

Prima emissione
Ottobre 2025

Regione Lombardia

Provincia di Pavia

COMUNE DI VIGEVANO



ALLEGATO 3

INDAGINI SISMICHE

STUDIO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E
SISMICO A SUPPORTO DEL PIANO DI
GOVERNO DEL TERRITORIO REDATTO AI
SENSI DELLA D.G.R.LOMB. N° IX/2616
DEL 30/11/2011 ss. mm. ii.
E D.G.R. LOMB N° X/6738 DEL 19/06/2017

ALLEGATO 3 INDAGINI SISMICHE

committenza:

Comune di Vigevano
Corso Vittorio Emanuele II, 25
Vigevano (PV)

a cura di:



S tudio
G eologico
T riorbite

Via S.L. Beccari n. 2 - 27027 Gropello Cairoli (PV)
Tel./Fax: 0382.81.70.38 -
e.mail: info@studiogeologicotriorbite.com

REL 078-23

INDICE

INDAGINE GEOFISICA INTEGRATIVA	2
Attrezzatura utilizzata	3
Acquisizione delle onde sismiche per interpretazione MASW	3
Modalità interpretativa.....	3
INTERPRETAZIONE QUALITATIVA DELLE INDAGINI GEOFISICHE	3
1 – INDAGINE MASW M39 – LOCALITÀ SFORZESCA	4
1.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW	4
1.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE	6
1.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA	8
2 – INDAGINE MASW M40 – STRADA CASCINETTA DELLA CROCE	13
2.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW	13
2.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE	15
2.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA	17
3 – INDAGINE MASW M41 – CASCINA CAVALLI.....	22
3.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW	22
3.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE	24
3.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA	26
4 – INDAGINE MASW M42 – STRADA CASALINO.....	31
4.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW	31
4.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE	33
4.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA	35

INDAGINE GEOFISICA INTEGRATIVA

L'indagine è stata finalizzata alla ricostruzione sismica del sottosuolo così da fornire indicazioni sul comportamento del sottosuolo nell'ipotesi di un evento sismico, e per permettere una più completa mappatura a livello sismico del territorio comunale.

Nello specifico sono state eseguite n.4 stese sismiche con geofoni con registrazione verticale per la ricezione delle onde P (onde di compressione). Mediante l'applicazione della metodologia MASW, attraverso alcune trasformazioni, è possibile risalire alla velocità delle onde S (onde di taglio).



Fig. 1.1 – Ubicazione stese sismiche.

Le coordinate geografiche approssimative delle indagini eseguite sono (EPSG:4326):

Indagine	N	E
M39 – Località Sforzesca	45.289694	8.885393
M40 – Strada Cascinetta della Croce	45.346209	8.831116
M41 – Cascina Cavalli	45.295857	8.808767
M42 – Strada Casalino	45.321541	8.830343

Attrezzatura utilizzata

L'attrezzatura utilizzata in campagna è costituita da un sismografo a 24 canali, 24 geofoni a frequenza variabile e pari a 4,5 Hz, cavi con take-out distanziati di 3 metri, mazza e piastra di battuta. Il sismografo ha possibilità di stack degli impulsi sismici, filtraggio digitale programmabile (per la riduzione dei rumori) e guadagno verticale del segnale (in ampiezza) con sensibilità tra 1 e 100 decibel. La registrazione dei dati in digitale, con formato in uscita pari a 24 bit, viene effettuata su PC sul quale vengono successivamente elaborati i dati.

Acquisizione delle onde sismiche per interpretazione MASW

L'acquisizione della velocità delle onde di taglio (V_s) avviene per mezzo di indagine sismica a rifrazione con metodo MASW, mediante energizzazione del sottosuolo e registrazione degli arrivi delle onde rifrante in corrispondenza di *geofoni verticali*. Questi sono stati disposti secondo un allineamento con interasse tra i geofoni vario a seconda delle indagini. Ogni indagine MASW ha previsto un punto di energizzazione (andata) posto ad adeguata distanza dal primo geofono.

INDAGINE	Interdistanza geofonica	Distanza energizzazione dal primo geofono
MASW 39	3,0 m	3,0 m
MASW 40	2,0 m	2,0 m
MASW 41	2,0 m	2,0 m
MASW 42	2,0 m	2,0 m

Tab.2 - Dati disposizione linee sismiche

Modalità interpretativa

L'elaborazione dei dati sismici con metodo MASW è stata effettuata per mezzo del software SWAN che, mediante la trasformata di Fourier, è in grado di fornire indicazioni sulla suddivisione delle unità litologiche del sottosuolo mediante l'individuazione delle onde V_s .

INTERPRETAZIONE QUALITATIVA DELLE INDAGINI GEOFISICHE

E' necessario sottolineare che l'interpretazione delle indagini geofisiche viene fatta nell'ipotesi che gli strati del sottosuolo siano omogenei, orizzontali e con superfici di separazione piano parallele. Nell'area indagata le condizioni sopra riportate sono rispettate quasi del tutto.

Si rammenta infine come, in ogni caso, la valutazione delle velocità e degli spessori dei singoli strati viene effettuata con un margine di incertezza, insita proprio nei metodi geofisici, che si aggira attorno al 10-15 %.

1 – INDAGINE MASW M39 – LOCALITÀ SFORZESCA

1.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW

Di seguito si riporta il sismogramma frutto della somma di ciascuna acquisizione, filtrato di eventuali disturbi di fondo:

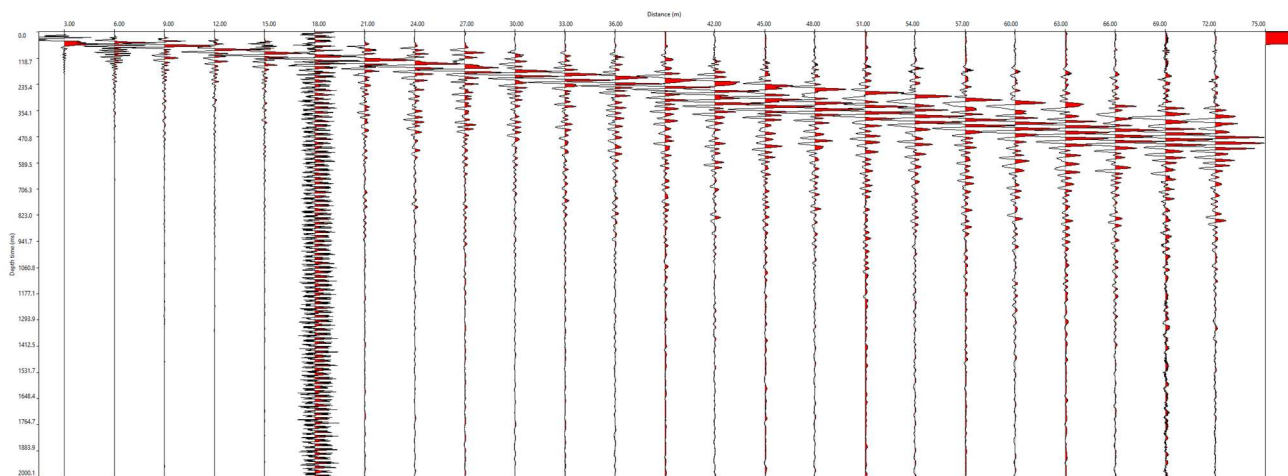


Fig. 1.1.1 – Sismogramma della base sismica.

L'elaborazione dei sismogrammi ha consentito di estrapolare la trasformata di Fourier, di seguito riportata; e da questa si risale alla curva di dispersione che, confrontata mediante sovrapposizione con quella teorica consente di ottenere sia gli spessori dei vari strati che le rispettive velocità.

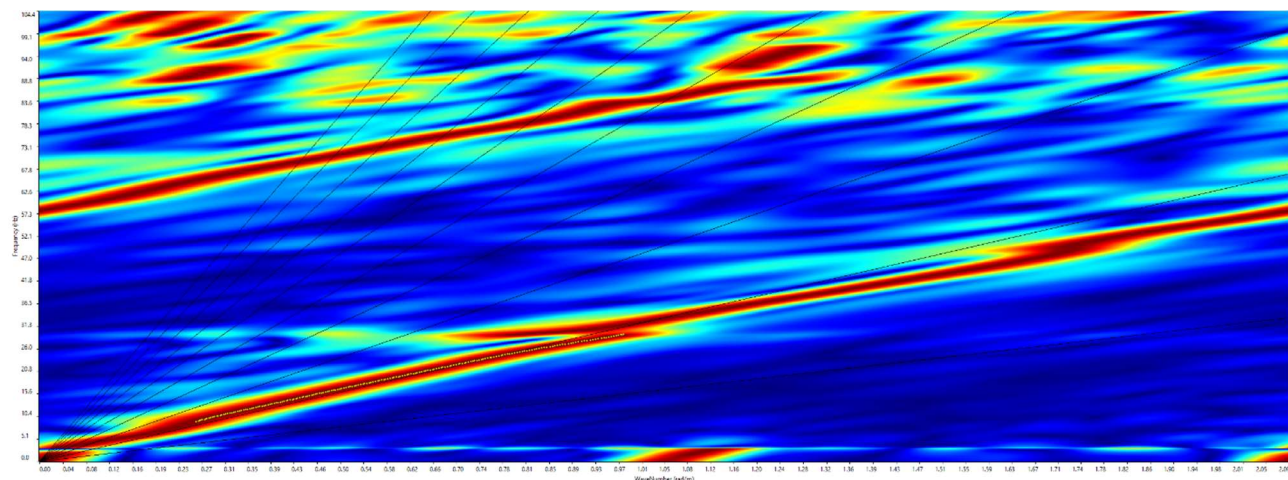


Fig. 1.1.2 – Trasformata di Fourier della base sismica.

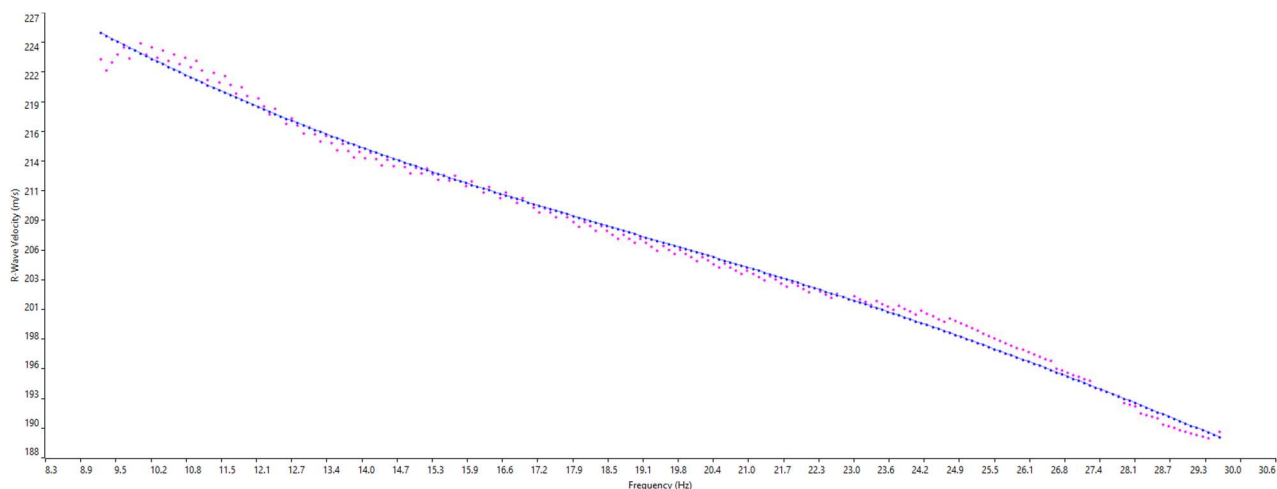


Fig. 1.1.3 – Curva di dispersione della base sismica (in magenta la curva di dispersione ottenuta, in blu quella calcolata).

Dalla sovrapposizione della curva di dispersione si è ottenuta la ricostruzione del sottosuolo in orizzonti aventi differenti spessori e valori di velocità come di seguito indicato:

M39		
Spessore	Profondità	V_s (m/sec)
2,2	0,0 – 2,2	170
2,7	2,2 – 4,9	245
3,2	4,9 – 8,1	234
4,0	8,1 – 12,1	265
3,4	12,1 – 15,5	256
3,6	15,5 – 19,1	261
4,2	19,1 – 23,3	269
6,7	23,3 – 30,0	279

Tabella 1.1.4 - Valori delle V_s alla linea sismica.

Di seguito viene riportato il diagramma delle velocità delle onde S in funzione della profondità:

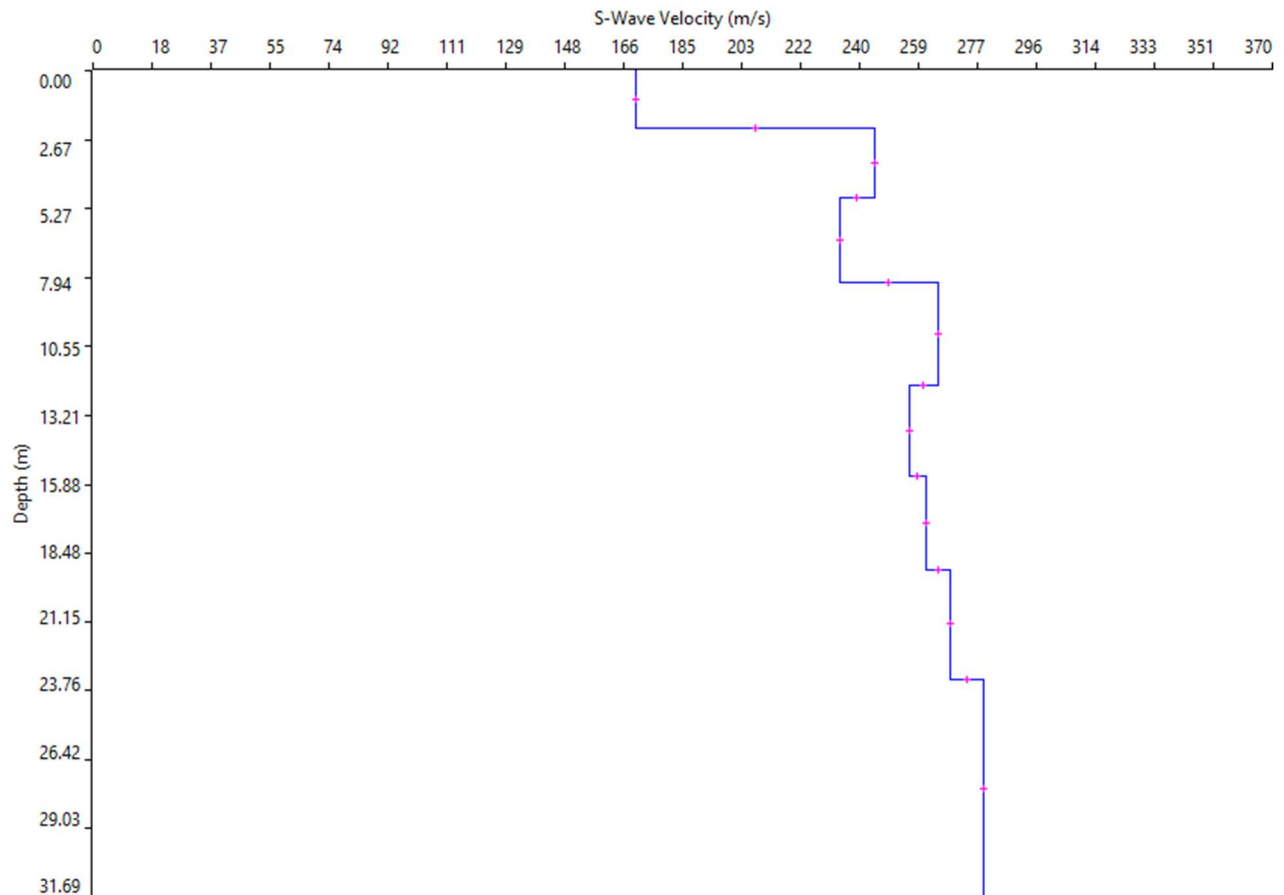


Fig. 1.1.5 – Diagramma delle velocità Vs riferite ai vari strati intercettati nella base sismica.

