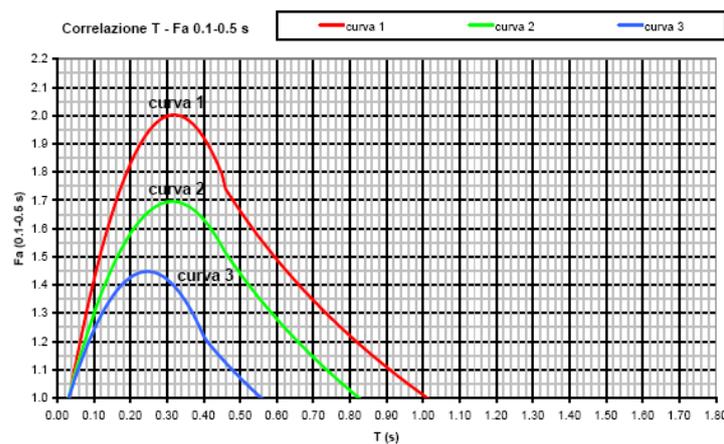
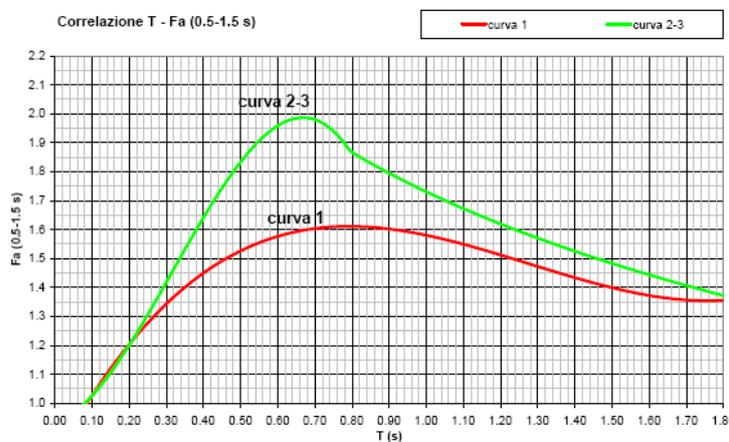


Grafico correlazione T-Fa - Intervallo  $0.5s < T < 1.5s$



I valori di  $F_a$  ottenuti per il sito in esame risultano per entrambi i periodi di oscillazione inferiori al valore di soglia fornito dalla Regione Lombardia, pertanto la normativa nazionale risulta sufficientemente cautelativa nei confronti dei fenomeni di amplificazione sismica locale. Gli edifici in progetto sono delle strutture alte ( $H = 15$  m) e flessibili quindi caratterizzate da un periodo proprio di oscillazione nell'intervallo  $0.5s < T < 1.5s$ , a cui corrisponde, per un suolo C, un valore di soglia del fattore di amplificazione  $F_a = 2.4$ . I valori di  $F_a$  calcolati nell'area sud e nord dello stabilimento sono pari a 1.72 e 1.78 inferiori al valore di soglia fornito dalla regione lombardia. Quindi essendo  $F_a \text{ calcolato} < F_a \text{ normativa}$  non è necessario eseguire l'approfondimento del 3° livello.

## 7. VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE DEL TERRENO

La suscettibilità alla liquefazione dei terreni di fondazione è stata verificata utilizzando il "metodo semplificato" originariamente sviluppato da Seed e Idriss (1971) basato sul numero di colpi della prova SPT, correlati con un parametro chiamato *domanda di resistenza ciclica indotta dal sisma CSR*. Successivamente sono state introdotte nuove procedure che utilizzano i risultati delle prove penetrometriche statiche CPT e le misure della velocità delle onde di taglio  $v_s$ . La procedura di calcolo è suddivisa nelle seguenti fasi:

1. calcolo della domanda di resistenza ciclica alla liquefazione CSR
2. determinazione della capacità di resistenza del terreno alla liquefazione CRR utilizzando i dati forniti dalle prove SPT, CPT e sismiche ( $v_s$ )
3. valutazione del potenziale di liquefazione mediante il calcolo del fattore di sicurezza  $FS_L = CRR/CSR$

Le relazioni per il calcolo dei parametri CSR e CRR sono le seguenti:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \cdot \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d$$

$a_{max}$  = accelerazione massima

$g$  = accelerazione di gravità

$\sigma'_{vo}$ ,  $\sigma_{vo}$  = pressione verticale efficace e totale

$r_d$  = fattore di riduzione dello sforzo di taglio ciclico (See e Idriss, 1971)

$$CRR = a \cdot \left( \frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + \frac{b}{V_{S1c} - V_{S1}} - \frac{b}{V_{S1c}}$$

$$V_{S1} = V_s \cdot \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.25}$$

