

# RELAZIONE GEOLOGICA

AI SENSI DELLA DGR XI/2616 - D.M. 17 GENNAIO 2018

## **LAVORI DI RECUPERO DEL SECONDO PIANO DELL'IMMOBILE SITO IN VIA LIVIGNO N.3**

**COMUNE DI MILANO  
PROVINCIA DI MILANO**

COMMITTENTE: ATS DELLA CITTÀ METROPOLITANA DI MILANO

IL TECNICO: DOTT. GEOL. ROSARIO SPAGNOLO

*Milano, Dicembre 2020*

---

Dott. Geol. Rosario Spagnolo - GEOLOGIA TECNICA-IDROGEOLOGIA

Via Stradella,35 – San Giorgio Bigarello (MN) 46051 Tel.Fax. 0376.262759 – 338.2949637 – e-mail ro.spagnolo@tiscali.it

**SOMMARIO**

PREMESSA.....	2
1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	5
2 ANALISI DELLO STUDIO GEOLOGICO COMUNALE.....	6
2.1 CARTA DEI VINCOLI.....	6
2.2 CARTA DELLA FATTIBILITA'.....	7
2.3 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO.....	8
3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE.....	9
4 ASSETTO MORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO.....	10
5 RISCHIO ALLUVIONI (PGRA).....	14
6 VUNERABILITA' DELL'ACQUIFERO.....	14
7 RELAZIONE SULLA PERICOLOSITA' SISMICA.....	16
7.1 PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE.....	16
7.2 SISMOTETTONICA.....	18
8 ANALISI SISMICA.....	19
8.1 METODOLOGIA MASW.....	19
8.2 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO.....	24
9 APPROFONDIMENTO DI 1° E 2° LIVELLO.....	25
9.1 APPROFONDIMENTO SISMICO DI II° LIVELLO.....	26
10 RELAZIONE SULLE INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	30
10.1 PROFILO STRATIGRAFICO.....	32
11 VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI IN CONDIZIONI SISMICHE.....	32
12 CONCLUSIONI.....	36

## PREMESSA

Il presente rapporto geologico, geotecnico e sismico è finalizzato all'analisi delle caratteristiche meccaniche di un terreno su cui insiste la struttura oggetto d'intervento. Il progetto consiste nel recupero del 2° piano di un edificio sito in via Livigno n.3, in comune di Milano.

La valutazione dell'idoneità al progetto è stata eseguita mediante rilevamenti in sito geologici, idrogeologici, analisi sismiche e indagini geognostiche approfondite.

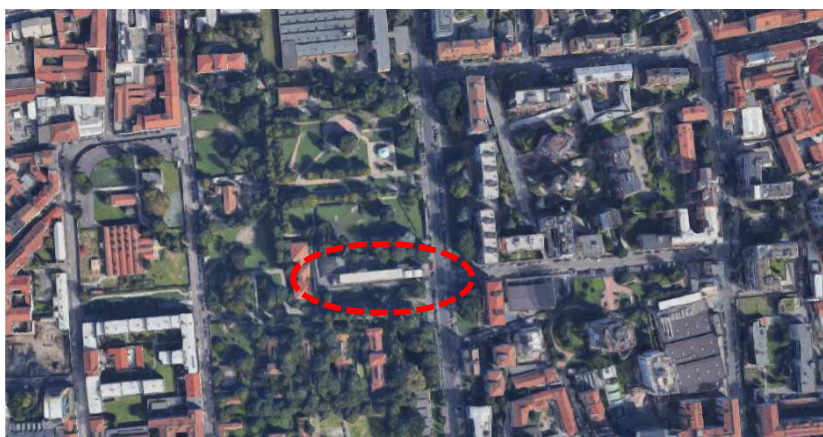
Le finalità sono orientate al riconoscimento e alla parametrizzazione, dal punto di vista geotecnico, degli strati di terreno potenzialmente coinvolti dalle opere di fondazione, sia in termini di capacità portante sia di valutazione della pericolosità sismica.

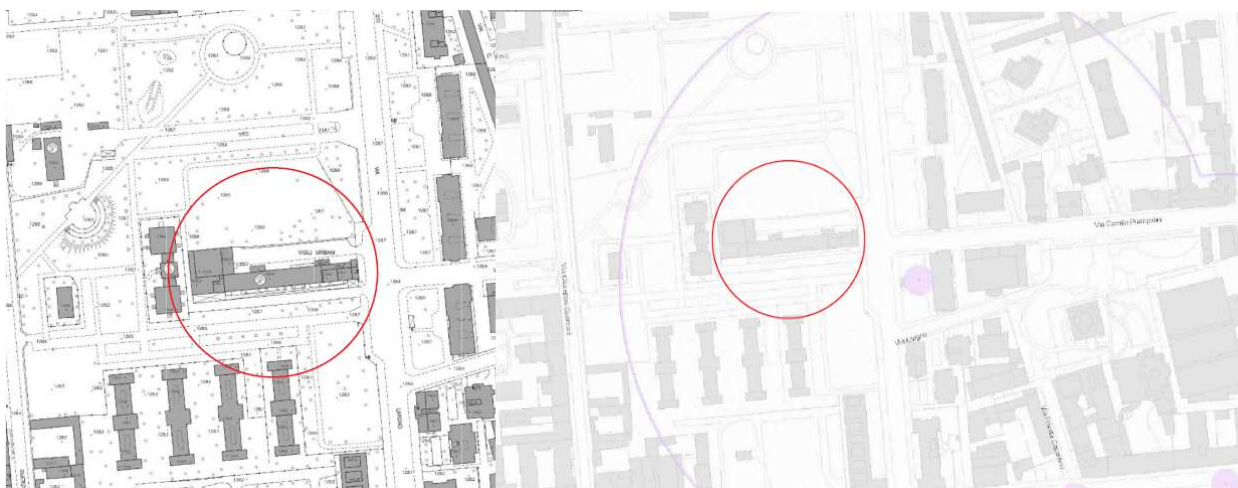
A corredo dello studio è stata realizzata una prova penetrometrica dinamica (SCPT) spinta alla profondità di 11.40 m da p.c. e indagini sismiche specifiche, utilizzando attrezzatura standard.

I valori registrati in profondità dalla prova, opportunamente integrati e commisurati con i dati geologici ed idrogeologici della zona, hanno consentito la determinazione dei seguenti parametri:

- ricostruzione e descrizione della stratigrafia del sottosuolo;
- individuazione della falda idrica;
- parametrizzazione geotecnica del terreno di fondazione;
- classificazione sismica dei terreni di fondazione come definito nel D.M. 17.01.18;

Fotoarea con ubicazione area d'intervento





L'edificio è catastalmente identificato al foglio 35 - mappale 222.

Il presente studio, oltre che alla verifica delle caratteristiche geomeccaniche dei terreni, è finalizzato alla valutazione della fattibilità geologica dell'intervento in progetto, alla verifica della sua compatibilità con le Norme Geologiche di Attuazione del PGT di Milano, all'individuazione delle problematiche e criticità di carattere geologico e geotecnico da approfondire nel corso degli accertamenti esecutivi. Proponendo particolare attenzione alla interazione del progetto con l'assetto geomorfologico ed idrogeologico dell'intero settore e alle eventuali interferenze con le preesistenze poste al controno dell'area di intervento.

Di seguito sono riportate le diverse fasi nelle quali è stato articolato lo studio:

- Ricerca bibliografica relativa a lavori ed indagini già svolte nell'area in questione con l'acquisizione di tutti i dati utili all'inquadramento preventivo del progetto.
- Rilevamento geologico, idrogeologico e geomorfologico di superficie della zona direttamente interessata dall'intervento e dei settori circostanti.
- Progettazione di una campagna di indagini geognostiche, di prove in sito necessarie per la stesura della relazione geologica - geotecnica.
- Redazione delle carte tematiche di sintesi più significative e di specifici elaborati.
- Verifica della compatibilità tra le caratteristiche geologiche generali dell'area e le scelte progettuali con evidenziazione delle problematiche e delle necessarie prescrizioni geologico – tecniche puntuali.

**Progetto di indagine geognostica**

- esecuzione di 1 prova penetrometrica di tipo dinamico (SCPT) spinta alla profondità di 11.40 m da p.c.;
- esecuzione di 1 prova MASW finalizzata alla determinazione delle Vs necessaria alla definizione della categoria sismica del sottosuolo.

I valori registrati in profondità dalla prova, opportunamente integrati e commisurati con i dati geologici ed idrogeologici della zona, hanno consentito la determinazione dei seguenti parametri:

- ricostruzione e descrizione della stratigrafia del sottosuolo;
- individuazione della falda idrica;
- parametrizzazione geotecnica del terreno di fondazione;
- classificazione sismica dei terreni di fondazione come definito nel D.M. 17.01.18).

Il metodo di studio seguito è quello contenuto nel D.g.r. n. IX/2616 del 30 novembre 2011: “Aggiornamenti 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. 30 novembre 2011, n.9/2611”

Nello studio geologico comunale di adeguamento alla sopracitata L.R. 12/05, nella redazione della carta di pericolosità sismica locale, il sito in esame è stato inserito nella zona sismica Z4a, il sito così come contemplato dalla normativa, necessità del 1° e 2° livello sismico di approfondimento per valutare il fattore di amplificazione sismica.