1.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE

Con l'introduzione dell'O.P.C.M. n. 3274 del 20 Marzo 2003 e succ. modif. sono stati rivisti i criteri per l'individuazione delle zone sismiche. In particolare, l'intero territorio nazionale è stato suddiviso in quattro livelli: da 1, più pericoloso, a 4 meno sensibile.

Il **territorio comunale di Vigevano** rientra in **zona sismica 3** ai sensi della D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023.

I suoli di fondazione sono suddivisi in cinque classi (A, B, C, D, E) in base alle loro caratteristiche stratigrafiche ed alla velocità media delle onde sismiche di taglio (trasversali), ovvero alle V_{Seq} :

$$V_{Seq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

V_i = Velocità dell'onda di taglio i -esimo strato

N = Numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il valore ricavato è:

$V_{s,eq} = V_{s30}$ pari a 251 m/s riferito al piano campagna.

Secondo lo schema presente nelle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018), i terreni indagati risultano tutti appartenere alla categoria di sottosuolo di tipo C ovvero *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”*.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 1.2.1 – Categoria di sottosuolo (tratto dalla Tabella 3.2.II delle NTC 2018)

1.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA

Al fine di determinare i valori di F_a dal punto di vista degli effetti litologici, sono stati utilizzati i risultati emersi dall'esecuzione dello stendimento geofisico con metodo MASW. Mediante tale elaborazione e con l'utilizzo di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia i quali hanno permesso la compilazione di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia si è calcolato il valore di F_a (fattore di amplificazione) da confrontare con i limiti di riferimento indicati dalla Regione Lombardia.

Per ottenere il suddetto F_a è necessario ricavare il valore di V_{seq} (onde sismiche di taglio o trasversali) utilizzando le velocità V_s degli strati intercettati mediante la formula precedentemente riportata.

Sulla base di parametri geotecnici e litologici, si individua la litologia prevalente del sito e da questo dato si sceglie la relativa scheda di riferimento riportata nella D.G.R. 8/7374 del 28 Maggio 2008 e successivamente riprese dalla D.G.R. IX/2616 del 30 Novembre 2011.

Nello specifico la normativa regionale riporta 6 tipi di schede litologiche:

- scheda per le litologie prevalentemente ghiaiose;
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-argillose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-sabbiose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie sabbiose (da utilizzarsi in zone di pianura).

Si riportano, nell'apposito diagramma, i valori delle V_s relative ad ogni strato. Tale confronto permette di verificare se si rientra o meno nel campo di validità della scheda di riferimento.

Nel caso specifico, il grafico ottenuto dalle velocità delle V_s e dalle rispettive profondità evidenzia come i dati rientrino nella scheda di riferimento per litologia sabbiosa.

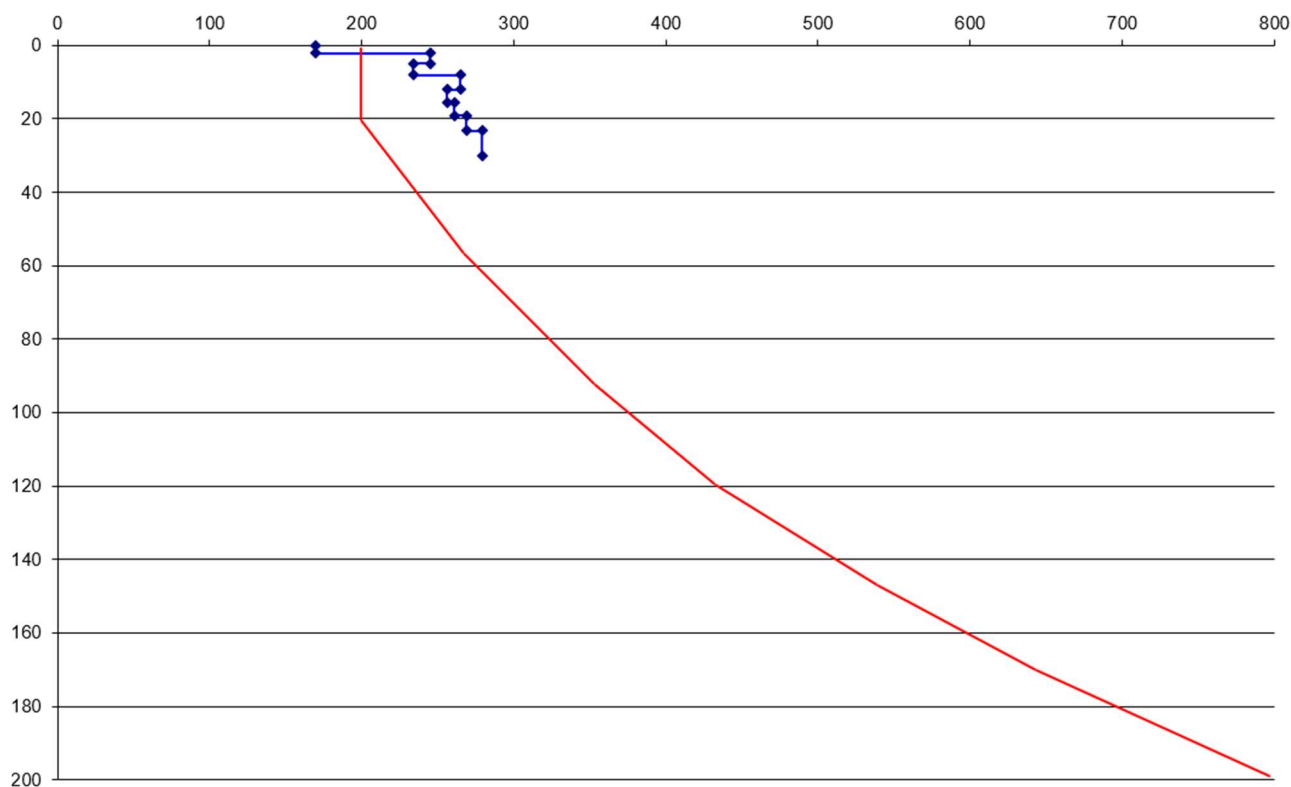


Fig. 1.3.1 - Grafico relativo alla "litologia sabbiosa" a cui sono stati sovrapposti i valori parziali di ogni intervallo di terreno in base alle Vs.

Come si può osservare, l'andamento delle Vs è posizionato al di "sopra" della linea rossa che divide il campo di validità dal campo di non validità.

Per utilizzare correttamente l'abaco di fig. 1.3.2, il quale consente l'individuazione della corretta curva da utilizzare per l'individuazione dell' F_a , come vincolo viene posto che il primo strato debba avere almeno 4 m di spessore ed una velocità di almeno 200 m/s. qualora lo strato superficiale abbia profondità inferiore ai 4 m, si utilizzerà, per la scelta della curva, lo *strato superficiale equivalente*, a cui si assegna una velocità V_s calcolata come media pesata del valore di V_s degli strati superficiali la cui somma supera i 4 m di spessore. Successivamente, ottenuta la velocità del primo strato ed il relativo spessore si riportano questi valori all'interno dell'abaco (fig. 1.3.2) al fine di ricavare il colore della curva da utilizzare (fig. 1.3.4 e 1.3.5) per ottenere il valore di F_a . Tale parametro (F_a) verrà confrontato con quello riportato in bibliografia in funzione della struttura da realizzare: intervallo 0,1-0,5 s riferito a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e intervallo 0,5-1,5 s riferito a strutture più alte e flessibili. Nel nostro caso è stata effettuata la media pesata relativa ai primi 4.7 m. Si è così ottenuta una velocità del "primo strato" di circa 217 m/s assimilabile a 200 m/s.

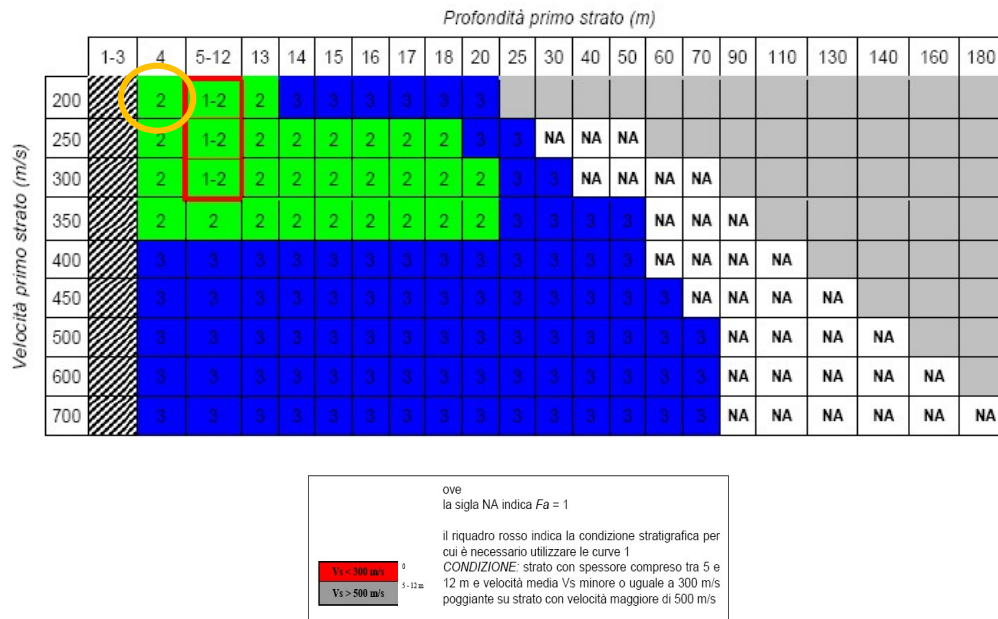


Figura 1.3.2 - Abaco che permette di individuare, in base al colore, la curva di riferimento per l'individuazione di F_a , grazie all'intersezione della profondità raggiunta dal primo strato e la sua velocità.

Intersecando il valore di velocità riscontrata con la profondità sopra indicata, si ricade nel campo 2, che corrisponde alla curva verde di fig. 1.3.4 e 1.3.5.

Con i valori sopra ottenuti si calcola il periodo "T" relativo al sito. Nel caso la velocità verificata dall'indagine non raggiungesse gli 800 m/s, occorre incrementare, la velocità e la profondità delle onde, utilizzando un passo adeguato, fino all'intercettazione degli 800 m/s.

Per la determinazione del periodo si utilizza la seguente equazione:

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

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

V_{s_i} = Velocità dell'onda di taglio i-esima

Stendimento sismico	Valore del periodo T calcolato
M39	0,633 s

Tabella 1.3.3 - Recante il valore del periodo T calcolato

Conoscendo la velocità del primo strato, la curva di riferimento ed il valore del periodo T calcolato, si può risalire al valore di F_a utilizzando gli abachi di riferimento di fig. 1.3.4 e fig. 1.3.5 per la litologia sabbiosa e riferiti rispettivamente ad edifici bassi e ad edifici alti.