**Relazione sismica**

$V_s$  = velocità onde di taglio

$V_{s1c}$  = valore soglia della velocità delle onde di taglio normalizzata oltre il quale la liquefazione non avviene pari a 215 m/s

Come visualizzato nel grafico di Fig. 24 per le aree indagate i valori della velocità delle onde di taglio normalizzati  $V_{s1}$  nei primi 20 m di profondità risultano tutti superiori a 215 m/s che rappresenta il valore soglia  $V_{s1c}$  oltre il quale la liquefazione non avviene (cfr Fig.25). In questo caso il calcolo del parametro CRR non ha significato. Pertanto per il sito in esame si può ritenere che la possibilità che si verifichi liquefazione sia nulla o estremamente bassa.

Fig. 24  
Grafico velocità onde di taglio normalizzata  $V_{s1}$

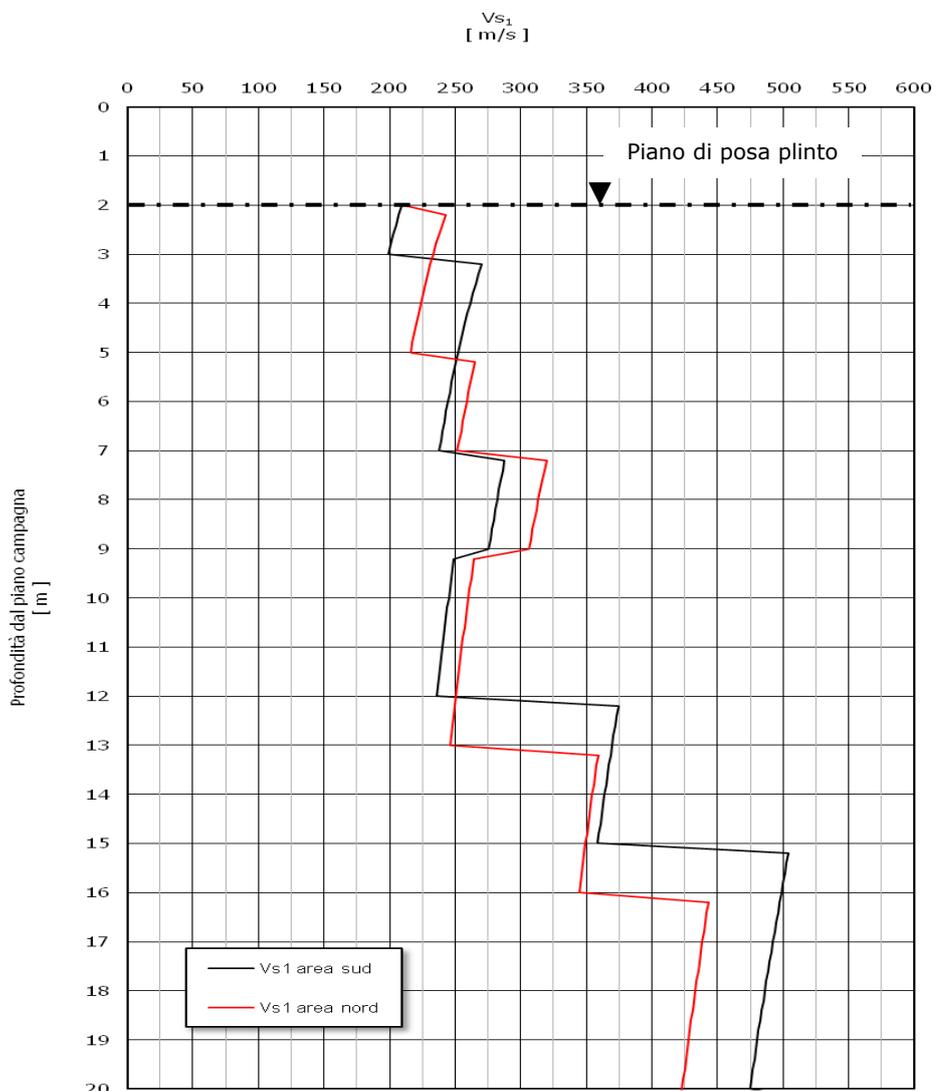
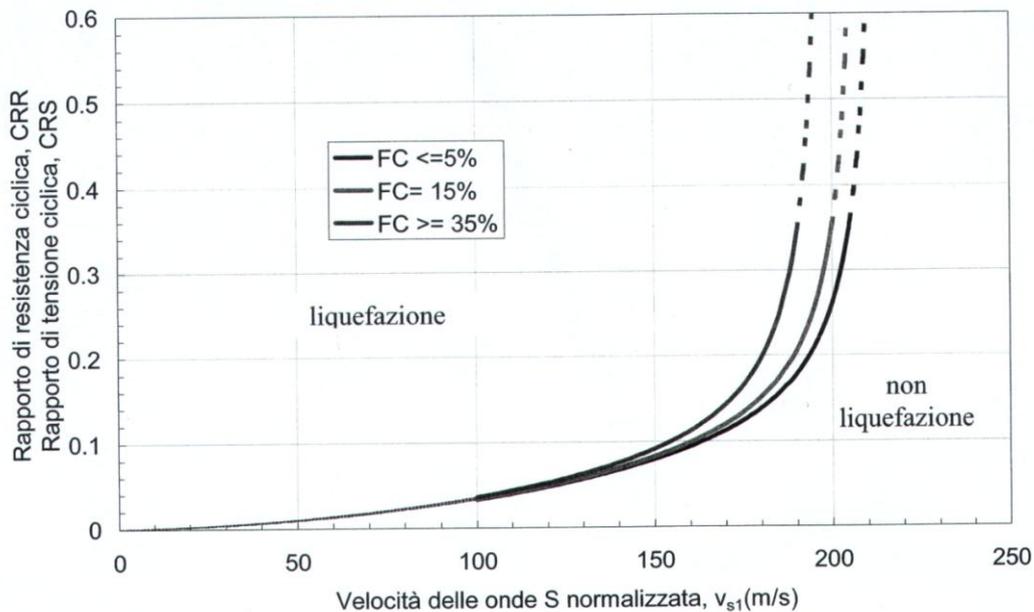