## 1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le indagini effettuate nell'area interessata sono state eseguite in ottemperanza a quanto previsto dalle seguenti normative:

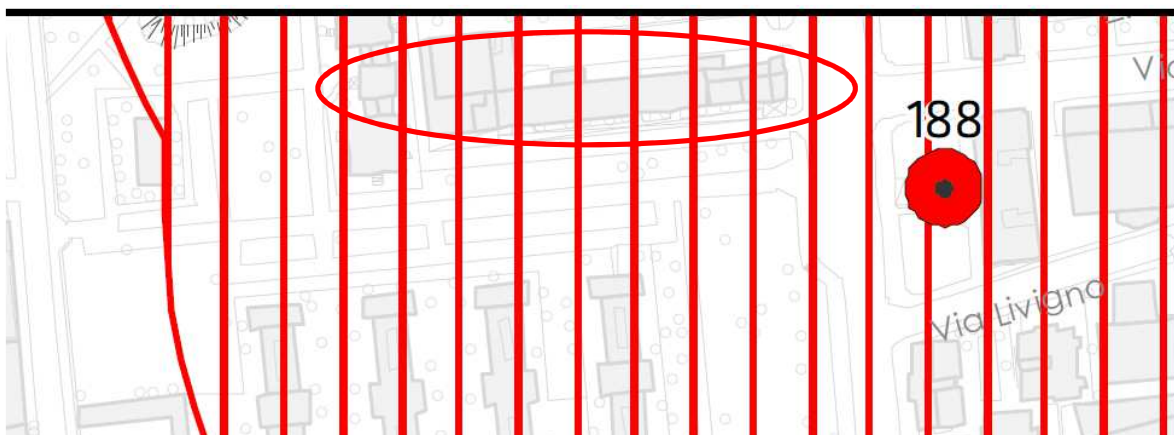
- Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14 gennaio 2008 NTC 2008;
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Istruzione per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008;
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale;
- Norma Tecnica UNI EN 1997 -1:2005 (Eurocodice 7 – Progettazione Geotecnica);
- Eurocodice 8 – Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.
- Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17 gennaio 2018 NTC 2018.
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018

## 2 ANALISI DELLO STUDIO GEOLOGICO COMUNALE

Nel presente paragrafo si procede all'esame dello studio geologico comunale redatto a supporto del PGT.




### 2.1 CARTA DEI VINCOLI

Dalla carta dei vincoli si evince come l'edificio, oggetto di studio, venga perimetrato all'interno della fascia di rispetto dei pozzi comunali.



#### IDROGEOLOGIA

##### Pozzi (DLgs 152/2006 e DGR 7/12693)

-  Pozzi di captazione
-  Zona di tutela assoluta (10 m.)
-  Fasce di rispetto (200 m.)





##### Fontanili

-  Testa di fontanile
-  Aree di rispetto dei fontanili (Art. 41, NTA del PTC Parco Agricolo Sud Milano)

#### DIFESA DEL SUOLO

##### PAI - Piano per l'Assetto Idrogeologico del Lambro (L 183/1989, DPCM 24-05-2001 e DGR 7/7365)

##### Fasce fluviali

-  Limite tra la fascia A e la fascia B
-  Limite tra la fascia B e la fascia C
-  Limite esterno della fascia C
-  Limite di progetto tra la fascia B e la fascia C

## 2.2 CARTA DELLA FATTIBILITA'

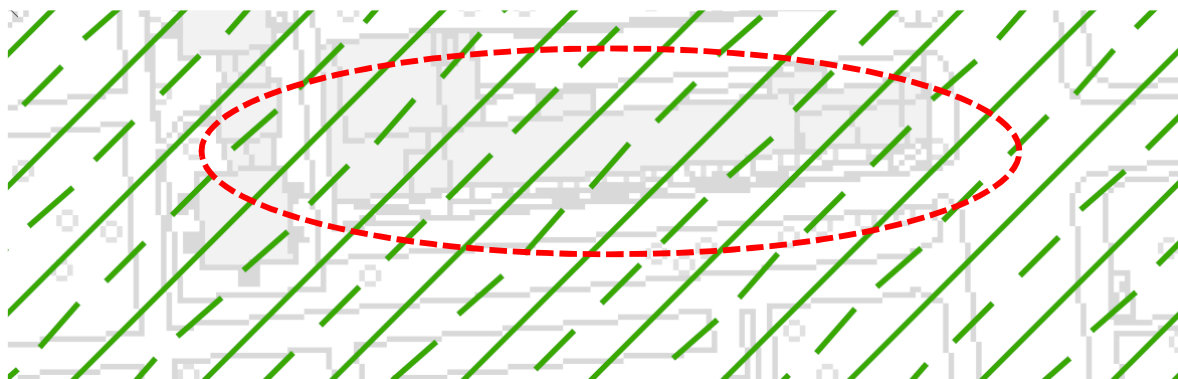
L'area ricade in classe di fattibilità seconda ovvero "fattibilità con modeste limitazioni".

Il sito studiato, così come contemplato dalle norme geologiche prevede:

- indagine geotecnica con prove in sito (tale attività è stata svolta attraverso l'esecuzione delle prove penetrometriche eseguite in sito;
- esecuzione di rilevamento geologico di dettaglio;
- esecuzione di indagine geofisica.

Le norme geologiche, inoltre, prevedono approfondimenti di carattere idrogeologico e di verifica della soggiacenza della falda freatica, l'indagine dovrà prevedere l'analisi puntuale sulla vulnerabilità idrogeologica, in relazione alla tipologia dell'intervento.

Estratto della carta della fattibilità



### FATTIBILITA' GEOLOGICA

#### Classi di fattibilità geologica



F2 - Fattibilità con modeste limitazioni

F3 - Fattibilità con consistenti limitazioni

**F3a** Aree allagate in occasione di eventi meteorici eccezionali o allagabili con minore frequenza (tempi di ritorno >50 anni) e/o con modesti valori di velocità ed altezze d'acqua tali da non pregiudicare l'incolumità delle persone, la funzionalità degli edifici e infrastrutture e lo svolgimento di attività economiche.

**F3b** Aree a bassa soggiacenza della falda (< 5 m)

**F3c** Zone a litologia limoso-argillosa prevalente

**F3d** Ambiti di cava cessata



## 2.3 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO

La carta della pericolosità sismica locale fa ricadere l'area in esame in zona Z4a: zone di pianura con presenza di depositi fluvio-glaciali granulari. L'area in esame è soggetta al primo e secondo livello di approfondimento sismico e alla verifica dell'indice di liquefazione. La normativa contempla il primo e secondo livello di approfondimento sismico, tale approfondimento dovrà verificare il fattore di amplificazione ( $F_a$ ), qualora tale valore calcolato sia maggiore del valore soglia comunale si dovrà procedere al 3° livello di approfondimento, se invece rimane sotto soglia dovrà essere utilizzato lo spettro di risposta elastico previsto dal D.M. 17 gennaio 2018.

Stralcio della tavola della pericolosità sismica



### PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

#### Zona sismica di appartenenza (OPCM 3274/03)



Zona 4

#### Indagini sismiche



Ubicazione indagini MASW

#### Classificazione del tipo di suolo in funzione della risposta sismica



Grado Buono - Classe B  
Velocità sismica 360 m/s < VS30 < 800 m/s

### GEOMORFOLOGIA

#### Scenari di pericolosità sismica locale

Forme morfologiche (Z4a)

### 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE

Le forme e i terreni del territorio di Milano sono di era quaternaria e di natura fluviale.

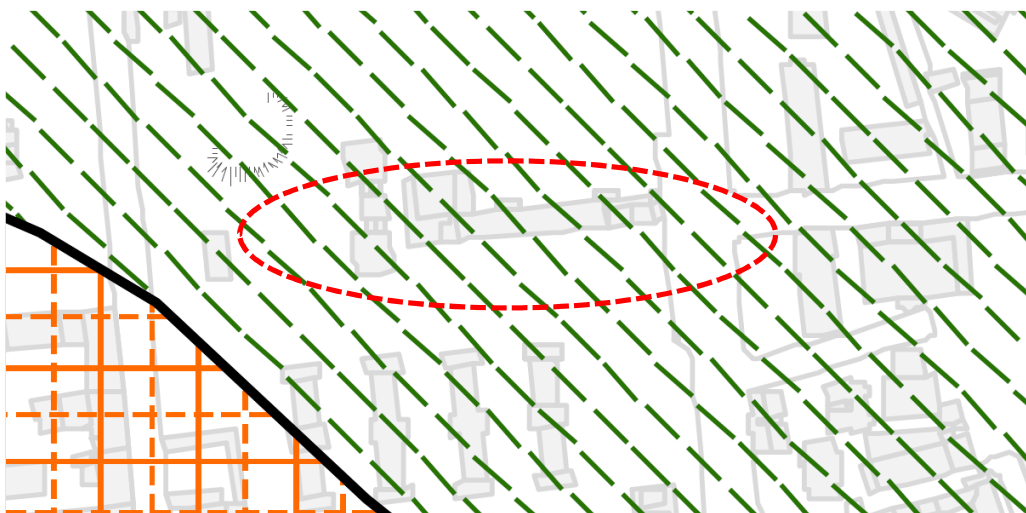
Fa parte del cosiddetto “Livello Fondamentale della Pianura”, costituito da lenti ghiaioso-sabbiose con intercalazioni argillose anche se non mancano ciottoli fino a decimetrici di rocce granitiche e granodioritiche ben arrotondati e breccie metamorfiche.