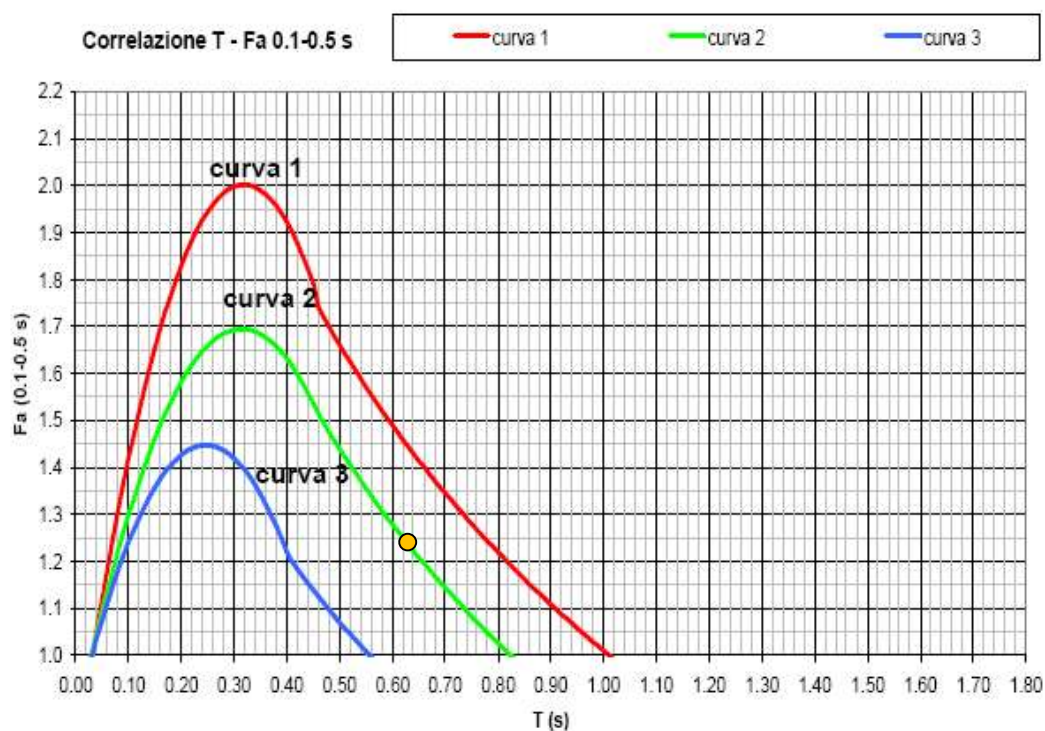


Figura 1.3.4 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici bassi)

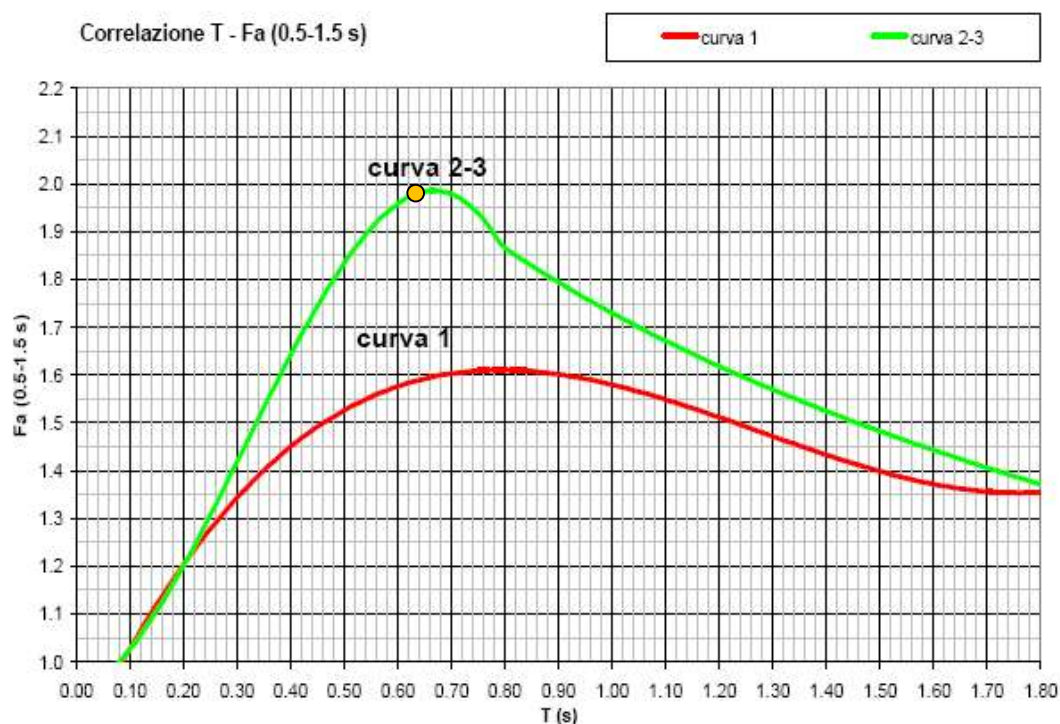


Figura 1.3.5 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici alti)

La procedura prevede di valutare F_a con le schede di valutazione sopra riportate e di confrontarlo con il corrispettivo valore di soglia, considerando una variabilità di $\pm 0,1$, che tiene conto la variabilità del valore di F_a ottenuto.

Dagli abachi emerge come il valore attribuito al periodo $T=0,63$ s, identifichi sulla curva verde un valore di F_a , arrotondato alla prima cifra decimale, **pari a 1,2 per edifici bassi e rigidi (F_a di riferimento per i terreni di tipo C =1,8) e F_a pari a 2,0 per edifici alti e flessibili (F_a di riferimento per i terreni di tipo C = 2,4).**

Ne deriva che, in entrambi i casi, il valore di F_a calcolato è inferiore al valore di riferimento, pertanto, in accordo con la vigente normativa (D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011), **lo spettro proposto dalla normativa per suoli di tipo C risulta sufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito.**

Le tabelle sottostanti riportano i valori di F_a relativi, nel primo caso a strutture basse (max 4 piani), nel secondo caso a strutture alte e flessibili (5 o più piani) per ogni tipo di suolo individuato dalla Regione Lombardia per il comune di Vigevano.

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.1-0.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,4	1,8	2,2	1,9

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.5-1.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,7	2,4	4,1	3,0

2 – INDAGINE MASW M40 – STRADA CASCINETTA DELLA CROCE

2.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW

Di seguito si riporta il sismogramma frutto della somma di ciascuna acquisizione, filtrato di eventuali disturbi di fondo:

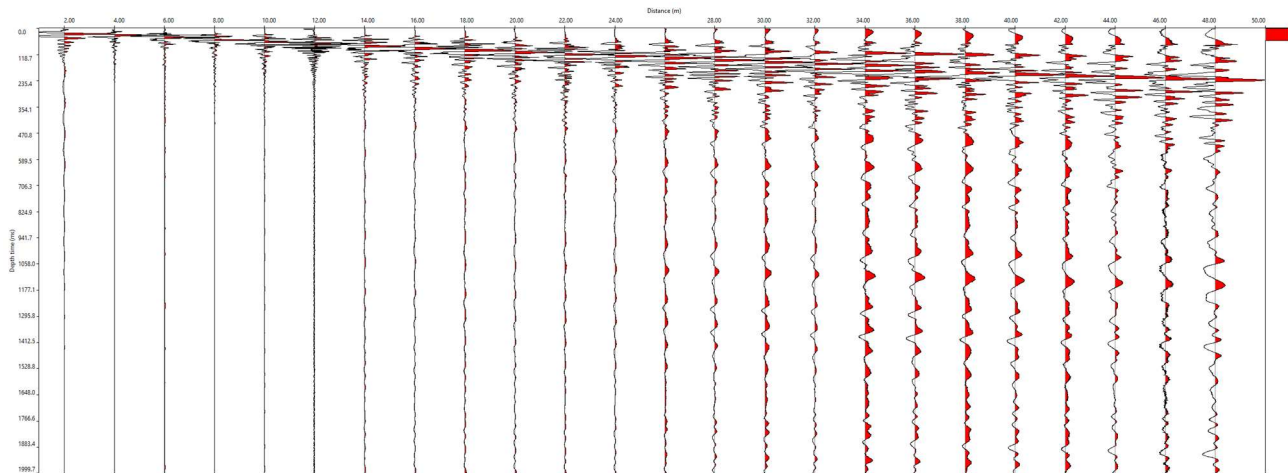


Fig. 2.1.1 – Sismogramma della base sismica.

L'elaborazione dei sismogrammi ha consentito di estrapolare la trasformata di Fourier, di seguito riportata; e da questa si risale alla curva di dispersione che, confrontata mediante sovrapposizione con quella teorica consente di ottenere sia gli spessori dei vari strati che le rispettive velocità.

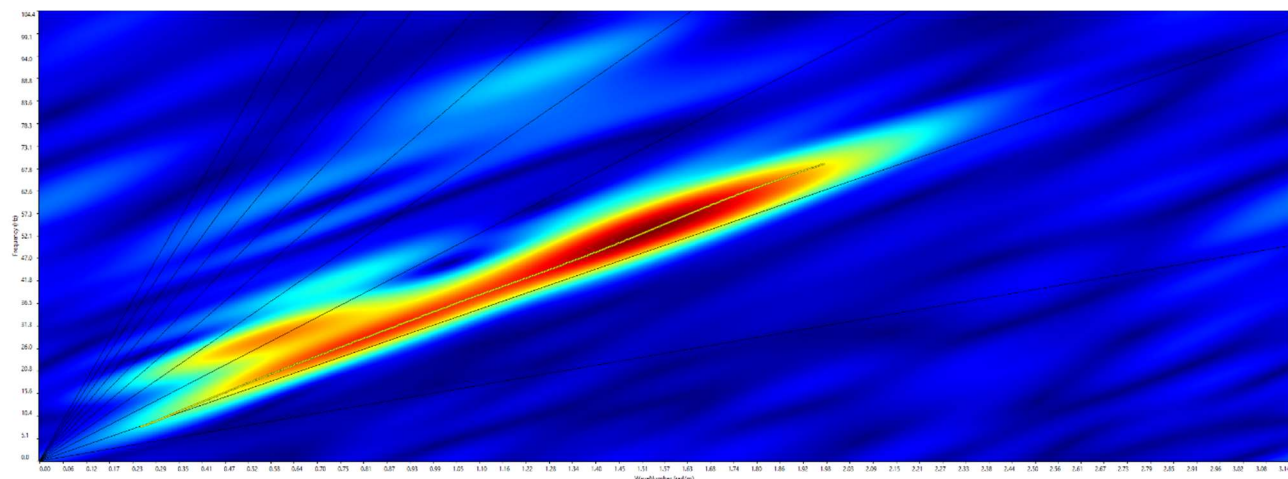


Fig. 2.1.2 – Trasformata di Fourier della base sismica.

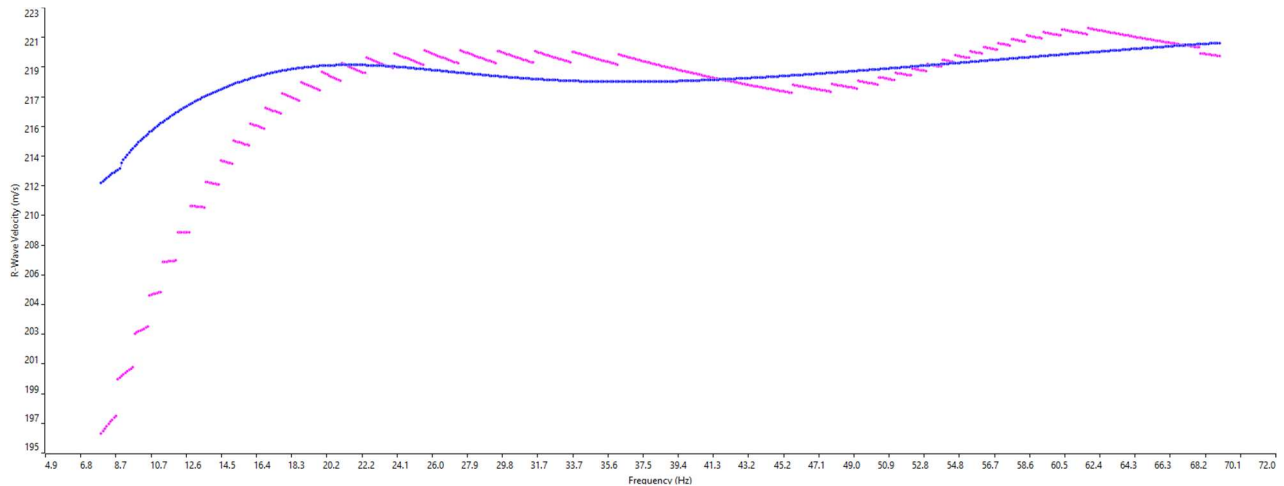


Fig. 2.1.3 – Curva di dispersione della base sismica (in magenta la curva di dispersione ottenuta, in blu quella calcolata).

Dalla sovrapposizione della curva di dispersione si è ottenuta la ricostruzione del sottosuolo in orizzonti aventi differenti spessori e valori di velocità come di seguito indicato:

M40		
Spessore	Profondità	V_s (m/sec)
2,0	0,0 – 2,0	240
3,0	2,0 – 5,0	225
3,0	5,0 – 8,0	267
2,5	8,0 – 10,5	201
3,3	10,5 – 13,8	230
4,6	13,8 – 18,4	222
3,2	18,4 – 21,6	226
8,4	21,6 – 30,0	210

Tabella 2.1.4 - Valori delle V_s alla linea sismica.

Di seguito viene riportato il diagramma delle velocità delle onde S in funzione della profondità:

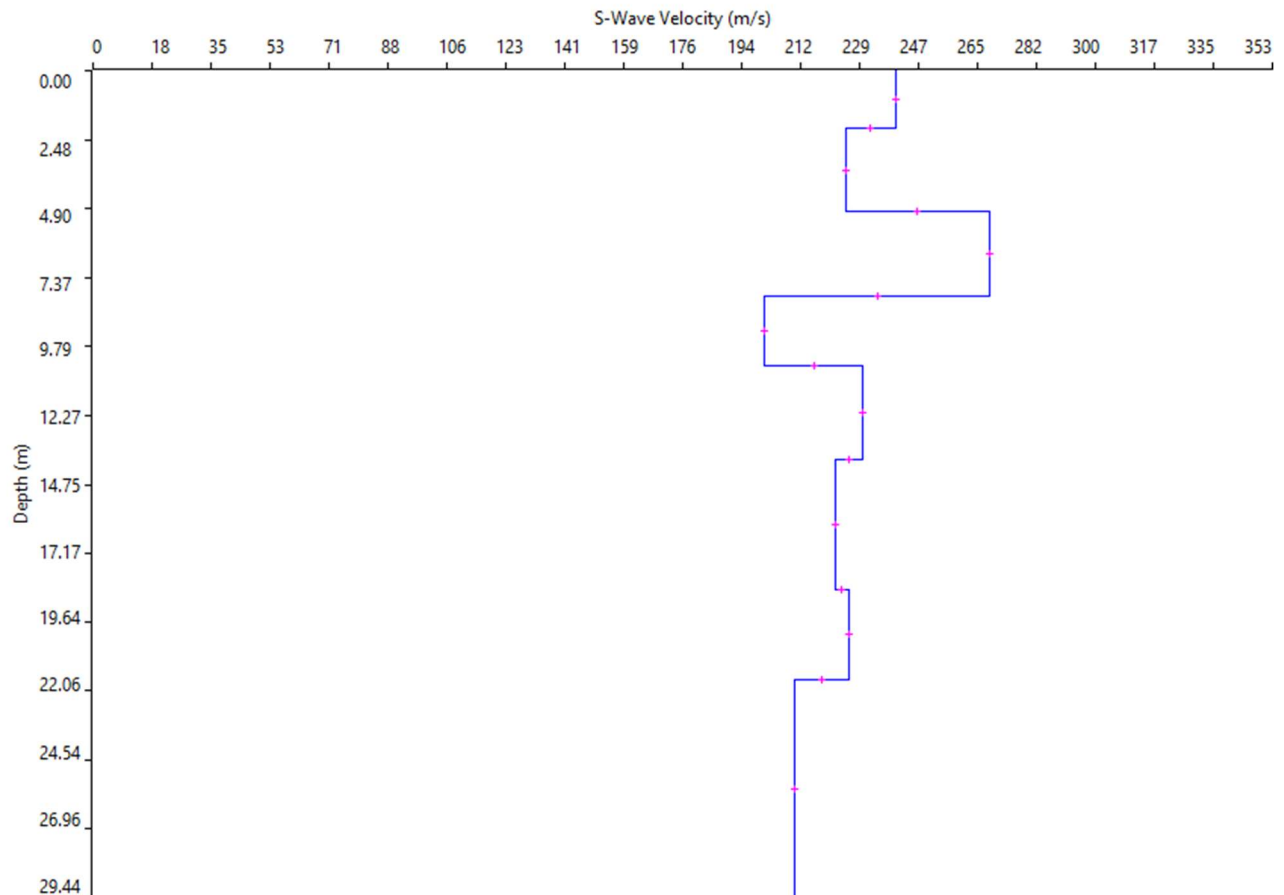


Fig. 2.1.5 – Diagramma delle velocità Vs riferite ai vari strati intercettati nella base sismica.