Fig. 25

Abaco per il calcolo del parametro CRR nota  $v_{s1}$ 

## 8. CONCLUSIONI

Le caratteristiche sismiche dell'area dello stabilimento Industrie Cosmetiche Riunite (I.C.R. S.p.A.) di Lodi ed in particolare dell'area interessata dall'intervento edilizio sono sintetizzati nei punti successivi:

1. nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n°3274 del 20 marzo 2003 e nella delibera della Regione Lombardia n°14964 del 7 novembre 2003 di recepimento della classificazione sismica riportata nella suddetta ordinanza, il comune di Lodi è inserito in zona sismica 4 (sismicità molto bassa) a cui corrisponde un'accelerazione orizzontale massima al suolo  $a_{g475} < 0.05g$  riferita al 50esimo percentile, ad una vita di riferimento di 50 anni e ad una probabilità di superamento del 10% su suoli rigidi caratterizzati da  $V_{s30} > 800$  m/s;
2. per quanto riguarda la massima intensità macrosismica  $I_{max}$  (che rappresenta una misura degli effetti che il terremoto ha prodotto sull'uomo, sugli edifici e sull'ambiente) con riferimento alla classificazione del Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti GNDT per il territorio comunale di Lodi si ha un valore di  $I_{max}$  pari a 7 e la magnitudo  $M = 5$ ;

3. il modello sismico del sottosuolo è stato definito sulla base della variazione con la profondità della velocità delle onde di taglio  $v_s$  ricavata con le prove sismiche Re.mi e Masw. Per le aree indagate la stratigrafia sismica è la seguente:

**Area sud**

<b>STRATO 1:</b> prof. da 0.00÷3.00 m	$v_s = 162$ m/s
<b>STRATO 2:</b> prof. da 3.00÷7.00 m	$v_s = 222$ m/s
<b>STRATO 3:</b> prof. da 7.00÷9.00 m	$v_s = 270$ m/s
<b>STRATO 4:</b> prof. da 9.00÷12.0 m	$v_s = 245$ m/s
<b>STRATO 5:</b> prof. da 12.0÷15.0 m	$v_s = 390$ m/s
<b>STRATO 6:</b> prof. da 15.0÷20.0 m	$v_s = 550$ m/s
<b>STRATO 7:</b> prof. da 20.0÷28.0 m	$v_s = 600$ m/s
<b>STRATO 8:</b> prof. da 28.0÷35.0 m	$v_s = 370$ m/s

**Area nord**

<b>STRATO 1:</b> prof. da 0.00÷2.00 m	$v_s = 162$ m/s
<b>STRATO 2:</b> prof. da 2.00÷5.00 m	$v_s = 190$ m/s
<b>STRATO 3:</b> prof. da 5.00÷7.00 m	$v_s = 235$ m/s
<b>STRATO 4:</b> prof. da 7.00÷9.00 m	$v_s = 300$ m/s
<b>STRATO 5:</b> prof. da 9.00÷13.0 m	$v_s = 260$ m/s
<b>STRATO 6:</b> prof. da 13.0÷16.0 m	$v_s = 380$ m/s
<b>STRATO 7:</b> prof. da 16.0÷21.0 m	$v_s = 490$ m/s
<b>STRATO 8:</b> prof. da 21.0÷29.0 m	$v_s = 580$ m/s
<b>STRATO 9:</b> prof. da 29.0÷35.0 m	$v_s = 387$ m/s