Questi terreni fino a circa 140 metri di profondità sono stati depositi nel corso del Pleistocene superiore ad opera degli scaricatori fluvio-glaciali provenienti dai fronti di espansione dei ghiacciai e sono classificati in letteratura come “Diluvium Recente”. Essi sono stati trasportati dalle acque di fusione dei ghiacciai innalzando il livello della pianura fino all’odierna morfologia, in successione ai sedimenti di origine marina costituiti da argille e argille marnose.

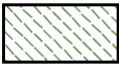



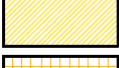

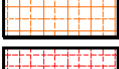
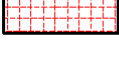
Da ultimo, nel periodo Olocenico, si sono depositi i sedimenti ghiaioso-sabbiosi a tratti argillosi (“Alluvium antico”) formando i terrazzi attuali con morfologia modificata dall’intervento antropico e non più distinguibili se non dalla mancanza di uno strato superiore di alterazione.

Localmente in superficie si osservano litozone caratterizzate da sabbie con limo (Passirana), da sabbie limose con ghiaia (settore meridionale in prossimità dei fontanili principali) e da ghiaie limose con sabbia (settore meridionale e orientale in prossimità di fontanili e corsi d’acqua minori).

Estratto della carta litologica



**Litologia superficiale**

	G1 - Ghiaia con sabbia
	G2 - Ghiaia con sabbia debolmente limosa
	G3 - Ghiaia con sabbia limosa
	L4 - Limo debolmente sabbioso-ghiaioso
	L5 - Limo sabbioso-ghiaioso
	S1 - Sabbia con ghiaia
	S2 - Sabbia con ghiaia debolmente limosa
	S3 - Sabbia con ghiaia limosa

#### 4 ASSETTO MORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

L'evoluzione geologica della pianura padana qui in esame è collegata allo sviluppo delle avanfosse alpina e appenninica; questo grande bacino che durante il Pliocene e parte del Pleistocene risulta corrispondere ad un golfo occupato da acque marine e caratterizzato da successive ingressioni e regressioni, presenta un profilo asimmetrico con inclinazione del lato meridionale dove, in prossimità del margine appenninico, lo spessore dei sedimenti plio-pleistocenici supera i 7.000 metri.

Nel corso del Pleistocene medio-superiore il bacino appare in gran parte colmato e divengono attivi i processi geomorfologici legati in particolare al reticolo idrografico; durante i vari intervalli interglaciali e soprattutto nel corso dell'ultima fase post-glaciale si verificò il rapido riempimento delle aree esterne agli apparati morenici con depositi fluvioglaciali e fluviali; le conoidi ciottolose-ghiaiose-sabbiose dell'alta pianura passano, per alternanza, ai depositi fluviali con granulometria prevalentemente fine, limosa-argillosa, nella bassa e media pianura.

Le unità geologiche affioranti nel territorio sono elusivamente di ambiente continentale e costituite da morene, depositi fluvioglaciali ed alluvioni di età compresa tra il Pliocene e l'Olocene.

La suddivisione delle diverse unità geologico-litologiche è stata operata sulla base di elementi morfologici caratteristici, quali orli di terrazzo e/ contropendenze.

Questo a causa della frammentarietà dei corpi sedimentari in aree di pianura e di estese coperture eluvio-colluviali, che si manifesta con un esiguo di affioramenti naturali.

Si tratta di depositi fluvioglaciali costituiti da un punto di vista litologico da ghiaie a supporto clastico, a supporto di matrice sabbiosa e sabbiosa-limosa. I clasti arrotondati o subarrotondati di dimensione media da 1 a 5 cm, massima fino a 20 cm.

La pianura lombarda, in cui ricade il Comune di Milano, rappresenta una delle maggiori riserve idriche europee. Infatti, la struttura idrogeologica del territorio è caratterizzata dalla presenza di potenti livelli acquiferi sfruttabili, in particolare nella media e nella bassa pianura.

Lo stato delle conoscenze, relativamente buono e chiaramente descritto nella Relazione Generale del Programma di Tutela e Uso delle Acque della Regione Lombardia, "Classificazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei di pianura", consente di distinguere le seguenti aree idrogeologicamente importanti:

- Zona di ricarica delle falde: corrisponde alla parte settentrionale della pianura dove dominano le alluvioni oloceniche e sedimenti fluvioglaciali pleistocenici, a granulometria grossolana, e l'acquifero è praticamente ininterrotto da livelli poco permeabili. Detta area si estende quasi completamente a monte della fascia delle risorgive. In questa zona l'infiltrazione da piogge, nevi e irrigazioni, permette la ricarica tanto della prima falda come delle falde profonde.
- Zona di non infiltrazione alle falde: si trova sempre nella parte alta della pianura ma corrisponde alle aree in cui affiora la roccia impermeabile o dove è presente una copertura argillosa (depositi fluvioglaciali del Pleistocene medio e antico).
- Zona ad alimentazione mista: è ubicata nella zona centrale e meridionale della pianura, in cui le falde superficiali sono alimentate da infiltrazioni locali, ma non trasmettono tale afflusso alle falde più profonde, dalle quali sono separate da diaframmi poco permeabili. Si tratta dell'area corrispondente alla massima parte della pianura.
- Zona di interscambio tra falde superficiali e profonde si rinviene in corrispondenza dei corsi d'acqua principali, soprattutto dei fiumi.

Le caratteristiche idrogeologiche risultano strettamente dipendenti dalla natura dei depositi fluviali e fluvioglaciali in quanto le caratteristiche granulometriche condizionano il grado di permeabilità e di conseguenza le modalità della circolazione idrica sotterranea.

Le principali variazioni litologiche sono contraddistinte dalla progressiva prevalenza di terreni limoso-argillosi, che si verifica sia con l'aumento della profondità sia procedendo da nord verso sud. Gli acquiferi di maggiore potenzialità si trovano entro i primi 100 metri di profondità, sede di falde libere che traggono alimentazione per lo più dall'infiltrazione superficiale delle acque meteoriche e irrigue.

Più in profondità, si hanno ulteriori acquiferi sabbiosi o, più raramente, sabbioso-ghiaiosi con falde confinate, intercalati a prevalenti limi e argille, che traggono la loro alimentazione dalle aree poste più a nord e dallo scambio con gli acquiferi soprastanti, laddove i setti argillosi di separazione sono discontinui. Secondo la ricostruzione idrostratigrafica tradizionale nella pianura lombarda, facendo riferimento alle caratteristiche di permeabilità dei litotipi e alla loro disposizione geometrica, vengono identificati i seguenti complessi acquiferi principali:

Acquifero tradizionale:

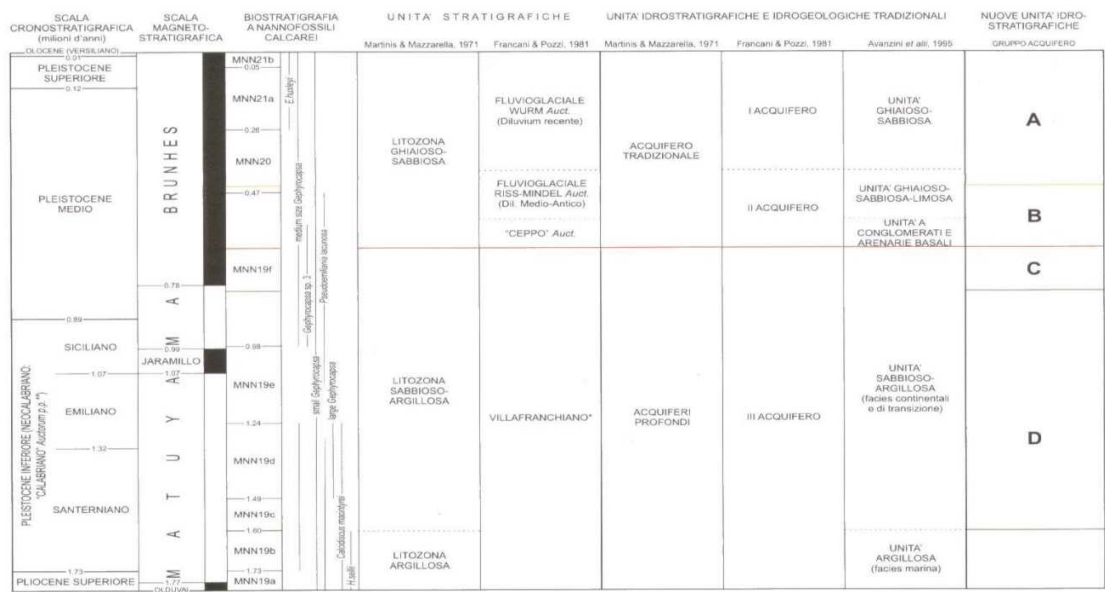
A partire dalla media pianura esso risulta suddiviso, da un livello poco permeabile di spessore variabile, comunque, in aumento verso la bassa pianura, in un acquifero superficiale generalmente freatico e nel sottostante acquifero tradizionale s.s., semiconfinato.