2.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE

Con l'introduzione dell'O.P.C.M. n. 3274 del 20 Marzo 2003 e succ. modif. sono stati rivisti i criteri per l'individuazione delle zone sismiche. In particolare, l'intero territorio nazionale è stato suddiviso in quattro livelli: da 1, più pericoloso, a 4 meno sensibile.

Il **territorio comunale di Vigevano** rientra in **zona sismica 3** ai sensi della D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023.

I suoli di fondazione sono suddivisi in cinque classi (A, B, C, D, E) in base alle loro caratteristiche stratigrafiche ed alla velocità media delle onde sismiche di taglio (trasversali), ovvero alle V_{Seq} :

$$V_{Seq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

V_i = Velocità dell'onda di taglio i -esimo strato

N = Numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il valore ricavato è:

$V_{s,eq} = V_{s30}$ pari a 223 m/s riferito al piano campagna.

Secondo lo schema presente nelle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018), i terreni indagati risultano tutti appartenere alla categoria di sottosuolo di tipo C ovvero *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”*.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 2.2.1 – Categoria di sottosuolo (tratto dalla Tabella 3.2.II delle NTC 2018)

2.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA

Al fine di determinare i valori di F_a dal punto di vista degli effetti litologici, sono stati utilizzati i risultati emersi dall'esecuzione dello stendimento geofisico con metodo MASW. Mediante tale elaborazione e con l'utilizzo di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia i quali hanno permesso la compilazione di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia si è calcolato il valore di F_a (fattore di amplificazione) da confrontare con i limiti di riferimento indicati dalla Regione Lombardia.

Per ottenere il suddetto F_a è necessario ricavare il valore di V_{seq} (onde sismiche di taglio o trasversali) utilizzando le velocità V_s degli strati intercettati mediante la formula precedentemente riportata.

Sulla base di parametri geotecnici e litologici, si individua la litologia prevalente del sito e da questo dato si sceglie la relativa scheda di riferimento riportata nella D.G.R. 8/7374 del 28 Maggio 2008 e successivamente riprese dalla D.G.R. IX/2616 del 30 Novembre 2011.

Nello specifico la normativa regionale riporta 6 tipi di schede litologiche:

- scheda per le litologie prevalentemente ghiaiose;
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-argillose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-sabbiose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie sabbiose (da utilizzarsi in zone di pianura).

Si riportano, nell'apposito diagramma, i valori delle V_s relative ad ogni strato. Tale confronto permette di verificare se si rientra o meno nel campo di validità della scheda di riferimento.

Nel caso specifico, il grafico ottenuto dalle velocità delle V_s e dalle rispettive profondità evidenzia come i dati rientrino nella scheda di riferimento per litologia sabbiosa.

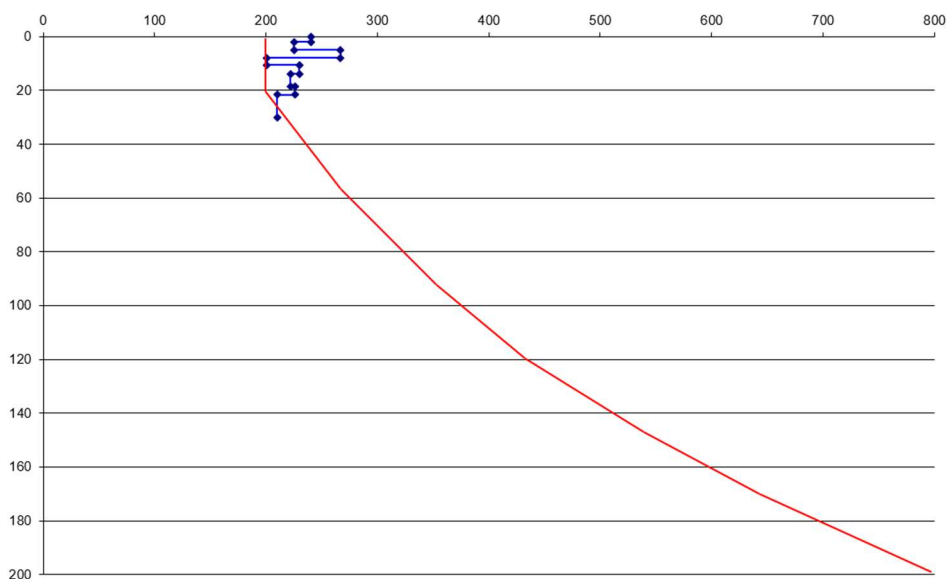


Fig. 2.3.1 - Grafico relativo alla "litologia sabbiosa" a cui sono stati sovrapposti i valori parziali di ogni intervallo di terreno in base alle Vs.

Come si può osservare, l'andamento delle Vs è posizionato al di "sopra" della linea rossa che divide il campo di validità dal campo di non validità.

Per utilizzare correttamente l'abaco di fig. 2.3.2, il quale consente l'individuazione della corretta curva da utilizzare per l'individuazione dell'Fa, come vincolo viene posto che il primo strato debba avere almeno 4 m di spessore ed una velocità di almeno 200 m/s. qualora lo strato superficiale abbia profondità inferiore ai 4 m, si utilizzerà, per la scelta della curva, lo *strato superficiale equivalente*, a cui si assegna una velocità Vs calcolata come media pesata del valore di Vs degli strati superficiali la cui somma supera i 4 m di spessore. Successivamente, ottenuta la velocità del primo strato ed il relativo spessore si riportano questi valori all'interno dell'abaco (fig. 2.3.2) al fine di ricavare il colore della curva da utilizzare (fig. 2.3.4 e 2.3.5) per ottenere il valore di Fa. Tale parametro (Fa) verrà confrontato con quello riportato in bibliografia in funzione della struttura da realizzare: intervallo 0,1-0,5 s riferito a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e intervallo 0,5-1,5 s riferito a strutture più alte e flessibili. Nel nostro caso è stata effettuata la media pesata relativa ai primi 5 m. Si è così ottenuta una velocità del "primo strato" di circa 231 m/s assimilabile a 200 m/s.

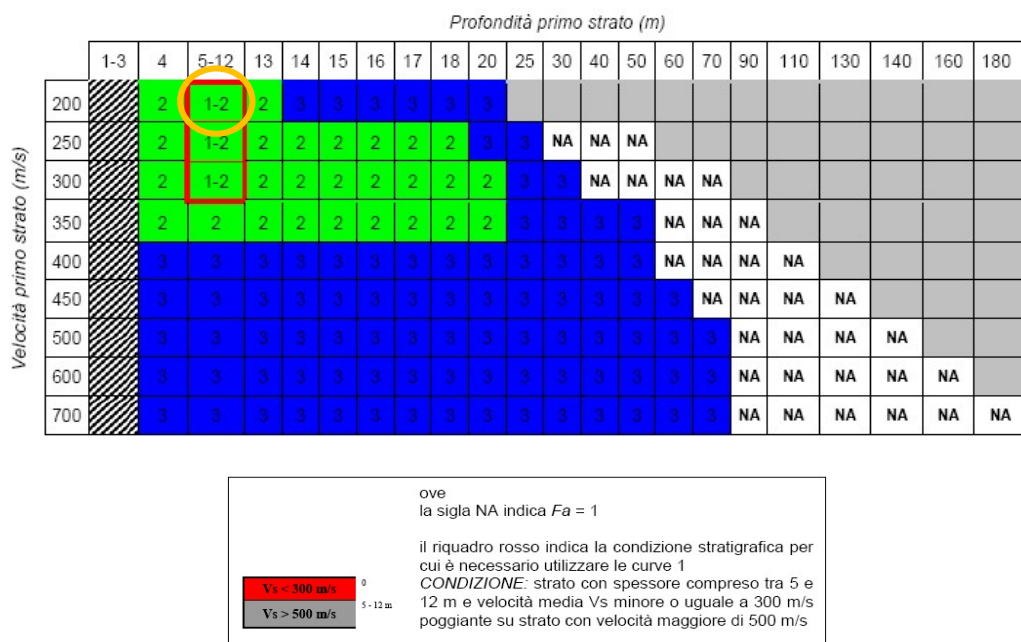


Figura 2.3.2 - Abaco che permette di individuare, in base al colore, la curva di riferimento per l'individuazione di F_a , grazie all'intersezione della profondità raggiunta dal primo strato e la sua velocità.

Intersecando il valore di velocità riscontrata con la profondità sopra indicata, si ricade nel campo 2, che corrisponde alla curva verde di fig. 2.3.4 e 2.3.5.

Con i valori sopra ottenuti si calcola il periodo "T" relativo al sito. Nel caso la velocità verificata dall'indagine non raggiungesse gli 800 m/s, occorre incrementare, la velocità e la profondità delle onde, utilizzando un passo adeguato, fino all'intercettazione degli 800 m/s.

Per la determinazione del periodo si utilizza la seguente equazione:

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

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

V_{s_i} = Velocità dell'onda di taglio i-esima

Stendimento sismico	Valore del periodo T calcolato
M40	0,847 s

Tabella 2.3.3 - Recante il valore del periodo T calcolato

Conoscendo la velocità del primo strato, la curva di riferimento ed il valore del periodo T calcolato, si può risalire al valore di F_a utilizzando gli abachi di riferimento di fig. 2.3.4 e fig. 2.3.5 per la litologia sabbiosa e riferiti rispettivamente ad edifici bassi e ad edifici alti.

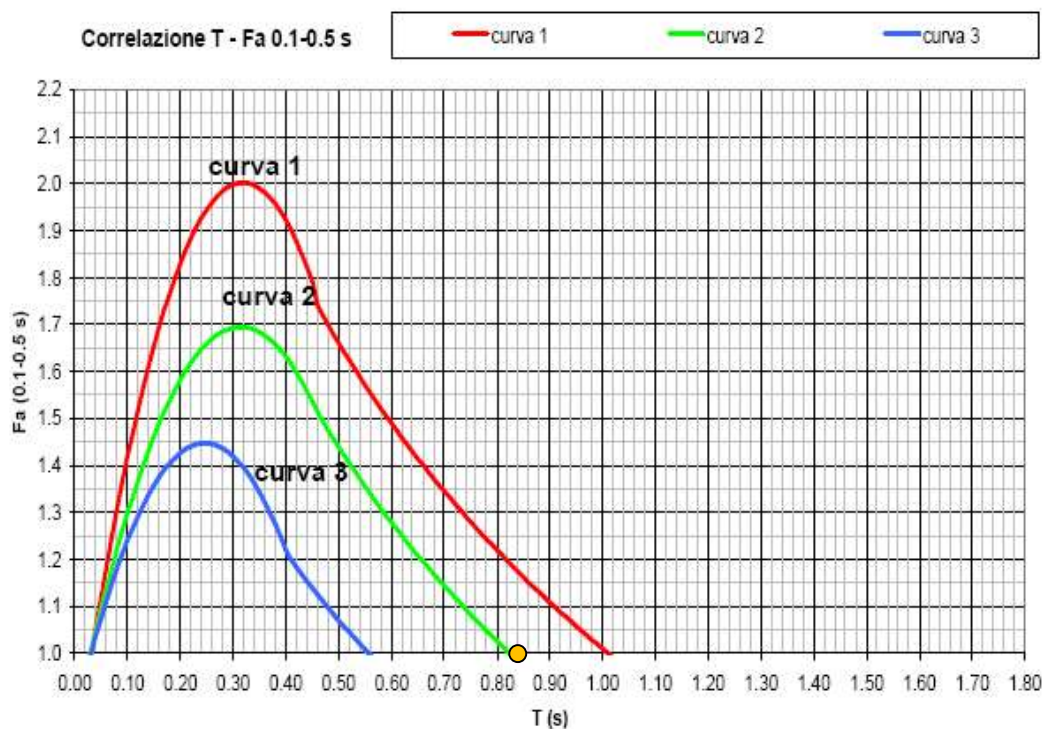


Figura 2.3.4 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici bassi)

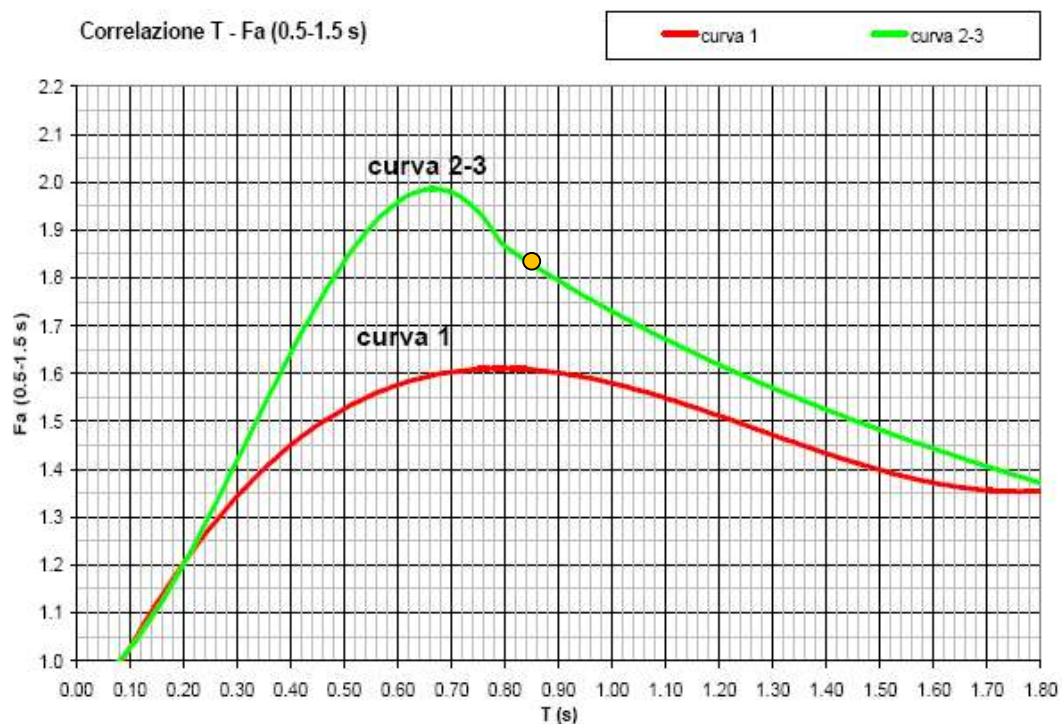


Figura 2.3.5 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici alti)

La procedura prevede di valutare F_a con le schede di valutazione sopra riportate e di confrontarlo con il corrispettivo valore di soglia, considerando una variabilità di $\pm 0,1$, che tiene conto la variabilità del valore di F_a ottenuto.

