

COMUNE DI BUDRIO

Comparto ex C2.2 - C2.4 La Romantica/Martella Nuova,
oggi ANS.A-20 - ANS.S-21

PROGETTO ESECUTIVO OPERE DI URBANIZZAZIONE

SPAZIO RISERVATO ALL'UFFICIO TECNICO

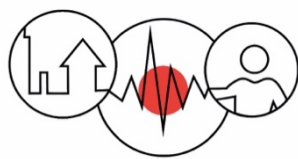
PROPRIETA':

PROGETTISTI: Arch. Elisabetta Pareschi
Ing. Stefano Marzadori
Arch. Vincenzo Petrizzo

STATO DI PROGETTO:
relazione geologica

AGOSTO 2018

TAV 8.0



PRTtraining
PLANNING RESEARCH TRAINING

COMUNE DI BUDRIO

COMPARTI C2.2 – C2.4
RILASCIO PERMESSO DI COSTRUIRE



RELAZIONE GEOLOGICA,
GEOMORFOLOGICA,
IDROGEOLOGICA

Committente: Grande Sole

Progettista: Dott. Geol. Marianna Casavecchia

Marianna Casavecchia
ORDINE DEI GEOL
GEOLOGO
MARIANNA CASAVECCHIA
ALBO
418
DELLA REGIONE UMBRIA

Data: 15.03.18

Pratica: 0818P

Pagina 1 di 23

Elaborato: R1

Tavole allegate n.: -

Allegati n.: -

INDICE:

1	PREMESSA E GENERALITÀ	4
2	INQUADRAMENTO DEL SITO	4
3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE	6
4.1	Geomorfologia e idrologia superficiale	6
4.2	Assetto litostratigrafico	6
4.3	Idrogeologia	8
5	INDAGINI GEOGNOSTICHE	8
6	VALUTAZIONE DELLE INTERFERENZE PRODOTTE DALLA REALIZZAZIONE DELLE STRUTTURE INTERRATE SULLA FALDA	10
6.1	Obbiettivi e metodologia di studio	10
6.2	Lineamenti del modello matematico	11
6.3	Definizione del modello concettuale	12
6.1	Definizione del profilo stratigrafico di calcolo e dei parametri idrogeologici dell'acquifero	14
6.1.1	Valutazione della conducibilità idraulica del sistema acquifero considerato	14
6.1.2	Valutazione della trasmissività idraulica del sistema acquifero considerato	15
6.1.3	Portata media della falda	16
6.2	Verifica mediante modellazione matematica	16
7	CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI	19
7.1	Metodologia di indagine per la caratterizzazione sismica dei terreni mediante tromini	19

7.2	Caratterizzazione sismica secondo D.M. del 14 gennaio 2008	20
7.3	Verifica al pericolo di liquefazione	21
7.4	Caratterizzazione ai sensi "Delibera regionale progr. N°112-oggetto n°3121 del 02/05/2007 – fattori di amplificazione sismica	21
8	CONCLUSIONI	22

1 PREMESSA E GENERALITÀ

La presente relazione rappresenta un documento di sintesi degli studi eseguiti nel 2009 per gli interventi previsti nei comparti C2.2 e C2.4, nel comune di Budrio (BO). Gli studi eseguiti hanno riguardato sia l'inquadramento geologico, idrogeologico e geomorfologico, che la classificazione sismica del territorio esaminato.

È stato realizzato inoltre un approfondito studio finalizzato alla verifica della interazioni tra gli interrati previsti dal progetto e la falda, supportato dall'esecuzione di un approfondito piano di indagine e di monitoraggio dell'acquifero, realizzato attraverso misure della soggiacenza della falda, eseguite sia sui pozzi presenti nell'area di studio, che sui piezometri appositamente installati.

Per tutta la documentazione di supporto ed i relativi allegati, si rimanderà pertanto nel documento presente, alla Relazione PUA20.

La presente relazione riporta pertanto una sintesi del citato documento, in merito alle tematiche trattate dallo stesso.

2 INQUADRAMENTO DEL SITO

L'area si colloca sulla destra della linea ferroviaria Bologna-Budrio-Portomaggiore, tra via Creti a nord e via Savini a sud.

Gli elementi per lo sviluppo di tale indagine provengono dall'integrazione di conoscenze bibliografiche con dati raccolti durante sopralluoghi effettuati nel contesto del sito in oggetto, da un rilevamento di pozzi di proprietà privata e dai risultati di una indagine geognostica eseguita nell'area di studio.

La zona in esame ricade nelle seguenti Carte Tecniche della Regione Emilia Romagna:

- tavola 221 NE toponimo "Budrio" , in scala 1:25.000;
- sezione 221070 toponimo "Budrio" , in scala 1:10.000;

- elemento 221071 toponimo "Budrio", e elemento 221074 toponimo "Albareda".