Acquifero profondo:

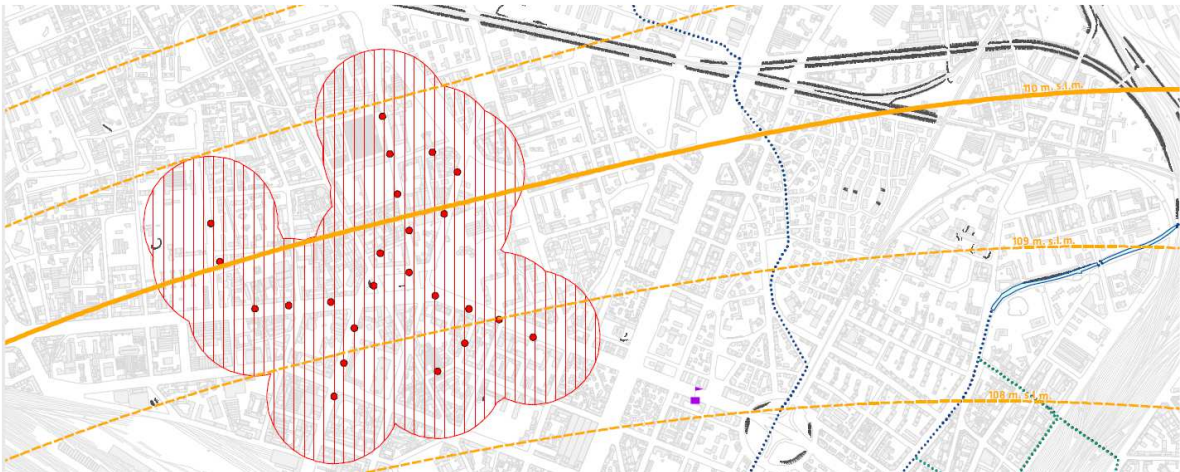
E' costituito dai livelli permeabili presenti all'interno dei depositi continentali del Pleistocene inferiore ed è a sua volta suddiviso in quattro corpi acquiferi minori (acquifero multistrato), separati da banchi argillosi anche molto spessi e continui.

Differentemente, secondo gli studi effettuati dalla Regione Lombardia, il bacino padano può essere suddiviso in quattro unità idrostratigrafiche (Gruppi Acquiferi A, B, C, D) separate da barriere impermeabili che si sviluppano a scala regionale.

**La falda da studi di pozzi limitrofi la si colloca oltre i 6 m da p.c..**



Estratto della carta idrogeologica



IDROGEOLOGIA

Pozzi (DLgs 152/2006 e DGR 7/12693)

- Zona di tutela assoluta (10 m.)
- ▨ Fasce di rispetto (200 m.)

Fontanili

- Testa di fontanile

PIEZOMETRIA

Linee isopiezometriche

- Isopiezometriche principali
- - - Isopiezometriche ausiliarie



## 5 RISCHIO ALLUVIONI (PGRA)

In riferimento alla D.G.R. n° X/6738 si è consultata la mappa nel geoportale della Regione Lombardia riguardante le aree a rischio alluvioni al fine di verificare la pericolosità e il rischio idraulico del sito in progetto.

Dalla verifica effettuata il sito in esame non ricade all'interno di aree vulnerabili dal punto di vista idraulico.

Ortofoto del geoportale della Lombardia del PGRA



## 6 VUNERABILITA' DELL'ACQUIFERO

Per la valutazione della vulnerabilità intrinseca delle acque di falda, che dipende dalle caratteristiche naturali, climatiche, pedologiche e idrogeologiche del sistema, tutte le metodologie si basano sull'esame e la sovrapposizione di alcune informazioni tematiche, più o meno approfondite e quantificate, riferite sostanzialmente:

- alle caratteristiche del suolo e la sua capacità di attenuazione della vulnerabilità;
- alle caratteristiche dello strato insaturo, sovrastante la falda, e alla sua capacità di trasmettere gli inquinanti alla falda;

- alle caratteristiche idrogeologiche e alla profondità delle falde idriche.

La vulnerabilità degli acquiferi non dipende solo dai parametri naturali, ma anche dalle pressioni a cui l'ambiente è sottoposto, sotto forma di centri di pericolo e fonti di inquinamento.

Nel caso in esame si è adottata una metodologia di valutazione della vulnerabilità complessiva, basata su più stadi di elaborazione e tematismi.

La vulnerabilità quindi rappresenta il grado di protezione degli acquiferi soggiacenti il territorio più o meno antropizzato, ed indica la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi ad ingerire e diffondere un inquinante idroveicolato. Essa dipende dalle caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero e dalla litologia del terreno non saturo soprastante.

I fattori presi in considerazione per la valutazione della vulnerabilità sono:

- tipo e grado di permeabilità dei depositi;
- tipo e spessore di eventuali coperture a granulometria fine e con bassa permeabilità;
- presenza di livelli ghiaiosi sotterranei;
- soggiacenza della superficie piezometrica dell'acquifero;
- condizioni geomorfologiche particolari, quali la presenza di importanti paleoalvei o di terrazzi fluviali.

Il principio su cui si basano tutti i metodi esistenti è quello di dare una valutazione ai diversi tipi di parametri presi in considerazione, valutazione che non può che essere arbitraria, con la quale si attribuiscono dei punteggi relativi alla funzione che il parametro assunto svolge nel contesto indagato.

L'assunzione dei parametri è pertanto legata alla possibilità di reperire gli stessi: in modo empirico, da fonti bibliografiche, tramite prove dirette di vario genere (carotaggi, prove di portata, piezometrie, granulometrie, prove di laboratorio ecc.).

La scelta del metodo è inoltre condizionata anche dalla possibilità di reperire in modo omogeneo su un territorio i valori necessari alla parametrizzazione.

In tale metodo i fondamentali fattori presi in considerazione, che controllano la vulnerabilità sono:



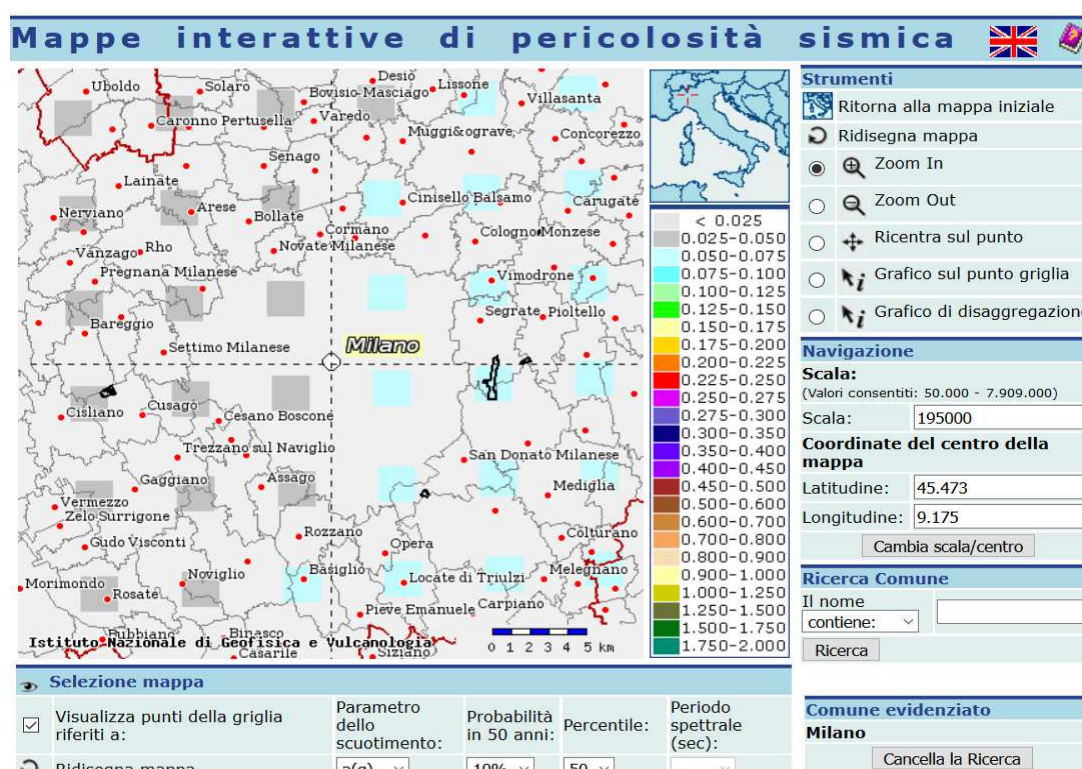
- **l'accessibilità idraulica**, intesa come l'effettiva possibilità che un inquinante idroportato abbia per giungere nello strato saturo;
- **la capacità di attenuazione** dell'insaturo, ossia l'insieme dei processi che portano a diminuire la concentrazione dell'inquinante. Questi fattori si esplicano nella valutazione della vulnerabilità intrinseca tramite i seguenti parametri d'ingresso;
- tipo di acquifero (falda libera, confinata, semiconfinata...);
- litologia e grado di consolidazione dell'insaturo;
- soggiacenza.

Dalla elaborazione di tutti i fattori elencati l'area presenta una vulnerabilità media.

## 7 RELAZIONE SULLA PERICOLOSITA' SISMICA

### 7.1 PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE

La DGR n. X/2129 del 14 luglio 2014 la Regione Lombardia ha classificato il comune di Milano in zona sismica 3. Nella tabella seguente si riportano i valori di accelerazione (ag max) previsti dalla DGR per il comune in esame.