Dagli abachi emerge come il valore attribuito al periodo $T=0,85$ s, identifichi sulla curva verde un valore di F_a , arrotondato alla prima cifra decimale, **pari a 1,0 per edifici bassi e rigidi (F_a di riferimento per i terreni di tipo C =1,8) e F_a pari a 1,8 per edifici alti e flessibili (F_a di riferimento per i terreni di tipo C = 2,4).**

Ne deriva che, in entrambi i casi, il valore di F_a calcolato è inferiore al valore di riferimento, pertanto, in accordo con la vigente normativa (D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011), **lo spettro proposto dalla normativa per suoli di tipo C risulta sufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito.**

Le tabelle sottostanti riportano i valori di F_a relativi, nel primo caso a strutture basse (max 4 piani), nel secondo caso a strutture alte e flessibili (5 o più piani) per ogni tipo di suolo individuato dalla Regione Lombardia per il comune di Vigevano.

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.1-0.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,4	1,8	2,2	1,9

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.5-1.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,7	2,4	4,1	3,0

3 – INDAGINE MASW M41 – CASCINA CAVALLI

3.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW

Di seguito si riporta il sismogramma frutto della somma di ciascuna acquisizione, filtrato di eventuali disturbi di fondo:

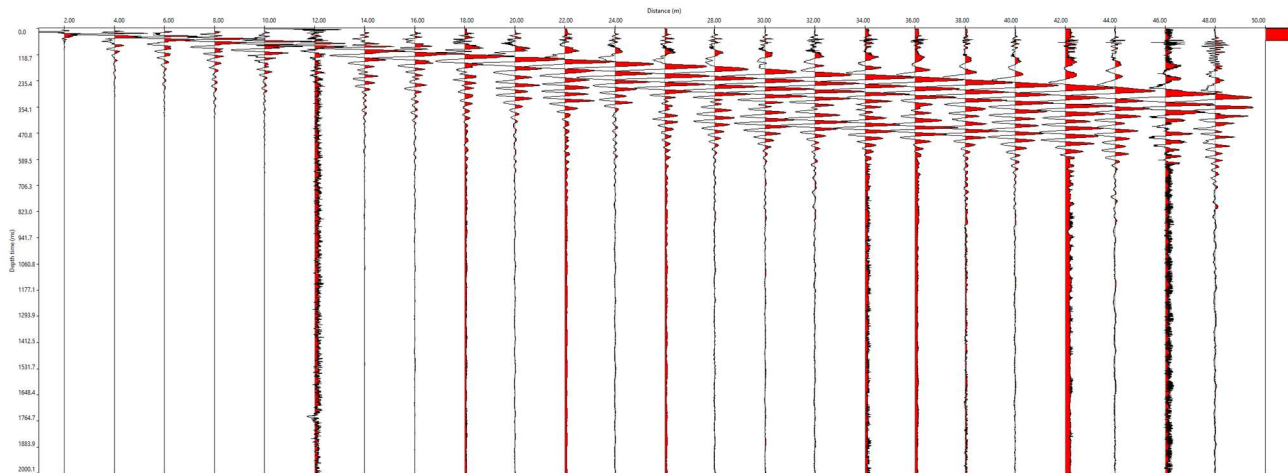


Fig. 3.1.1 – Sismogramma della base sismica.

L'elaborazione dei sismogrammi ha consentito di estrapolare la trasformata di Fourier, di seguito riportata; e da questa si risale alla curva di dispersione che, confrontata mediante sovrapposizione con quella teorica consente di ottenere sia gli spessori dei vari strati che le rispettive velocità.

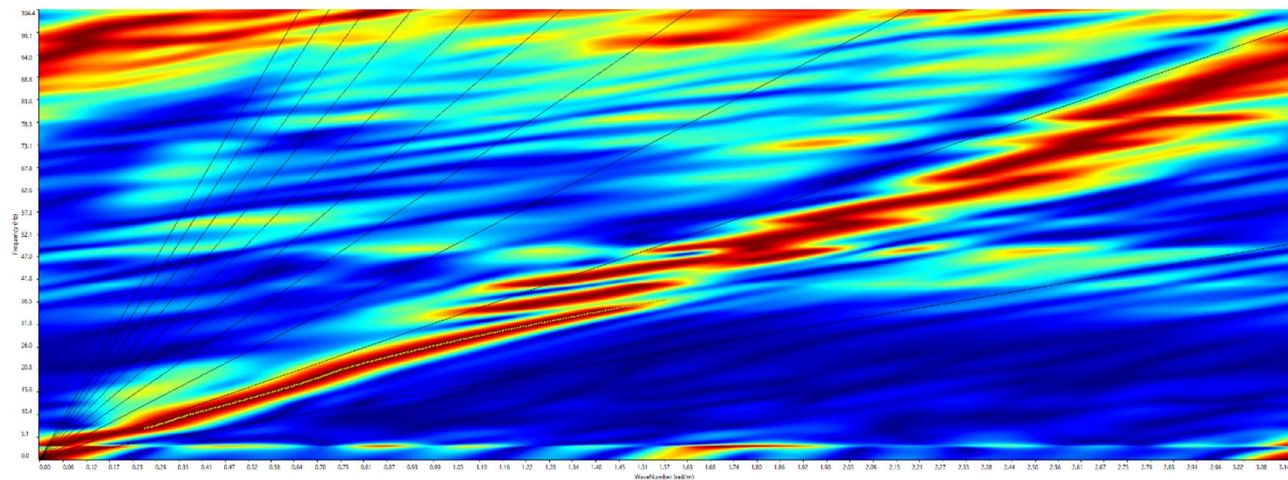


Fig. 3.1.2 – Trasformata di Fourier della base sismica.

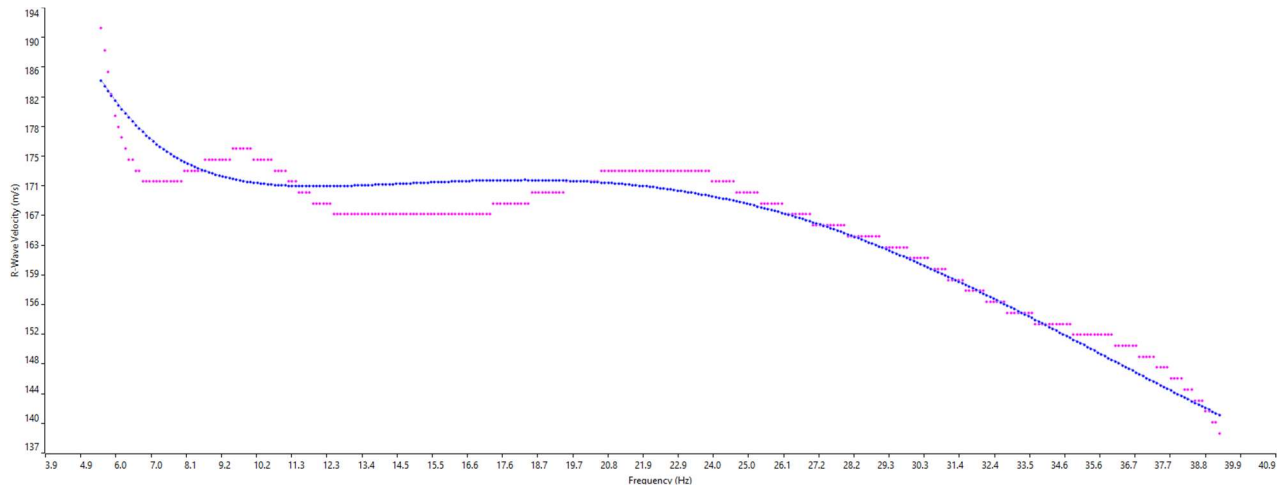


Fig. 3.1.3 – Curva di dispersione della base sismica (in magenta la curva di dispersione ottenuta, in blu quella calcolata).

Dalla sovrapposizione della curva di dispersione si è ottenuta la ricostruzione del sottosuolo in orizzonti aventi differenti spessori e valori di velocità come di seguito indicato:

M41		
Spessore	Profondità	V_s (m/sec)
1,2	0,0 – 1,2	119
1,6	1,2 – 2,8	194
2,8	2,8 – 5,6	218
3,1	5,6 – 8,7	167
4,3	8,7 – 13,0	196
4,0	13,0 – 17,0	211
6,0	17,0 – 23,0	224
7,0	23,0 – 30,0	236

Tabella 3.1.4 - Valori delle V_s alla linea sismica.

Di seguito viene riportato il diagramma delle velocità delle onde S in funzione della profondità:

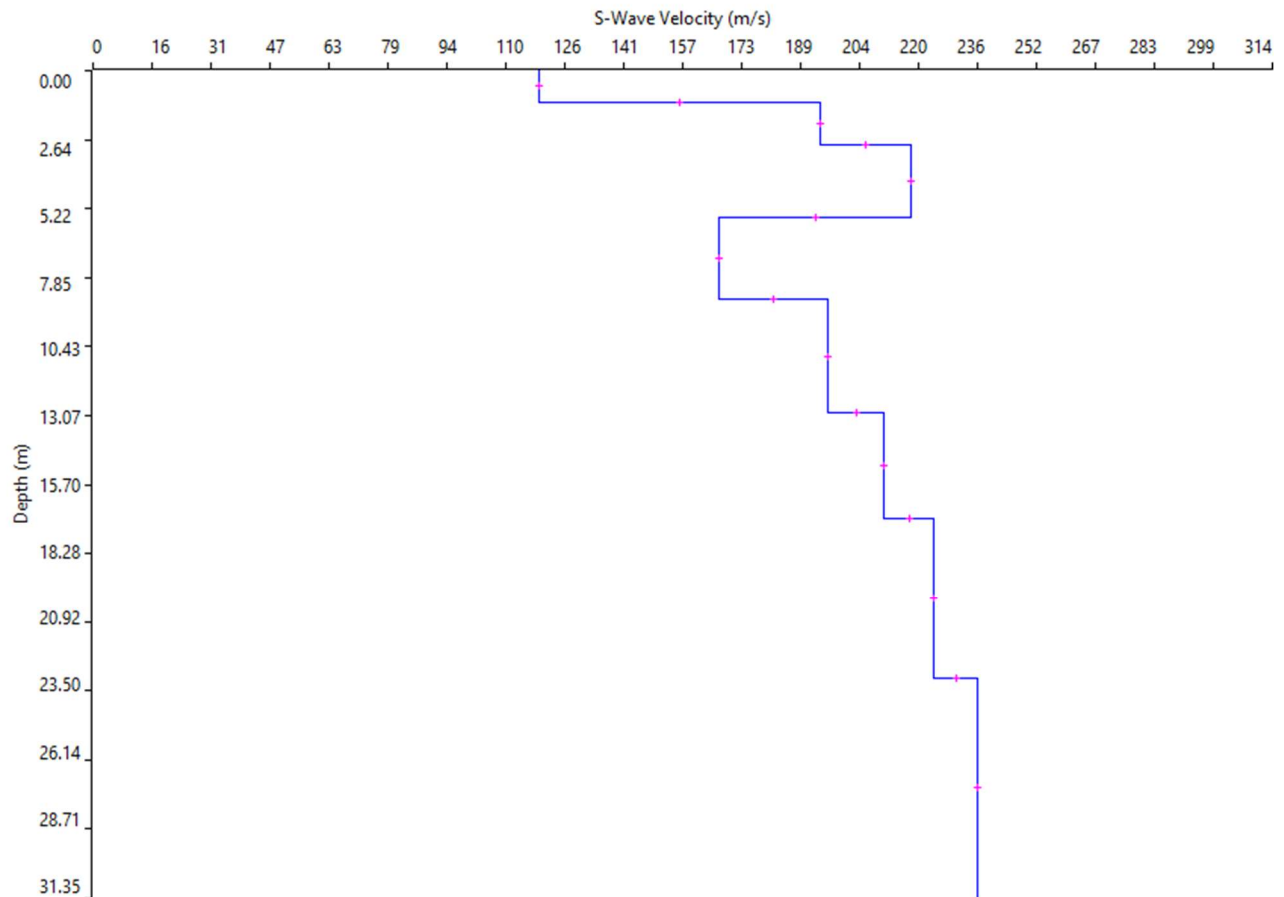


Fig. 3.1.5 – Diagramma delle velocità Vs riferite ai vari strati intercettati nella base sismica.

3.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE

Con l'introduzione dell'O.P.C.M. n. 3274 del 20 Marzo 2003 e succ. modif. sono stati rivisti i criteri per l'individuazione delle zone sismiche. In particolare, l'intero territorio nazionale è stato suddiviso in quattro livelli: da 1, più pericoloso, a 4 meno sensibile.

Il **territorio comunale di Vigevano** rientra in **zona sismica 3** ai sensi della D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023.

I suoli di fondazione sono suddivisi in cinque classi (A, B, C, D, E) in base alle loro caratteristiche stratigrafiche ed alla velocità media delle onde sismiche di taglio (trasversali), ovvero alle V_{Seq} :

$$V_{Seq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

V_i = Velocità dell'onda di taglio i -esimo strato

N = Numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il valore ricavato è:

$V_{s,eq} = V_{s30}$ pari a 204 m/s riferito al piano campagna.

Secondo lo schema presente nelle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018), i terreni indagati risultano tutti appartenere alla categoria di sottosuolo di tipo C ovvero *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”*.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 3.2.1 – Categoria di sottosuolo (tratto dalla Tabella 3.2.II delle NTC 2018)

3.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA

Al fine di determinare i valori di F_a dal punto di vista degli effetti litologici, sono stati utilizzati i risultati emersi dall'esecuzione dello stendimento geofisico con metodo MASW. Mediante tale elaborazione e con l'utilizzo di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia i quali hanno permesso la compilazione di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia si è calcolato il valore di F_a (fattore di amplificazione) da confrontare con i limiti di riferimento indicati dalla Regione Lombardia.