Per l'inquadramento dell'area si rimanda alla Tavola PAU20.1.

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La seguente relazione è stata redatta in ottemperanza alle disposizioni contenute nelle normative di riferimento di seguito elencate:

- "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" D.M. dell'11 marzo 1988.
- Istruzioni relative alle "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione". Circolare Ministeriale LL.PP. n. 30483, del 24 settembre del 1988.
- AGI. Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, giugno 1977.
- Ordinanza n. 3274 del 20.03.2003 del Presidente del Consiglio dei Ministri "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
 - Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici.
 - Norme tecniche per il progetto sismico di opere di fondazione e di sostegno dei terreni.
- Eurocodice 7: Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.
- Eurocodice 8: Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

4.1 Geomorfologia e idrologia superficiale

L'area oggetto dell'intervento si trova in destra idrografica del torrente Idice ad una quota di circa 27,0 m s.l.m..

Dall'esame della Carta Geologica di Pianura dell'Emilia Romagna (di cui è presente uno stralcio nella relazione PAU20; figura 3.1 pag. 6) si osserva come l'area in esame sia situata in corrispondenza di depositi d'argine fluviale ascrivibili al torrente Idice, in prossimità del materasso alluvionale (depositi canalizzati e d'argine prossimale) di pertinenza di uno dei più importanti paleo alvei del torrente.

L'area oggetto di studio presenta una idrologia superficiale caratterizzata da fossi di scolo dei terreni agrari e da canali di bonifica di II[^] e III[^] grado che convogliano le acque verso gli impianti di sollevamento posti in località Argenta (Saiano) e Valle Santa.

4.2 Assetto litostratigrafico

I terreni più superficiali affioranti nell'area sono attribuibili al Supersistema Emiliano Romagnolo: successione post-evaporitica del margine padano adriatico. Trattasi di depositi alluvionali del Po, dei suoi affluenti di destra e dei fiumi romagnoli che in seguito al sollevamento dell'area, avvenuto durante il Pleistocene medio, hanno raggiunto la posizione attuale.

I terreni affioranti nell'area oggetto d'intervento, appartengono all'Unità di Modena (AES8a), come indicato dalla Carta Geologica della Regione Emilia Romagna, di cui si riporta uno stralcio nella seguente Figura 4.1.



Figura 4.1 – Stralcio Tav.PAU20.2

Le indagini eseguite nell'area di studio hanno consentito di verificare fino a circa 30 m di profondità dal p.c., la presenza di terreni a granulometria prevalentemente fine, di tipo argilloso, all'interno dei quali si riscontra la presenza di livelli e/o lenti a granulometria limosa e/o limo sabbiosa. Tali lenti si presentano generalmente come corpi completamente isolati e talvolta collegati tra loro. Le litologie riscontrate sono state raggruppate nel modo seguente:

- TERRENO TIPO 1: costituito da *argille, argille limose e limi argillosi*; rappresenta la litologia dominante nel sottosuolo dell'area di studio. È caratterizzato da un aumento di consistenza proporzionale alla profondità, fatta esclusione per i primi metri, dove si presenta come sovracconsolidata in seguito ai fenomeni di imbibizione ed essiccamento, favoriti nel sito in oggetto dalle pratiche agricole;
- TERRENO TIPO 2: costituito da *limi e limi argilloso sabbiosi*, che si presentano sotto forma di lenti e/o livelli intercalati nel TERRENO TIPO 1 caratterizzati da bassa continuità (sia orizzontale che verticale), talvolta collegate alle lenti del TERRENO TIPO 3;
- TERRENO TIPO 3: costituito da *sabbie con limo e sabbie limo-argillose*, che si presentano sotto forma di lenti e/o livelli intercalati nel TERRENO TIPO 1

caratterizzati da bassa continuità (sia orizzontale che verticale) talvolta collegate alle lenti del TERRENO TIPO 2.

Per una visione d'insieme dei rapporti stratigrafici esistenti tra i litotipi descritti si rimanda ai profili geologici riportati nelle Tavole PAU 20.5-20.6-20.7.

4.3 Idrogeologia

Il quadro idrogeologico dell'area bolognese appare particolarmente complesso, non solo per la struttura naturale e per i rapporti tra gli acquiferi esistenti, ma anche per l'influenza di fattori antropici quali la riduzione del tasso di ricarica della falda conseguente l'impermeabilizzazione delle superfici e dei prelievi idrici elevati per gli scopi agricoli.

Il complesso idrogeologico della piana alluvionale appenninica è caratterizzato dalla presenza di pochi corpi grossolani all'interno dei quali la circolazione idrica è decisamente ridotta ed avviene in modo prevalentemente compartimentato, non consentendo fenomeni di ricarica né di scambi tra le diverse falde.