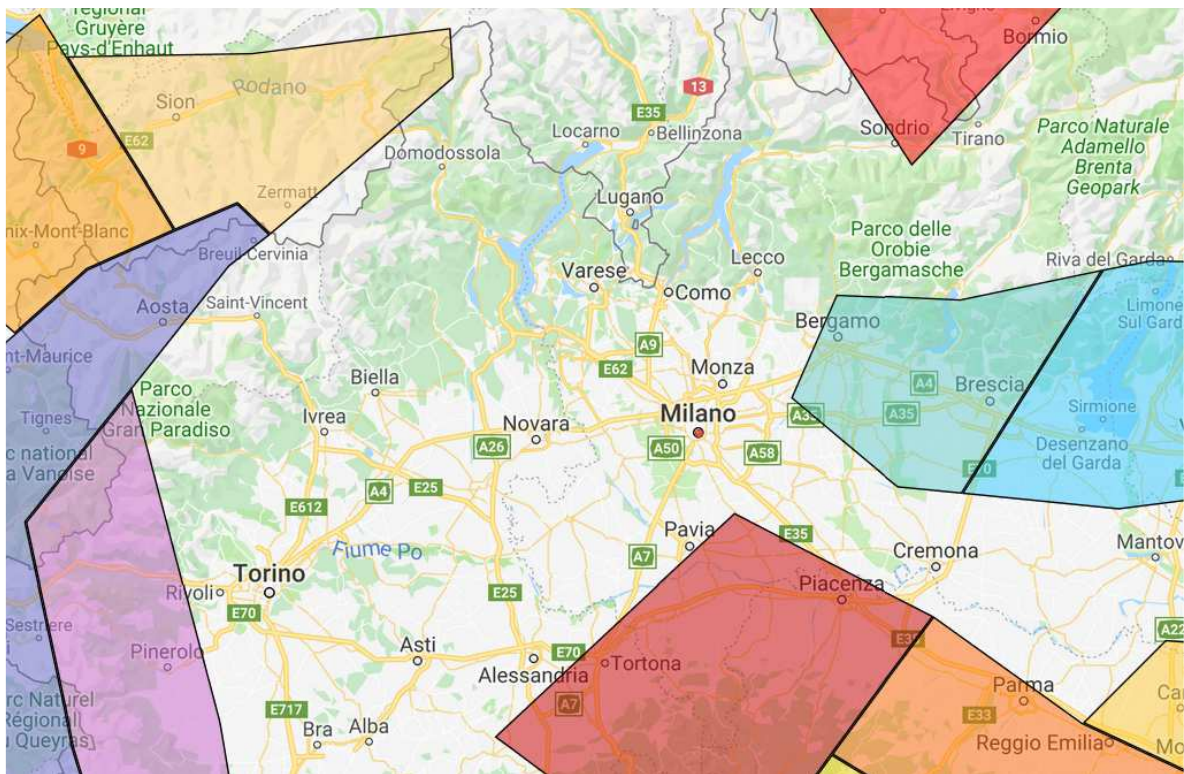


Per determinare il carattere sismogenetico dell'area del comune di Milano si è presa in considerazione la pubblicazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia nella quale è stato mappato il territorio nazionale in zone sismogenetiche: il territorio comunale si colloca a circa 50 Km a nord della zona sismogenetica 911 (Tortona Bobbio) e a circa 50 Km a ovest della zona sismogenetica 907 (Bergamasco).

Il sito in progetto è ubicato a nord dalla zona 911, nella zona sismogenetica viene individuato un regime tettonico debolmente compressivo in atto. La zona è compresa all'interno di strutture compressive (prevalentemente thrust) responsabili della sismicità, allineate lungo la costa o a breve distanza da essa.

Zona Sismogenetica 911: rappresenta la porzione più esterna ed occidentale della fascia in compressione dell'Appennino Settentrionale, caratterizzata dallo sprofondamento passivo della litosfera adriatica (placca tettonica "Adria") sotto il sistema di catena nell'Arco Appenninico Settentrionale (placca tettonica "Northern Apenninic Arc") con cinematismi attesi di sovrascorrimenti e faglie trascorrenti aventi assi SW-NE; i terremoti storici hanno raggiunto il valore massimo pari a  $M_d = 4,1$ ; le zone ipocentrali si verificano generalmente a profondità comprese tra 8 e 12 Km con profondità efficace di 8 km; nella Zona Sismogenetica 911 è previsto, sulla base dei meccanismi focali, valori di massima magnitudo pari a  $M_{max} = 6,14$ .

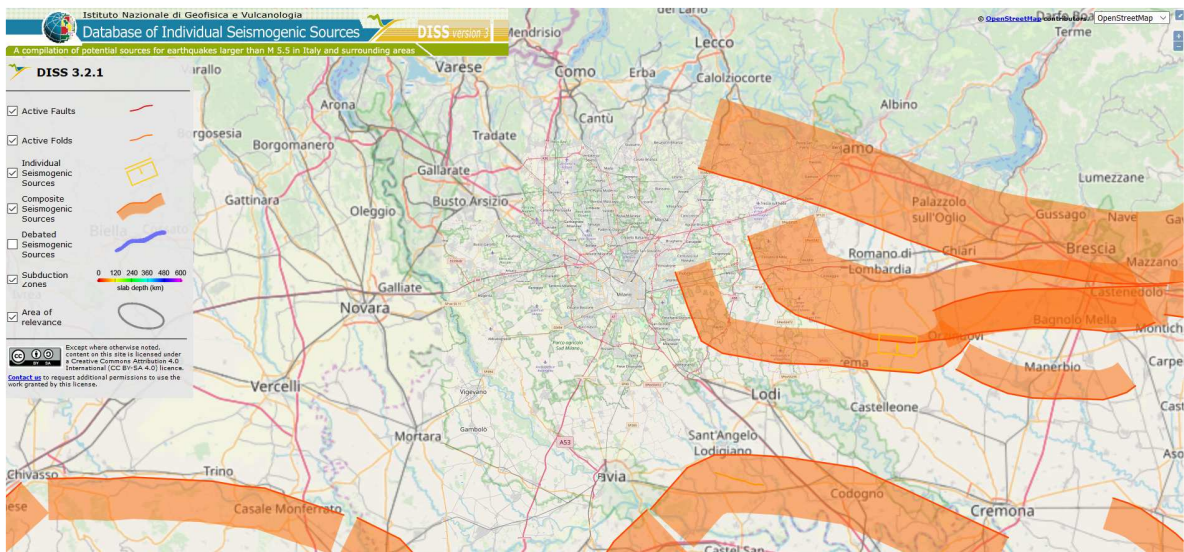
Zona sismogenetica 907: include la parte più bassa delle province di Bergamo e Brescia. È caratterizzata da una sismicità di energia normalmente medio-bassa con la sola eccezione del terremoto di Soncino evento del 1802, a cui viene assegnata una magnitudo  $M_w$  intorno a 5.9.



Tale zona, come dalle rilevazioni dell'INGV, è caratterizzata da una magnitudo massima di 5.90  $M_w$ .

## 7.2 SISMOTETTONICA

Nel presente paragrafo si evidenzia quanto riportato dal DDIS (database do Individual Seimogenetic Sources) elaborato dall'Istituto nazinale Geofisica che fornisce informazioni sulle faglie attive in Italia.





## 8 ANALISI SISMICA

E' stata condotta una indagine geofisica di sismica per ricavare una caratterizzazione dinamica del sottosuolo nelle prime decine di metri con l'individuazione delle principali unità geofisiche presenti. L'indagine è consistita in uno stendimento di sismica posizionato, così come riportato nella foto sopra riportata, in modo da mantenere la linearità dello stendimento ed evitare il disturbo. La lunghezza dello stendimento è di 45,5 metri (il massimo consentito).

Lungo lo stendimento sono stati posizionati 12 geofoni monocomponente verticali, del tipo elettromagnetico a bobina mobile con frequenza propria di 10 Hz, in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche prodotte da una sorgente energizzante costituita da una massa battente verticale. Si è ripetuto lo stendimento utilizzando dei geofoni orizzontali con frequenza di 10 Hz, posizionati longitudinalmente allo stendimento e generando una sollecitazione sismica verticale, per la misura della velocità della componente longitudinale delle onde di Rayleigh R.

La distanza tra i geofoni è stata fissata in 3,5 m. Si è utilizzato un punto di energizzazione posto all'estremità, a 7 m di distanza dal primo geofono.

### 8.1 METODOLOGIA MASW

Nelle prospezioni sismiche per le quali si utilizzano le onde di tipo P, la maggior parte dell'energia sismica totale generata si propaga come onde superficiali di tipo Rayleigh.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente in frequenza di queste onde è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) e quindi da una diversa lunghezza d'onda. Questa proprietà si chiama *dispersione*. Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di volume (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (**Vs**), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di **Rayleigh** è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Per ottenere un profilo verticale di velocità **Vs** bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Una molteplicità di tecniche diverse sono state utilizzate nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi.

La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a rifrazione. MASW può essere efficace anche con solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni verticali a bassa frequenza (4.5 Hz).

Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde **S (Vs)** è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- acquisizione dei dati sperimentali;
- estrazione della curva di dispersione;
- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs (profilo 1-D), che descrive la variazione di Vs con la profondità.

Una mappa bidimensionale (mappa 2-D) può essere costruita accostando e sovrapponendo più profili 1-D consecutivi.

#### **PROGETTO D'INDAGINE**

Il sondaggio sismico di tipo MASW è stato eseguito utilizzando un sismografo digitale, in grado di registrare i segnali provenienti da geofoni a componente verticale e orizzontali e di permettere, grazie ad un software di elaborazione interno, un rapido controllo della qualità della registrazione, consentendo un processing preliminare dei dati in situ.

Le impostazioni dei parametri di acquisizione dello strumento, scelti in funzione del tipo di indagine eseguito, della lunghezza dello stendimento, del grado di risoluzione

ricercato, delle condizioni ambientali rispetto alle fonti di rumore e tenendo conto della relativa uniformità delle successioni sedimentarie presenti nelle zone indagate, sono riportate in tabella 3.