Per ottenere il suddetto F_a è necessario ricavare il valore di V_{seq} (onde sismiche di taglio o trasversali) utilizzando le velocità V_s degli strati intercettati mediante la formula precedentemente riportata.

Sulla base di parametri geotecnici e litologici, si individua la litologia prevalente del sito e da questo dato si sceglie la relativa scheda di riferimento riportata nella D.G.R. 8/7374 del 28 Maggio 2008 e successivamente riprese dalla D.G.R. IX/2616 del 30 Novembre 2011.

Nello specifico la normativa regionale riporta 6 tipi di schede litologiche:

- scheda per le litologie prevalentemente ghiaiose;
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-argillose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-sabbiose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie sabbiose (da utilizzarsi in zone di pianura).

Si riportano, nell'apposito diagramma, i valori delle V_s relative ad ogni strato. Tale confronto permette di verificare se si rientra o meno nel campo di validità della scheda di riferimento.

Nel caso specifico, il grafico ottenuto dalle velocità delle V_s e dalle rispettive profondità evidenzia come i dati rientrino nella scheda di riferimento per litologia sabbiosa.

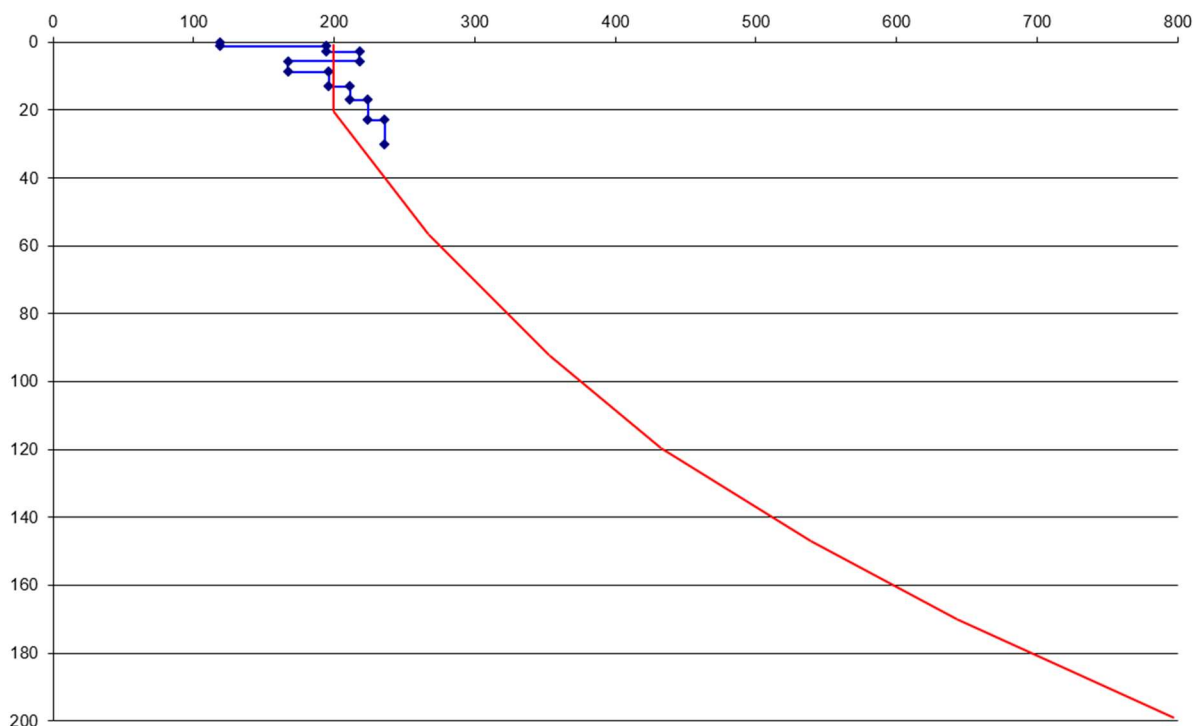


Fig. 3.3.1 - Grafico relativo alla "litologia sabbiosa" a cui sono stati sovrapposti i valori parziali di ogni intervallo di terreno in base alle Vs.

Come si può osservare, salvo locali inversioni nei primi metri di profondità, l'andamento delle Vs è posizionato al di "sopra" della linea rossa che divide il campo di validità dal campo di non validità. Per utilizzare correttamente l'abaco di fig. 3.3.2, il quale consente l'individuazione della corretta curva da utilizzare per l'individuazione dell' F_a , come vincolo viene posto che il primo strato debba avere almeno 4 m di spessore ed una velocità di almeno 200 m/s. qualora lo strato superficiale abbia profondità inferiore ai 4 m, si utilizzerà, per la scelta della curva, lo *strato superficiale equivalente*, a cui si assegna una velocità Vs calcolata come media pesata del valore di Vs degli strati superficiali la cui somma supera i 4 m di spessore. Successivamente, ottenuta la velocità del primo strato ed il relativo spessore si riportano questi valori all'interno dell'abaco (fig. 3.3.2) al fine di ricavare il colore della curva da utilizzare (fig. 3.3.4 e 3.3.5) per ottenere il valore di F_a . Tale parametro (F_a) verrà confrontato con quello riportato in bibliografia in funzione della struttura da realizzare: intervallo 0,1-0,5 s riferito a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e intervallo 0,5-1,5 s riferito a strutture più alte e flessibili. Nel nostro caso è stata effettuata la media pesata relativa ai primi 5.6 m. Si è così ottenuta una velocità del "primo strato" di circa 190 m/s assimilabile a 200 m/s.

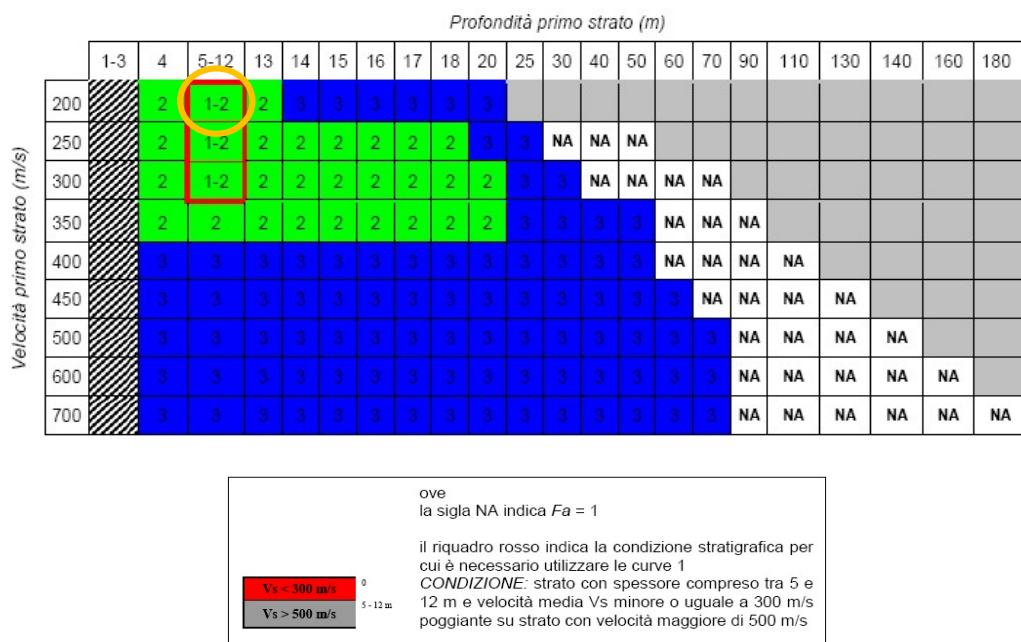


Figura 3.3.2 - Abaco che permette di individuare, in base al colore, la curva di riferimento per l'individuazione di F_a , grazie all'intersezione della profondità raggiunta dal primo strato e la sua velocità.

Intersecando il valore di velocità riscontrata con la profondità sopra indicata, si ricade nel campo 2, che corrisponde alla curva verde di fig. 3.3.4 e 3.3.5.

Con i valori sopra ottenuti si calcola il periodo "T" relativo al sito. Nel caso la velocità verificata dall'indagine non raggiungesse gli 800 m/s, occorre incrementare, la velocità e la profondità delle onde, utilizzando un passo adeguato, fino all'intercettazione degli 800 m/s.

Per la determinazione del periodo si utilizza la seguente equazione:

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

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo
 V_{s_i} = Velocità dell'onda di taglio i-esima

Stendimento sismico	Valore del periodo T calcolato
M41	0,77 s

Tabella 3.3.3 - Recante il valore del periodo T calcolato

Conoscendo la velocità del primo strato, la curva di riferimento ed il valore del periodo T calcolato, si può risalire al valore di F_a utilizzando gli abachi di riferimento di fig. 3.3.4 e fig. 3.3.5 per la litologia sabbiosa e riferiti rispettivamente ad edifici bassi e ad edifici alti.

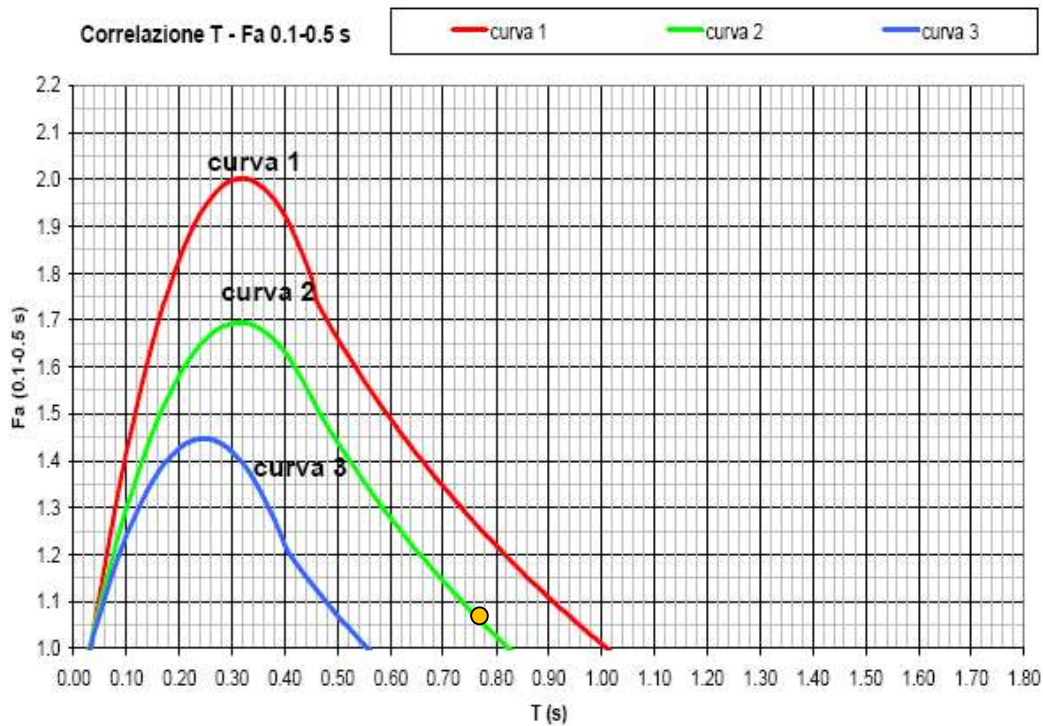


Figura 3.3.4 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici bassi)

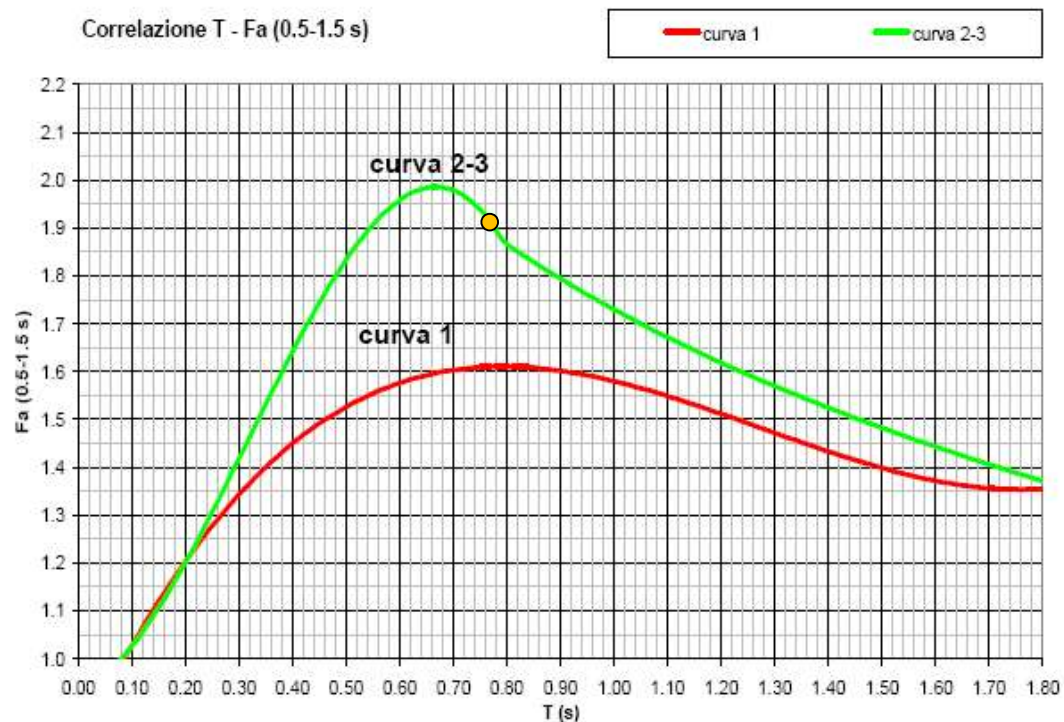


Figura 3.3.5 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici alti)

La procedura prevede di valutare F_a con le schede di valutazione sopra riportate e di confrontarlo con il corrispettivo valore di soglia, considerando una variabilità di $\pm 0,1$, che tiene conto la variabilità del valore di F_a ottenuto.

Dagli abachi emerge come il valore attribuito al periodo $T=0,77$ s, identifichi sulla curva verde un valore di F_a , arrotondato alla prima cifra decimale, **pari a 1,1 per edifici bassi e rigidi (F_a di riferimento per i terreni di tipo C =1,8) e F_a pari a 1,9 per edifici alti e flessibili (F_a di riferimento per i terreni di tipo C = 2,4).**

Ne deriva che, in entrambi i casi, il valore di F_a calcolato è inferiore al valore di riferimento, pertanto, in accordo con la vigente normativa (D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011), **lo spettro proposto dalla normativa per suoli di tipo C risulta sufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito.**

Le tabelle sottostanti riportano i valori di F_a relativi, nel primo caso a strutture basse (max 4 piani), nel secondo caso a strutture alte e flessibili (5 o più piani) per ogni tipo di suolo individuato dalla Regione Lombardia per il comune di Vigevano.