4. in rapporto alla natura litologica e ai valori di  $V_{S30}$  calcolati nelle due aree esaminate di seguito riportati, il terreno di fondazione può essere classificato secondo le NTC/2008 come **SUOLO C**:

Re.mi. 1  $V_{S30} = 340$  m/s      Re.mi. 2  $V_{S30} = 340$  m/s

Masw 1  $V_{S30} = 335$  m/s      Masw 2  $V_{S30} = 325$  m/s

5. la pericolosità sismica locale è stata definita, sulla base di quanto indicato nelle NTC/2008 e nella successiva Circolare n°617/2009, mediante un approccio "sito dipendente" in termini di accelerazione orizzontale massima attesa su suolo di categoria A ( $a_g$ ) e del corrispondente spettro di risposta elastico. In sintesi per l'area sud (Latitudine 45,340871N-Longitudine 9,501426E) e nord (Latitudine 45,343009N-Longitudine 9,501904E) dello stabilimento le forme spettrali previste dalle NTC/2008 definite dai parametri  $a_g$ ,  $F_o$ , e  $T_c^*$ , l'accelerazione massima attesa del sito  $a_{max}$  e i coefficienti sismici di accelerazione orizzontale  $k_h$  e verticale  $k_v$  sono riportati nelle seguenti tabelle:

**Relazione sismica**

Area sud				
STATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [g]	$T_c^*$ [s]
SLO	30	0.026	2.495	0.197
SLD	50	0.032	2.548	0.212
SLV	475	0.070	2.600	0.287
SLC	975	0.088	2.604	0.299

Area nord				
STATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [g]	$T_c^*$ [s]
SLO	30	0.026	2.495	0.197
SLD	50	0.032	2.548	0.212
SLV	475	0.071	2.599	0.287
SLC	975	0.088	2.603	0.299

STATO LIMITE		$a_{max}$ Area sud	$a_{max}$ Area nord
Stati limite di esercizio	SLO	0.039	0.039
	SLD	0.048	0.048
Stati limite ultimi	SLV	0.105	0.1065
	SLC	0.132	0.132

STATO LIMITE		$k_h$ Area sud	$k_v$ Area sud	$k_h$ Area nord	$k_v$ Area nord
Stati limite di esercizio	SLO	0.039	0.0195	0.039	0.0195
	SLD	0.048	0.0240	0.048	0.0240
Stati limite ultimi	SLV	0.105	0.0525	0.1065	0.0532
	SLC	0.132	0.0660	0.132	0.0660

6. i fattori di amplificazione sismica locale del sito  $F_a$ , calcolati secondo quanto indicato nell'All.5 alla D.g.r. n.IX/2616 del 30.11.2011, sono i seguenti:

$$F_{a_{0.1s-0.5s}} = 1.56 \quad \text{Area sud} \qquad F_{a_{0.5s-1.5s}} = 1.72 \quad \text{Area sud}$$

$$F_{a_{0.5s-1.5s}} = 1.48 \quad \text{Area nord} \qquad F_{a_{0.5s-1.5s}} = 1.78 \quad \text{Area nord}$$

Per entrambi i periodi di oscillazione del sito **risultano inferiori ai corrispondenti valori di soglia indicati dalla Regione Lombardia per il comune di Lodi, pertanto si può ritenere la normativa nazionale sufficientemente cautelativa nei confronti dei possibili fenomeni di amplificazione sismica locale;**

**Relazione sismica**

---

7. dalla verifica della suscettibilità alla liquefazione del terreno di fondazione utilizzando la "procedura semplificata" di Seed e Idriss si evince che la possibilità che si verifichi liquefazione sia nulla o estremamente bassa in quanto i valori della  $V_s$  normalizzati entro i primi 20 m di profondità risultano maggiori del valore di soglia della velocità delle onde di taglio oltre il quale la liquefazione non avviene.

Lodi, Luglio 2012

Dott. Geol. Giovanni Viganò  
(Ordine dei Geologi della Lombardia n. 1051)



Dott. Geol. Stefania Branchi  
(Ordine dei Geologi della Lombardia n. 1007)



CIPREA S.R.L. - via Tortona, 15 - 20144 MILANO

COMUNE DI LODI (LO)

AMPLIAMENTO COMPLESSO PRODUTTIVO INDUSTRIE COSMETICHE RIUNITE - S.P. 25 Lodi Boffalora

**Relazione sismica**

---

# **Allegato 1**

## **PROVE SISMICHE SUPERFICIALI RE.MI E MASW**