TIPO DI INDAGINE	INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO	NUMERO DI CAMPIONI	DURATA DI REGISTRAZIONE
MASW	250 $\mu$ s	4096	1024 ms

**Tabella 3** - Parametri di acquisizione del profilo sismico di tipo MASW.

Una massa del peso di 8 kg, battente su una piastra metallica, fissata al terreno in posizione verticale, è stata utilizzata come dispositivo in grado di generare onde sismiche.

Per l'elaborazione dei dati non è stata necessaria una correzione topografica dei dati.

L'elaborazione e l'interpretazione dei dati sismici di tipo MASW è stata eseguita con l'ausilio del software winMASW, che consente di analizzare dati sismici (common-shot gathers) acquisiti in campagna in modo tale da poter ricavare il profilo verticale della VS (velocità delle onde di taglio).

Tale risultato viene ottenuto tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh, determinate tramite la tecnica MASW.

La procedura si sviluppa in due operazioni svolte in successione:

- 1) determinazione dello spettro di velocità (sul quale l'utente deve identificare la curva di dispersione);
- 2) inversione della curva di dispersione (precedentemente individuata) attraverso l'utilizzo di algoritmi genetici (detti anche evolutivi).

I comuni metodi lineari forniscono, infatti, soluzioni che dipendono pesantemente dal modello iniziale di partenza che l'utente deve necessariamente fornire. Per la natura del problema (inversione delle curve di dispersione), la grande quantità di minimi locali porta necessariamente ad attrarre il modello iniziale verso un minimo locale che può essere significativamente diverso da quello reale (o globale). In altre parole, i metodi lineari

richiedono che il modello di partenza sia già di per sé vicinissimo alla soluzione reale. In caso contrario il rischio è quello di fornire soluzioni erranee.

Gli algoritmi evolutivi (come altri analoghi) offrono invece un'esplorazione molto più ampia delle possibili soluzioni. A differenza dei metodi lineari non è necessario fornire alcun modello di partenza. E' invece necessario definire uno "spazio di ricerca" (search space) all'interno del quale vengono valutate diverse possibili soluzioni. Quella finale viene, infine, proposta con una stima della sua attendibilità (deviazioni standard), ottenuta grazie all'utilizzo di tecniche statistiche. Il principale punto di forza di WinMASW è quindi proprio quello di fornire risultati molto più robusti rispetto a quelli possibili con altre metodologie, arricchiti anche da una stima dell'attendibilità. Tali caratteristiche vengono ottenute a prezzo di uno sforzo computazionale piuttosto intensivo che si riflette in tempi macchina più lunghi rispetto quelli comunemente necessari coi metodi di inversione lineare (che però rischiano di fornire risultati piuttosto imprecisi). Tali tempi di calcolo dipendono dai parametri scelti dall'utente per l'inversione dei dati.

#### INTERPRETAZIONE DEL PROFILO SISMICO DI TIPO MASW

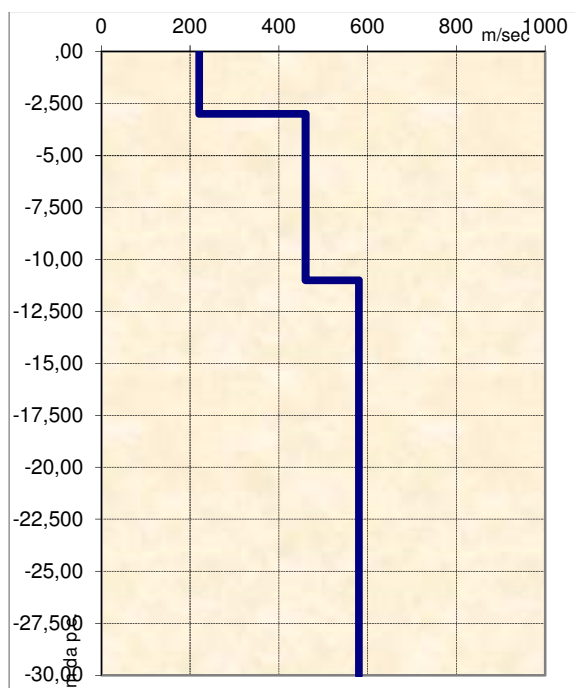
Per l'esecuzione del profilo sismico di tipo MASW, sono state eseguite due energizzazioni verticali agli estremi dello stendimento, per ottimizzare e vincolare il processo di inversione dei dati.

Grazie alle conoscenze geologiche dell'area in esame, si è stabilito di utilizzare, per l'interpretazione dei dati acquisiti, una modellistica a 3 strati. La curva di dispersione relativa al sondaggio sismico eseguito è mostrata in figura 6.

Solo il modo fondamentale della curva è stato analizzato per la determinazione del parametro Vs30. L'analisi del profilo sismico MASW eseguito ha permesso la definizione di un modello 1D di velocità delle onde di taglio, localizzabile nel baricentro dello stendimento.

#### ANALISI SISMICA MASW

		I strato	II strato	III strato
S1	VS (m/s)	220	460	580
	spessore (m)	3	8	∞



- diagramma velocità Vs/profondità -

Il valore  $V_{eq}$  è **470 m/sec**.

**Secondo normativa la categoria di appartenenza del litotipo equivalente è la B:**

La tabella mostra che la categoria di suolo di fondazione riferita al piano campagna e per fondazioni con profondità fino a 30 metri è di tipo 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.*

La profondità di penetrazione dell'indagine MASW è determinata dalla relazione tra velocità e frequenze rappresentate nella curva di dispersione. Strati più profondi influenzano, infatti, frequenze inferiori (lunghezze d'onda maggiori) e di conseguenza sarà la frequenza più bassa a determinare la massima profondità di penetrazione (da cui l'importanza di generare un segnale con una sufficiente quantità di energia anche alle frequenze più basse). Questo valore è determinato attraverso l'approssimazione  $\lambda/2.5$  ed è, quindi, chiaramente solo indicativo.

Infatti, è bene precisare che, a causa della variazione dei parametri fisico - meccanici (porosità, contenuto d'acqua, grado di fatturazione, ecc.), non sempre gli spessori sismostratigrafici coincidono con gli spessori litologici.



## 8.2 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO

Nell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n°3274 del 20 marzo 2003 e nel D.M. 14-09-2005 vengono inserite specifiche norme per il progetto delle fondazioni e delle opere di sostegno. Per poter definire l'azione sismica di progetto le norme stabiliscono 5 categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione (le profondità sono riferite al piano di posa delle fondazioni) identificabili sulla base delle caratteristiche stratigrafiche e delle proprietà geotecniche rilevate nei primi 30 metri e definite da parametri indicati nell'EUROCODICE 8:

**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 m/s 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 30m.

La determinazione delle azioni sismiche, che costituisce una delle principali novità del testo normativo non avviene più per mezzo del concetto di Zone Sismiche, poiché all'interno dello stesso comune possono esserci effetti sismici diversi, in dipendenza di vari complessi fenomeni geo-sismo-tettonici ed a prescindere dagli effetti dovuti al tipo di sottosuolo. Inoltre, anche la conoscenza di eventi sismici remoti consente di stimare meglio le accelerazioni di picco al suolo.

Vengono forniti i valori dei parametri di pericolosità sismica necessari alla progettazione, per ciascun dei nodi della griglia e per 9 valori del periodo di ritorno, ovvero una volta definite le coordinate del sito in base all'allegato A si calcolano i parametri spettrali, relativi ad un

particolare tempo di ritorno, con la media pesata dei 4 punti della griglia di accelerazione che comprendono il sito in esame per ognuno dei quattro stati limite previsti dalla norma.

La stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido ( $V_{seq} > 800$  m/s), passa quindi dal vecchio criterio Zona dipendente, ove l'accelerazione di base  $a_g$  derivava dalla zona sismica di appartenenza del Comune in cui ricadeva il sito, senza considerare l'incremento dovuto ad effetti locali dei terreni di cui tiene conto invece con l'approccio sito dipendente.

Ai fini della normativa, l'azione sismica è quindi caratterizzata da 3 componenti trasversali, due orizzontali e una verticale, da considerarsi tra di loro indipendenti che possono essere descritte mediante accelerazione massima attesa in superficie, accelerazione massima e relativo spettro di risposta atteso in superficie, accelerogrammi.

Lo spettro di risposta elastica in accelerazione è espresso da una forma spettrale riferita a uno smorzamento del 5%, moltiplicata per l'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  su sito di riferimento rigido orizzontale; lo spettro di risposta elastico orizzontale è definito in base al valore dell'accelerazione  $a_g$  relativa alla zona indagata, moltiplicando per un coefficiente  $S$  che tiene conto della categoria di suolo di fondazione e delle condizioni topografiche.

Per un determinato sito il moto sismico è quindi definito da uno spettro di risposta elastico la cui espressione dipende dall'accelerazione orizzontale massima al sito ( $a_g$ ), dal massimo valore di accelerazione dello spettro orizzontale ( $F_0$ ) e dal periodo d'inizio del tratto a velocità costante dello spettro di accelerazione orizzontale ( $T_c$ ), tramite opportuni coefficienti numerici che variano a seconda delle coordinate del sito, della vita di riferimento della struttura e della probabilità di superamento della vita di riferimento.