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.1-0.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,4	1,8	2,2	1,9

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.5-1.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,7	2,4	4,1	3,0

4 – INDAGINE MASW M42 – STRADA CASALINO

4.1 - RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SISMICI CON METODO MASW

Di seguito si riporta il sismogramma frutto della somma di ciascuna acquisizione, filtrato di eventuali disturbi di fondo:

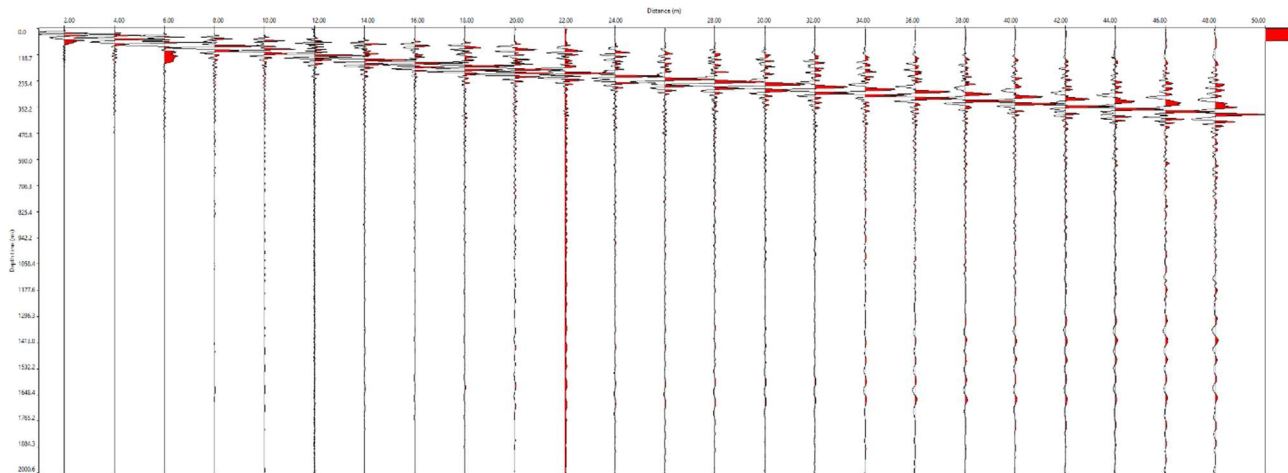


Fig. 4.1.1 – Sismogramma della base sismica.

L'elaborazione dei sismogrammi ha consentito di estrapolare la trasformata di Fourier, di seguito riportata; e da questa si risale alla curva di dispersione che, confrontata mediante sovrapposizione con quella teorica consente di ottenere sia gli spessori dei vari strati che le rispettive velocità.

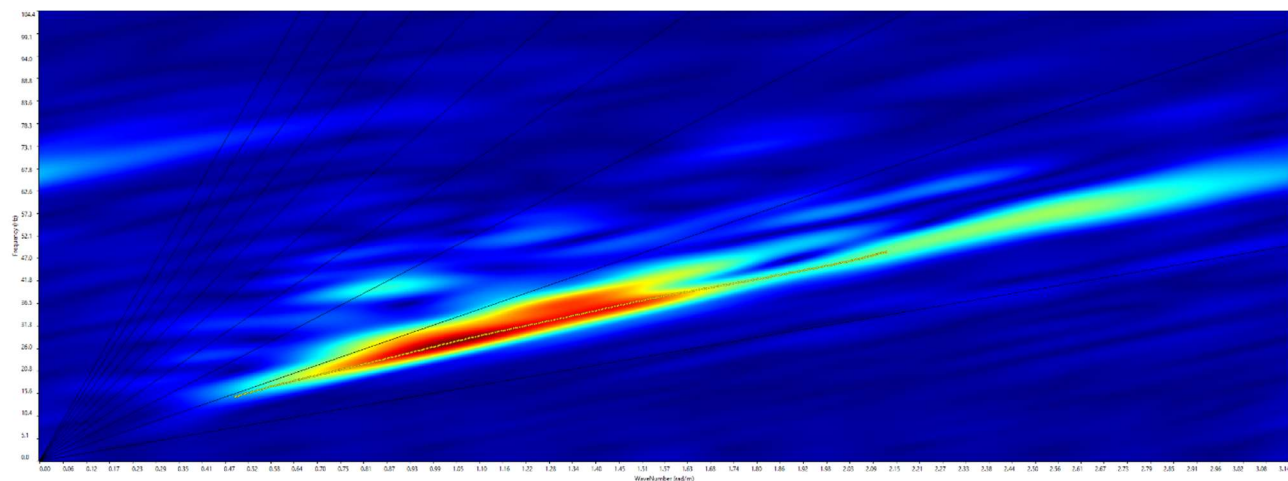


Fig. 4.1.2 – Trasformata di Fourier della base sismica.

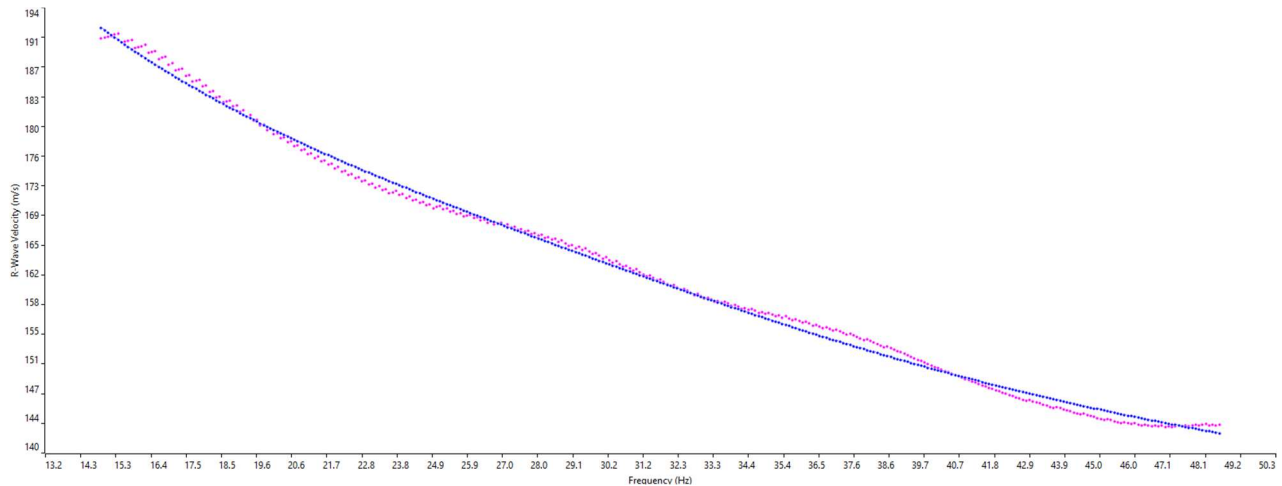


Fig. 4.1.3 – Curva di dispersione della base sismica (in magenta la curva di dispersione ottenuta, in blu quella calcolata).

Dalla sovrapposizione della curva di dispersione si è ottenuta la ricostruzione del sottosuolo in orizzonti aventi differenti spessori e valori di velocità come di seguito indicato:

M42		
Spessore	Profondità	V_s (m/sec)
1,0	0,0 – 1,0	135
1,2	1,0 – 2,2	167
1,5	2,2 – 3,7	215
1,3	3,7 – 5,0	187
2,3	5,0 – 7,3	249
8,0	7,3 – 15,3	237
6,9	15,3 – 22,4	265
7,6	22,4 – 30,0	293

Tabella 4.1.4 - Valori delle V_s alla linea sismica.

Di seguito viene riportato il diagramma delle velocità delle onde S in funzione della profondità:

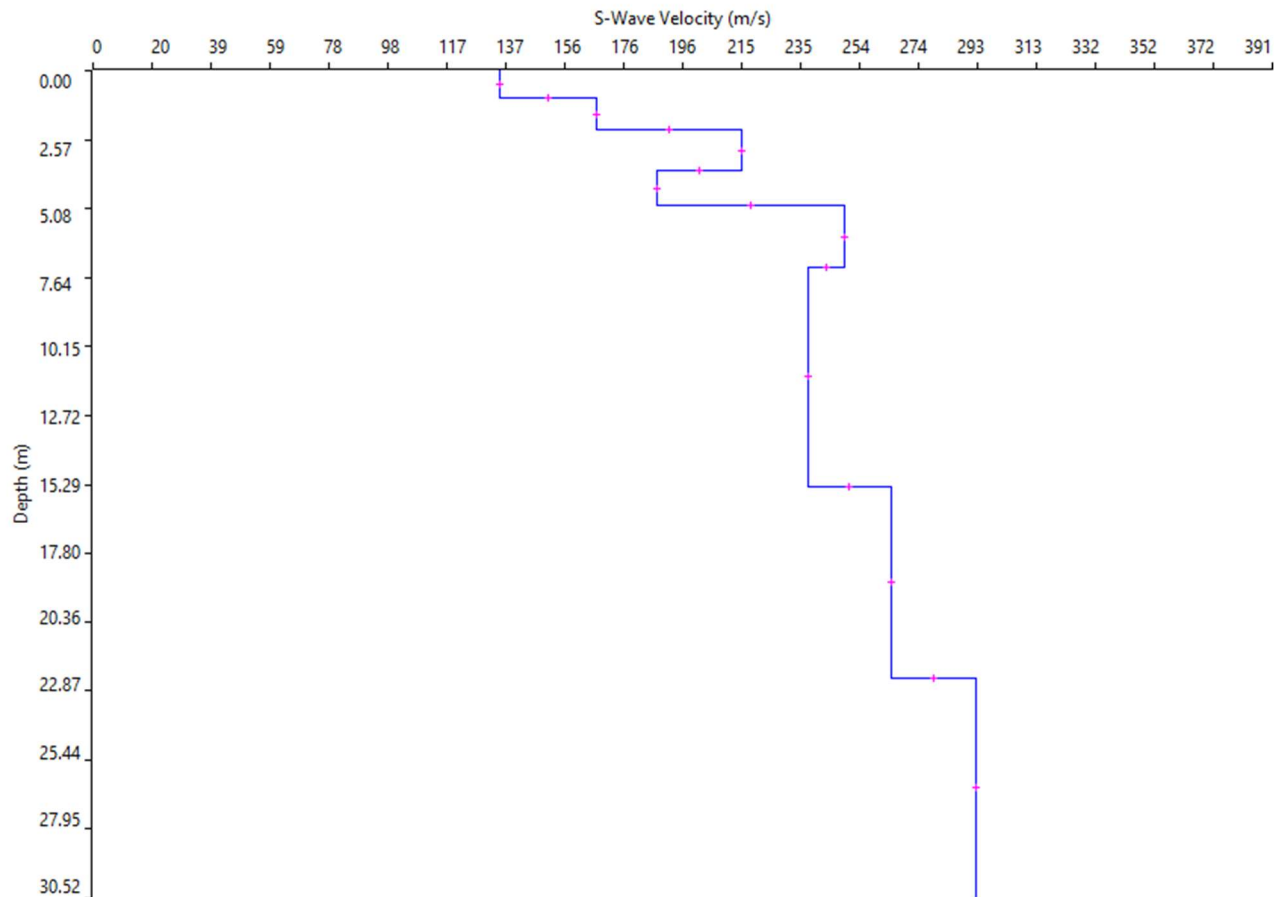


Fig. 4.1.5 – Diagramma delle velocità Vs riferite ai vari strati intercettati nella base sismica.

4.2 - APPLICAZIONE DELLE NORME TECNICHE

Con l'introduzione dell'O.P.C.M. n. 3274 del 20 Marzo 2003 e succ. modif. sono stati rivisti i criteri per l'individuazione delle zone sismiche. In particolare, l'intero territorio nazionale è stato suddiviso in quattro livelli: da 1, più pericoloso, a 4 meno sensibile.

Il **territorio comunale di Vigevano** rientra in **zona sismica 3** ai sensi della D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023.

I suoli di fondazione sono suddivisi in cinque classi (A, B, C, D, E) in base alle loro caratteristiche stratigrafiche ed alla velocità media delle onde sismiche di taglio (trasversali), ovvero alle V_{Seq} :

$$V_{Seq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

V_i = Velocità dell'onda di taglio i -esimo strato

N = Numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il valore ricavato è:

$V_{s,eq} = V_{s30}$ pari a 241 m/s riferito al piano campagna.

Secondo lo schema presente nelle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018), i terreni indagati risultano tutti appartenere alla categoria di sottosuolo di tipo C ovvero *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”*.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 4.2.1 – Categoria di sottosuolo (tratto dalla Tabella 3.2.II delle NTC 2018)

4.3 - VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ SISMICA DELL'AREA

Al fine di determinare i valori di F_a dal punto di vista degli effetti litologici, sono stati utilizzati i risultati emersi dall'esecuzione dello stendimento geofisico con metodo MASW. Mediante tale elaborazione e con l'utilizzo di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia i quali hanno permesso la compilazione di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia si è calcolato il valore di F_a (fattore di amplificazione) da confrontare con i limiti di riferimento indicati dalla Regione Lombardia.

Per ottenere il suddetto F_a è necessario ricavare il valore di V_{seq} (onde sismiche di taglio o trasversali) utilizzando le velocità V_s degli strati intercettati mediante la formula precedentemente riportata.

Sulla base di parametri geotecnici e litologici, si individua la litologia prevalente del sito e da questo dato si sceglie la relativa scheda di riferimento riportata nella D.G.R. 8/7374 del 28 Maggio 2008 e successivamente riprese dalla D.G.R. IX/2616 del 30 Novembre 2011.

Nello specifico la normativa regionale riporta 6 tipi di schede litologiche:

- scheda per le litologie prevalentemente ghiaiose;
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-argillose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-sabbiose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie sabbiose (da utilizzarsi in zone di pianura).

Si riportano, nell'apposito diagramma, i valori delle V_s relative ad ogni strato. Tale confronto permette di verificare se si rientra o meno nel campo di validità della scheda di riferimento.

Nel caso specifico, il grafico ottenuto dalle velocità delle V_s e dalle rispettive profondità evidenzia come i dati rientrino nella scheda di riferimento per litologia sabbiosa.