## 9 APPROFONDIMENTO DI 1° E 2° LIVELLO

Dalla verifica della tavola della pericolosità sismica località, il sito in esame viene perimetrato in zona Z4a, per quanto riguarda la situazione litostratigrafica e morfologica si rende necessario l'approfondimento di primo e secondo livello di approfondimento sismico, così come contemplato dalla normativa in vigore.

Le verifiche di seguito riportate tengono conto dei risultati di analisi provenienti da diverse aree disciplinari:

- ❖ geofisica (individuazione mediante prospezioni dei profili di velocità delle onde sismiche nei terreni - masw);
- ❖ geologia e geomorfologia (caratterizzazione dell'assetto stratigrafico e strutturale, delle litologie e della geomorfologia dei siti e della parametrizzazione geotecnica).

Lo studio geologico di supporto al P.G.T. presenta una prima tavola della pericolosità sismica (in scala 1:10.000), nella quale vengono riportate le diverse situazioni tipo, sulla base di quanto indicato nella Tabella 1 dell'Allegato 5.

Tale carta indica quindi le zone caratterizzate da diversi scenari in grado di determinare possibili effetti sismici locali.

Lo studio geologico realizzato a supporto del P.G.T. ha individuato per il sito in esame il seguente scenario:

- Z4a: zona di pianura con presenza di depositi fluvio-glaciali granulari e/o coesivi.

Z4a	Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi	Amplificazioni litologiche e geometriche
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)	
Z4d	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	

La carta di pericolosità sismica locale rappresenta il riferimento per l'applicazione dei successivi livelli di approfondimento, in base a quanto stabilito dalla D.G.R. n. 9/2616 del 30/11/2011.

#### SCENARIO Z4a

L'area d'intervento ricade in Z4a (1° e 2° livello di approfondimento, verifica alla liquefazione), la falda non è stata intercettata durante le prove. Da studi di pozzi limitrofi la si colloca oltre i 6 m da p.c..

### 9.1 APPROFONDIMENTO SISMICO DI II° LIVELLO

Dalla mappa della P.S.L. alla scala 1:10.000 si nota che il sito in esame è situato in una zona di possibile amplificazione sismica Z4a. Tale contesto indica il rischio che un evento

sismico ed i relativi scuotimenti producano effetti di amplificazione litologica in grado di alterare i risultati di un sisma sulla base di quanto previsto dalla normativa nazionale.

Per questo contesto la normativa prevede il secondo livello di analisi degli effetti sismici di sito. Il secondo livello si applica a tutti gli scenari suscettibili di amplificazioni sismiche (morfologiche e litologiche) e riguarda le costruzioni il cui uso prevede normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali; industrie con attività non pericolose, reti viarie e ferroviarie la cui interruzione non provoca situazioni di emergenza.

La procedura consiste in un approccio di tipo semiquantitativo e fornisce la stima quantitativa della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di amplificazione ( $F_a$ ); gli studi sono condotti con metodi quantitativi semplificati, validi per la valutazione delle amplificazioni litologiche e morfologiche e sono utilizzati per zonare l'area di studio in funzione del valore di  $F_a$ .

Gli effetti di amplificazione per lo scenario sismico Z4a è di natura litologica, pertanto per la valutazione del fattore di amplificazione ( $F_a$ ) si ricorre alle schede relative all'allegato 5 di cui alla D.G.R. n° 9/2616 del 2011.

Così come previsto dalla normativa il valore di  $F_a$  viene riferito agli intervalli di periodo tra 0.1 – 0.5s e 0.5 – 1.5s: i due intervalli di periodo nei quali è stato calcolato il valore di  $F_a$  vengono scelti in funzione del periodo proprio delle tipologie edilizie; in particolare l'intervallo tra 0.1 – 0.5s si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide, mentre l'intervallo tra 0.5 – 1.5s si riferisce a strutture più alte e più flessibili.

Viene valutato il periodo del sito  $T$  con la seguente formula:

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^n h_i}{\frac{\sum_{i=1}^n v_{s_i} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}} = 0.23$$

$h_i$  = spessore dello strato  $i$ -esimo;

$V_s$  = velocità dello strato i-esimo.

La procedura semplificata richiede la conoscenza dei seguenti parametri:

- litologia prevalente dei materiali presenti nel sito;
- stratigrafia del sito;
- andamento delle  $V_s$  con la profondità fino a valori pari o superiori a 800 m/s;
- spessore e velocità di ciascun strato;
- sezioni geologiche, conseguente modello geofisico - geotecnico ed identificazione dei punti rappresentativi sui quali effettuare l'analisi.

## ANALISI DEGLI EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE LITOLOGICA.

Sulla base di intervalli indicativi di alcuni parametri geotecnici ricavati dalla prova SCPT, è stata individuata la relativa scheda di valutazione di riferimento (scheda Litologia sabbioso – curva 3 - blu).

**STIMA DEGLI EFFETTI LITOLOGICI**  
 secondo le procedure dell'All. 5 - D.g.r. 9/2616 del 60/11/2011  
**SCHEDA LITOLOGIA GHIAIOSA**

Profondità da p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/sec)
3	3	220
11	8	460
30	19	580

Periodo del sito  
T= 0,23

**PRIMO STRATO**  
 Vs 460

Curva caratteristica  
 n° 3

**VERIFICA**

Valori Fa del sito

0,1 < T < 0,5      1,37

**Comune di Milano**

**Valori Fa di soglia terreni di tipo**

B	1,4
C	1,8
D	2,2
E	2

Località Milano  
 Litologia tipo suolo B

ANDAMENTO DEI VALORI DI Vs CON LA PROFONDITA'

$V_s = 410 \ln(z) - 480$

Profondità primo strato (m)

Correlazione T - Fa 0.1-0.5

Individuata la scheda di riferimento si è provveduto alla verifica della validità in base all'andamento dei valori di Vs con la profondità. All'interno della scheda di valutazione è stato scelto il valore di Fa nell'intervallo 0,1-0,5 s in base al valore del periodo proprio del sito T. La curva individuata è la n° 3 (blu), mentre il  $T = 0.23$ , il valore di Fa determinato è pari a 1.37 e indica il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica vigente.

La valutazione del grado di protezione è stata effettuata in termini di contenuti energetici, confrontando il valore di Fa ottenuto dalle schede di valutazione con un parametro di analogo significato calcolato per il comune di Milano, per la classe B e per l'intervallo di periodo 0,1-0,5 s. Per il comune di Milano il valore soglia Fa per il quale lo spettro proposto dalla normativa risulta sufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito che risulta pari a 1,4.

$$1.37 (Fas) < 1.4 (Fac)$$

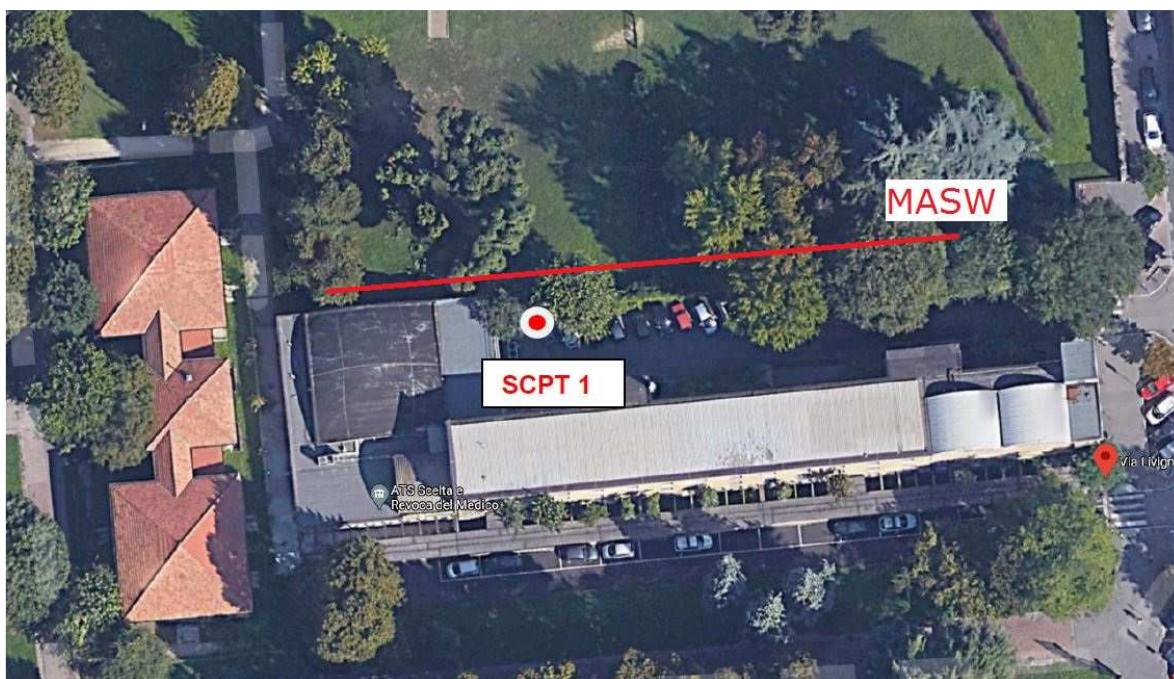
Si può quindi affermare che il valore di Fa è inferiore al valore di soglia corrispondente: la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito e quindi si applica lo spettro previsto dalla normativa.

## 10 RELAZIONE SULLE INDAGINI GEOGNOSTICHE

Ai fini della ricostruzione della stratigrafia e delle caratteristiche geotecniche dell'area in oggetto, si è proceduto all'esecuzione di 1 prova penetrometrica dinamica (SCPT) spinta alla profondità massima di 11.40 m dall'attuale piano campagna e una prova MASW.

Nella figura si riporta l'ubicazione delle indagini eseguite.





Le indagini sono state ubicate in accordo con il progettista.





## 10.1 PROFILO STRATIGRAFICO

SCPT	
A	0.0 - 3.00 m deposito sabbioso debolmente limoso
B	3.00 - 11.40 m deposito sabbioso-ghiaioso

La falda non è stata intercettata durante i sondaggi. Da studi di pozzi limitrofi la si colloca oltre i 6 m da p.c..

## 11 VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI IN CONDIZIONI SISMICHE

Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio, con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi. I fenomeni di liquefazione interessano i depositi sabbiosi saturi e dipendono da:

- proprietà geotecniche dei terreni;
- caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata;
- genesi e storia geologica dei terreni;
- fattori ambientali.

Un terreno incoerente saturo, in assenza di sollecitazioni sismiche è soggetto soltanto alla pressione litostatica, dovuta al peso dei sedimenti sovrastanti (in campo libero e con superficie piana).

Durante una sollecitazione sismica vengono indotte nel terreno delle sollecitazioni cicliche di taglio, dovute alla propagazione delle onde sismiche verso la superficie, mentre la pressione litostatica resta costante. Per tutta la durata della scossa ogni elemento di terreno è soggetto ad una serie di sforzi tangenziali che cambiano ripetutamente verso ed ampiezza.

Nel terreno si possono generare fenomeni di liquefazione se la scossa sismica produce un numero di cicli tale da far sì che la pressione interstiziale uguagli la pressione di confinamento. Nei depositi la pressione di confinamento aumenta con la profondità, mentre

l'ampiezza dello sforzo di taglio indotto dal sisma diminuisce. La resistenza alla liquefazione quindi è maggiore con la profondità. Di conseguenza, maggiore è la durata di un terremoto (maggiore numero di cicli), più alta è la possibilità che si arrivi alla liquefazione. Inoltre, maggiore è l'ampiezza della vibrazione e della deformazione indotta e minore è il numero di cicli necessari per giungere a tale condizione.

Il terreno può essere però soggetto a sforzi di taglio statici dovuti alla presenza di strutture in superficie o alla sua particolare posizione (per es. al di sotto di un versante). In questo caso l'instaurarsi del fenomeno della liquefazione dipende, oltre che dalle caratteristiche del sisma, anche dal rapporto che si stabilisce tra le tensioni di taglio indotte da quest'ultimo e quelle statiche preesistenti al terremoto.

La probabilità che un deposito raggiunga le condizioni per la liquefazione dipende anche dallo stato di addensamento, dalla composizione granulometrica, dalle condizioni di drenaggio, dalla storia delle sollecitazioni sismiche e dall'età del deposito stesso.

Tanto minore è il grado di addensamento del materiale (elevato indice dei vuoti e bassa densità relativa) tanto maggiore è la probabilità che, a parità di altre condizioni, un deposito raggiunga lo stato di liquefazione.

Anche la *distribuzione*, la *forma delle particelle* e il *grado di* uniformità influenzano notevolmente il fenomeno, per le implicazioni che questi fattori hanno sulla resistenza al taglio e per il modo di dissiparsi della pressione interstiziale in eccesso.

Per quanto riguarda la storia delle sollecitazioni sismiche, si può affermare che precedenti deformazioni moderate influiscano positivamente sulla resistenza del deposito, mentre una storia caratterizzata da alti livelli di deformazione (deposito già soggetto a liquefazione) ha effetti negativi sul potenziale di riliquifazione.

I depositi ghiaiosi-sabbiosi con più alto potenziale di liquefazione sono i più recenti. A parità di composizione e di altre condizioni lo stesso deposito, se più antico, avrà sviluppato legami intergranulari e cementazioni sempre più forti con il tempo. Inoltre, la struttura di un deposito antico sarà resa più stabile e omogenea per gli effetti delle vibrazioni indotte da precedenti terremoti di piccola entità.

La verifica della suscettibilità alla liquefazione è stata eseguita pertanto considerando i risultati, sino alla profondità di 15 m dal p.c. dalla prova masw.

La falda non è stata intercettata.

Per quanto concerne la magnitudo, come riportato nei capitoli precedenti, si è fatto riferimento ad un valore massimo pari a 5.9. Per quel che concerne invece l'accelerazione massima attesa in superficie nell'area in esame, le analisi effettuate secondo quanto stabilito dalle NTC 2018 e dalla Circolare n°7 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 21 gennaio 2019, è di  $a_{max} = 0.0588$ .

La verifica alla liquefazione è stata effettuata correlando la capacità di resistenza del terreno alla liquefazione CRR e la resistenza ciclica indotta dal sisma CSR (Seed & Idriss 1971). Dalle prove penetrometriche statiche si è valutato la resistenza alla liquefazione CRR; il potenziale di liquefazione lo si è ottenuto eseguendo il calcolo del fattore di sicurezza  $FS_L$ , definito dal rapporto CRR/CSR.

$$CSR = 0.65 \times (a_{max})/(g) \times (\sigma_{vo}/\sigma_{vo'}) \times r_d \times 1/(MSF \times K_\sigma)$$

dove:

$a_{max}$  = accelerazione sismica di picco al piano campagna;

$g$  = accelerazione di gravità;

$\sigma_{vo}$  = pressione verticale totale alla profondità  $z$  dal p.c.;

$\sigma_{vo'}$  = pressione verticale efficace alla profondità  $z$  dal p.c.;

$r_d$  = fattore di riduzione delle tensioni alla profondità interessata;

$MSF$  = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma;

$K_\sigma$  = coefficiente correttivo funzione delle tensioni efficaci alla profondità interessata.

Il fattore di sicurezza alla liquefazione  $FS_L$  è definito dal rapporto CRR/CSR:

$$FS_L = CRR \bullet \frac{MSF}{CSR}$$

Il rapporto di tensione ciclica CSR, ad una determinata profondità, può essere valutato attraverso l'espressione di Seed e Idriss, 1971 riportata di seguito:

$$CSR = 0.65 \times a_{max}/g \times \sigma_{vo}/\sigma'_{vo} \times R_d$$

Dove:

$a_{max}$  : accelerazione di picco al piano campagna del terremoto di progetto;

$g$  : accelerazione di gravità;

$\sigma_{vo}$  : tensione totale verticale alla profondità considerata;

$\sigma'_{vo}$  : tensione efficace verticale alla profondità considerata;

$R_d$ : coefficiente riduttivo dell'azione sismica per valutare la deformabilità del sottosuolo.

Per quel che concerne invece la valutazione del rapporto di resistenza ciclica CRR, la resistenza penetrometrica,  $q_c$ , ricavata dalla indagine penetrometrica dinamica SCPT, deve essere ricondotta ad un valore normalizzato,  $q_{c1N}$ , attraverso la seguente espressione:

$$q_{c1N} = C_q \times q_{c/Pa}$$

Dove  $a_p$  (pressione atmosferica pari a 100kPa) e  $c_q$  espressa nella stessa unità di misura.

Il coefficiente  $Q_c$  (fattore correttivo per tener conto dell'influenza della pressione verticale efficace).

In base al valore di IL ottenuto viene fuori la seguente tabella:

IL	rischio di liquefazione
0<IL≤2	basso
2<IL≤5	moderato
5<IL≤15	elevato

Nella verifica eseguita è stato ottenuto un valore di **IL = 1.2**, indice di un rischio di liquefazione basso e il fattore di sicurezza  $F_s > 1$  considerando una magnitudo di riferimento e un'accelerazione sismica secondo il D.M. 17 gennaio 2018.

## 12 CONCLUSIONI

Dall'analisi dei dati geologici, geomorfologici ed idrogeologici rilevati, le opere in progetto risultano sostanzialmente fattibili sotto il profilo geologico, compatibili con le Norme di Attuazione del PGT del comune di Milano e non pregiudizievoli dell'assetto idrogeologico locale.

Nella "*Carta di fattibilità geologica*" allegata al vigente P.G.T., l'area in oggetto ricade in un settore classificato come fattibilità seconda, ovvero "fattibilità con modeste limitazioni".

Dal punto di vista sismico il Comune di Milano, interessato dall'intervento in esame, ricade nella classificazione sismica dei comuni italiani in Zona 3.

Il terreno indagato, in base alle caratteristiche geotecniche dei litotipi presenti in sito nonché da quanto emerso dalle indagini eseguite in situ, rientra all'interno della categoria di suolo di fondazione in **B**.

La falda non è stata intercettata durante i sondaggi, da studi di pozzi limitrofi la si colloca oltre i 6 m da p.c..

Alla luce delle risultanze delle indagini geotecniche ed idrogeologiche eseguite sul terreno in oggetto e sull'area ad esso circostante, all'interno di un volume significativo, riportate nella presente *Relazione Geologica*, si può concludere che il sito debba ritenersi idoneo ad accogliere l'intervento in progetto nell'assoluto rispetto delle raccomandazioni geologiche fornite. La tavola della pericolosità sismica locale (PSL) inserisce il sito indagato in zona Z4a pertanto la verifica di secondo livello ha evidenziato come il valore di  $F_a$  è inferiore al valore di soglia corrispondente, mentre la verifica alla liquefazione ha evidenziato un indice basso.

Milano, Dicembre 2020

IL TECNICO

Dott. Geol. Rosario Spagnolo