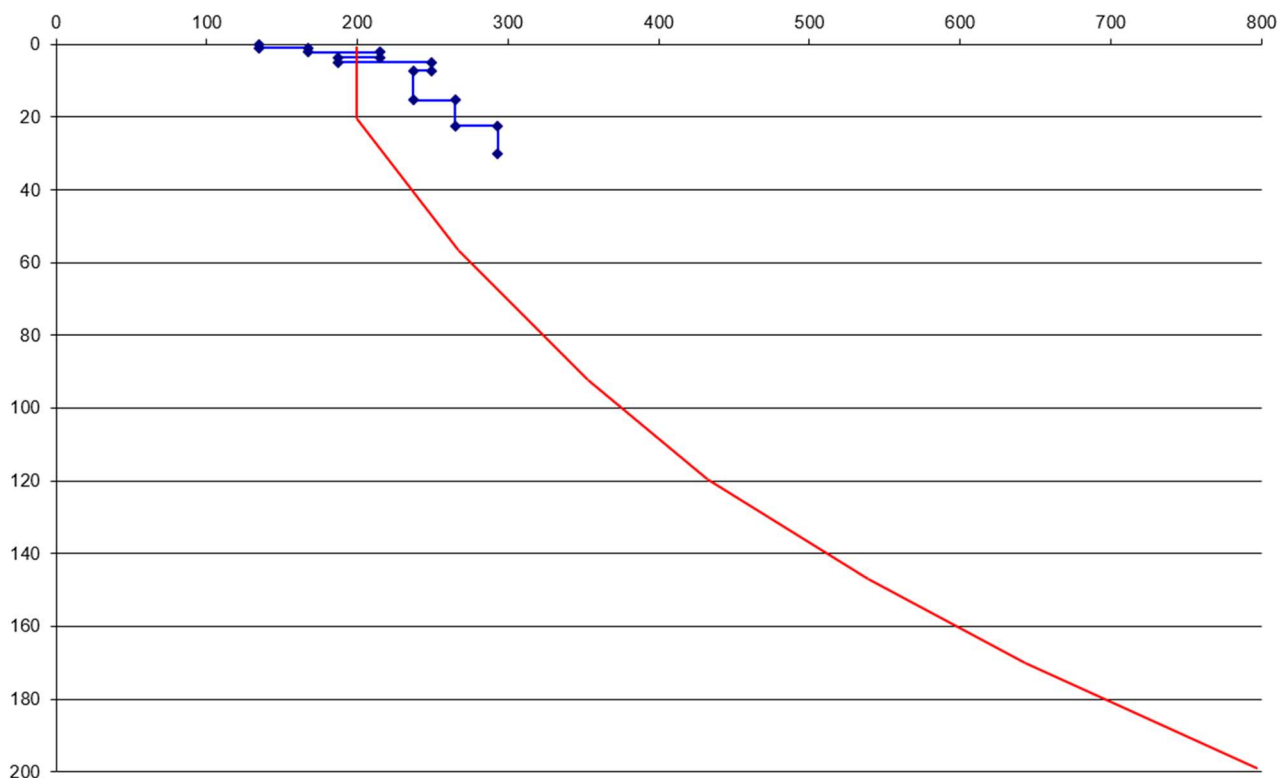


Fig. 4.3.1 - Grafico relativo alla "litologia sabbiosa" a cui sono stati sovrapposti i valori parziali di ogni intervallo di terreno in base alle Vs.

Come si può osservare, salvo locali inversioni nei primi metri di profondità, l'andamento delle Vs è posizionato al di "sopra" della linea rossa che divide il campo di validità dal campo di non validità. Per utilizzare correttamente l'abaco di fig. 4.3.2, il quale consente l'individuazione della corretta curva da utilizzare per l'individuazione dell' F_a , come vincolo viene posto che il primo strato debba avere almeno 4 m di spessore ed una velocità di almeno 200 m/s. Qualora lo strato superficiale abbia profondità inferiore ai 4 m, si utilizzerà, per la scelta della curva, lo *strato superficiale equivalente*, a cui si assegna una velocità Vs calcolata come media pesata del valore di Vs degli strati superficiali la cui somma supera i 4 m di spessore. Successivamente, ottenuta la velocità del primo strato ed il relativo spessore si riportano questi valori all'interno dell'abaco (fig. 4.3.2) al fine di ricavare il colore della curva da utilizzare (fig. 4.3.4 e 4.3.5) per ottenere il valore di F_a . Tale parametro (F_a) verrà confrontato con quello riportato in bibliografia in funzione della struttura da realizzare: intervallo 0,1-0,5 s riferito a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e intervallo 0,5-1,5 s riferito a strutture più alte e flessibili. Nel nostro caso è stata effettuata la media pesata relativa ai primi 7.3 m. Si è così ottenuta una velocità del "primo strato" di circa 202 m/s assimilabile a 200 m/s.

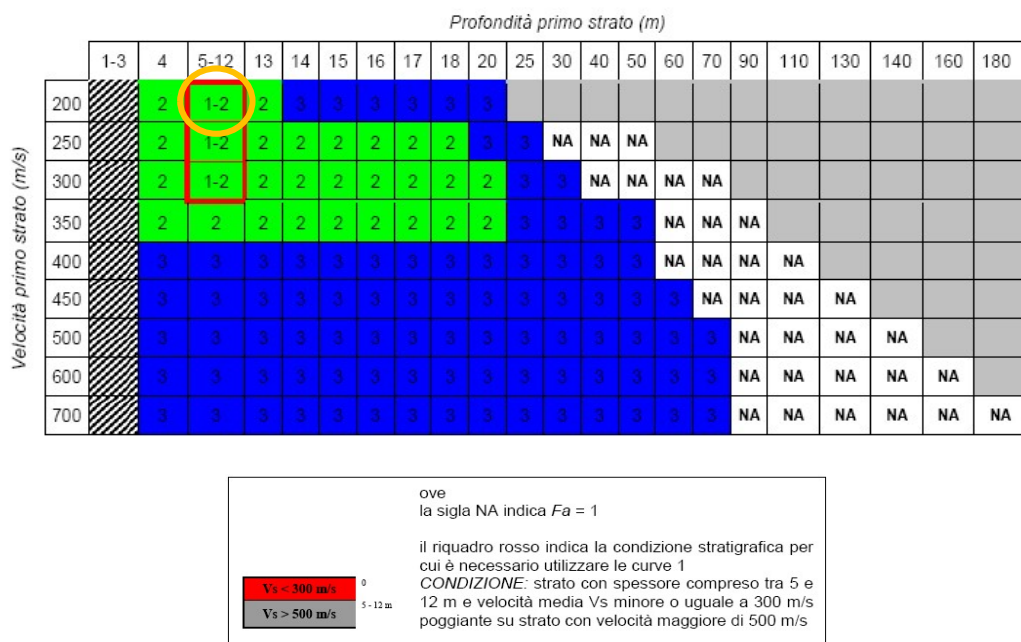


Figura 4.3.2 - Abaco che permette di individuare, in base al colore, la curva di riferimento per l'individuazione di F_a , grazie all'intersezione della profondità raggiunta dal primo strato e la sua velocità.

Intersecando il valore di velocità riscontrata con la profondità sopra indicata, si ricade nel campo 2, che corrisponde alla curva verde di fig. 4.3.4 e 4.3.5.

Con i valori sopra ottenuti si calcola il periodo "T" relativo al sito. Nel caso la velocità verificata dall'indagine non raggiungesse gli 800 m/s, occorre incrementare, la velocità e la profondità delle onde, utilizzando un passo adeguato, fino all'intercettazione degli 800 m/s.

Per la determinazione del periodo si utilizza la seguente equazione:

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

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

V_{s_i} = Velocità dell'onda di taglio i-esima

Stendimento sismico	Valore del periodo T calcolato
M42	0,63 s

Tabella 4.3.3 - Recante il valore del periodo T calcolato

Conoscendo la velocità del primo strato, la curva di riferimento ed il valore del periodo T calcolato, si può risalire al valore di F_a utilizzando gli abachi di riferimento di fig. 4.3.4 e fig. 4.3.5 per la litologia sabbiosa e riferiti rispettivamente ad edifici bassi e ad edifici alti.

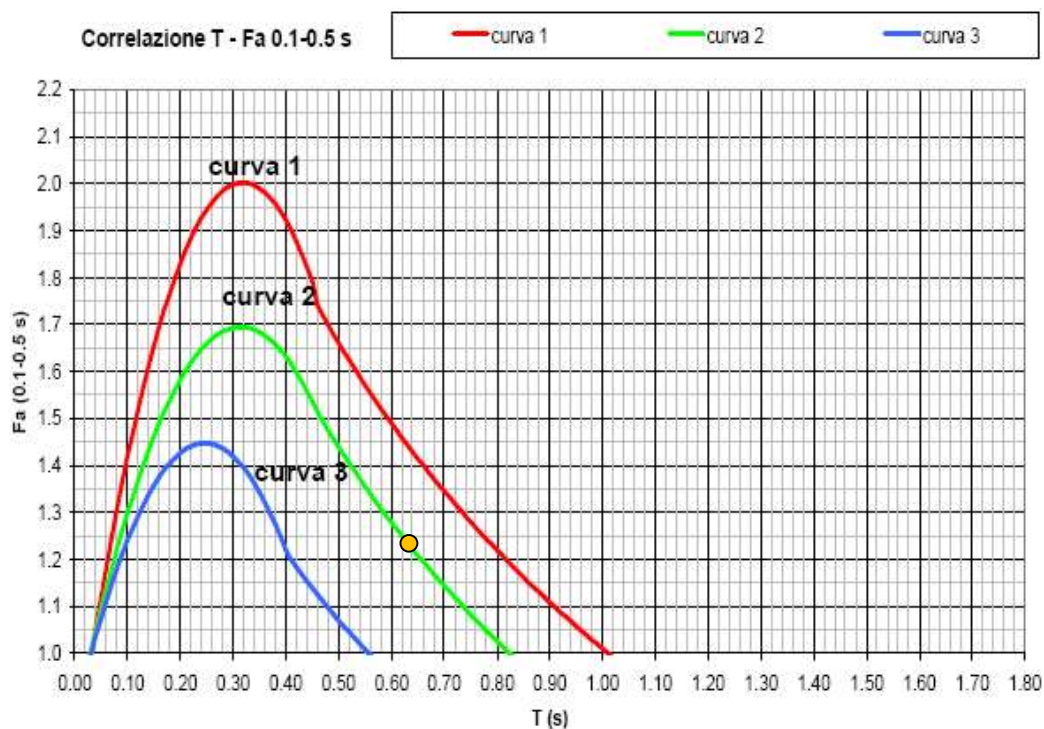


Figura 4.3.4 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici bassi)

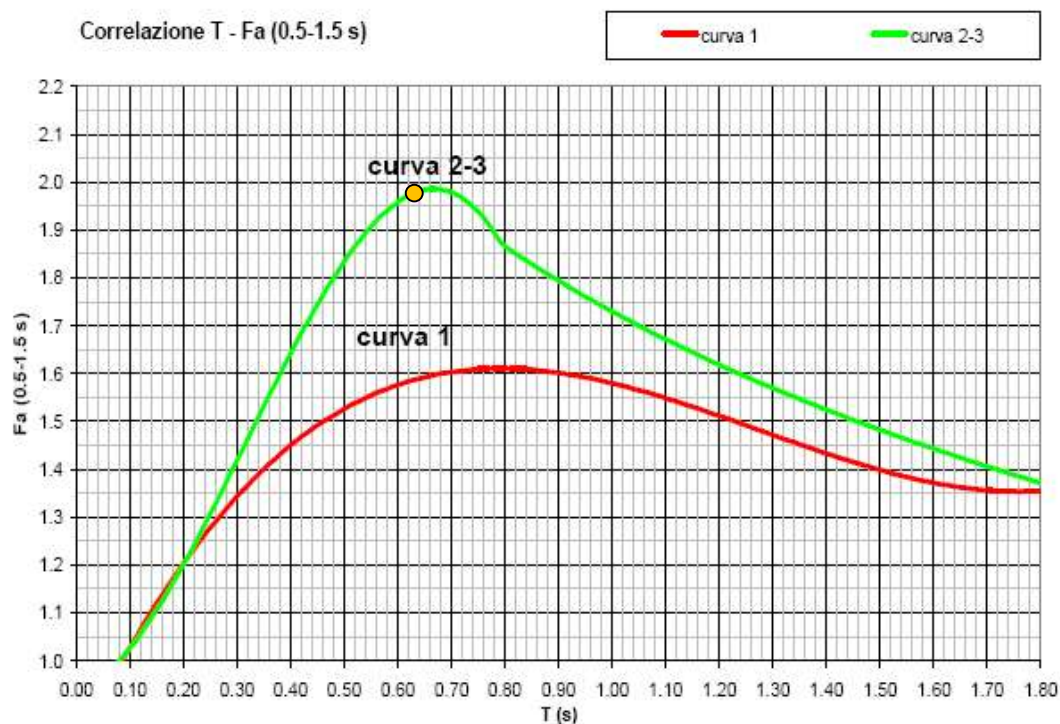


Figura 4.3.5 – Abaco di riferimento per la litologia sabbiosa per determinare Fa sulla base di T e della curva di riferimento (riferito ad edifici alti)

La procedura prevede di valutare F_a con le schede di valutazione sopra riportate e di confrontarlo con il corrispettivo valore di soglia, considerando una variabilità di $\pm 0,1$, che tiene conto la variabilità del valore di F_a ottenuto.

Dagli abachi emerge come il valore attribuito al periodo $T=0,63$ s, identifichi sulla curva verde un valore di F_a , arrotondato alla prima cifra decimale, **pari a 1,2 per edifici bassi e rigidi (F_a di riferimento per i terreni di tipo C =1,8) e F_a pari a 2,0 per edifici alti e flessibili (F_a di riferimento per i terreni di tipo C = 2,4).**

Ne deriva che, in entrambi i casi, il valore di F_a calcolato è inferiore al valore di riferimento, pertanto, in accordo con la vigente normativa (D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011), **lo spettro proposto dalla normativa per suoli di tipo C risulta sufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito.**

Le tabelle sottostanti riportano i valori di F_a relativi, nel primo caso a strutture basse (max 4 piani), nel secondo caso a strutture alte e flessibili (5 o più piani) per ogni tipo di suolo individuato dalla Regione Lombardia per il comune di Vigevano.

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.1-0.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,4	1,8	2,2	1,9

VALORI DI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.5-1.5 s					
COMUNE	D.G.R. XII/1717 del 28 dicembre 2023	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Vigevano	3	1,7	2,4	4,1	3,0

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