L'ambiente di piana alluvionale in cui si imposta l'area di studio, può essere classificato tra quelli caratterizzati dalla presenza di acquiferi multifalda, caratterizzati dalla presenza di numerose falde isolate e di scarsa rilevanza globale.

5 INDAGINI GEOGNOSTICHE

L'area di studio è stata oggetto di una campagna di indagine geognostica programmata e diretta dallo scrivente in relazione al livello di approfondimento richiesto dalla precedente fase progettuale.

La scelta della tipologia e quantità di indagini eseguite è stata effettuata tenendo in considerazione l'estensione dell'area e le informazioni di natura geologica, geotecnica, sismica e idrogeologica richieste dal progetto. Sono state inoltre acquisite tutte le indagini e gli studi eseguiti in precedenza sul comparto.

La campagna di indagine, eseguita nel mese di ottobre 2008 dalla ditta S.G.T. s.a.s. di Bagnacavallo (RA), si è articolata nel modo seguente:

- n. 34 prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU, mediamente spinte fino alla profondità di 15.0 m dal piano campagna e che hanno raggiunto la profondità massima di 30.0 m dal p.c., nelle CPT 12 e CPT 16;
- n. 26 prove di dissipazione della pressione neutra realizzate durante l'esecuzione delle CPTU,
- n. 2 prove sismiche con Tromino per la valutazione del Vs30.

Gli elaborati delle indagini eseguite sono riportati negli Allegati 1, 2 e 3 della precedente relazione PAU20.

Le indagini, acquisite dagli studi precedenti (ENSER) sono costituite da:

- n. 27 CPT (prove penetrometriche statiche con punta meccanica tipo Begemann) spinte alla profondità di 8÷15 m da piano campagna con messa in opera di n. 3 piezometri, eseguite dalla Geol. De Luca nel luglio 2003;
- n. 9 CPT (prove penetrometriche statiche con punta meccanica tipo Begemann) spinte alla profondità di 15÷30 m da piano campagna, eseguite dalla Geol. De Luca nei mesi di febbraio e marzo 2006;
- n. 1 sondaggio stratigrafico fino alla profondità di 15 m da piano campagna, eseguito dalla Geol. De Luca nel marzo 2006;
- n. 2 CPTU (prove penetrometriche statiche con piezocono) spinte a 25 e 45 m da piano campagna, eseguite da ENSER srl nel maggio 2006.
- n. 11 CPTU (prove penetrometriche statiche con piezocono) con prove di dissipazione in foro per la determinazione del coefficiente di permeabilità orizzontale k_h , spinte alla profondità di 5, 10 e 25 m da piano campagna con messa in opera di n. 11 canne piezometriche, eseguite da SGT (Società di Geologia Territoriale) di Bagnacavallo (RA);

- n. 2 CPTU (prove penetrometriche statiche con piezocono) con prove di dissipazione in foro per la determinazione del coefficiente di permeabilità orizzontale k_h , spinte a 10 e 20 m da piano campagna, eseguite dal DISTART (Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio), Università degli Studi di Bologna;
- n. 1 sondaggio stratigrafico a carotaggio continuo spinto alla profondità di 15 m da piano campagna, con realizzazione di n. 2 prove di permeabilità in foro tipo Lefranc a carico costante e prelievo di n. 4 campioni indisturbati da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico. Il sondaggio è stato eseguito dalla ditta GEOEMME2 di Rimini;
- n. 1 pozzetto esplorativo con prelievo di n. 3 campioni da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico e realizzazione di prove speditive di consistenza con Pocket Penetrometer

L'ubicazione di tutte le indagini è riportata in Tav. PAU20.1.

6 VALUTAZIONE DELLE INTERFERENZE PRODOTTE DALLA REALIZZAZIONE DELLE STRUTTURE INTERRATE SULLA FALDA

6.1 Obiettivi e metodologia di studio

Gli interventi previsti dal progetto prevedono la realizzazione di edifici con diverse destinazioni d'uso, tutti caratterizzati dalla presenza di n. 1 piano interrato, attestato alla profondità massima di circa 3.0 m dal p.c..

Per il conseguimento dell'obiettivo è stata necessaria la definizione di un modello concettuale rappresentativo delle caratteristiche medie del sottosuolo dell'area d'esame. Per la definizione del modello è stata eseguita una dettagliata campagna di indagine estesa a tutta l'area della lottizzazione, inoltre è stato acquisito uno studio precedente (e le relative indagini geognostiche) effettuato nel comparto C2.1 sub comparto C, adiacente

all'area di studio (Comune di Budrio - studio geologico, geotecnico ed idrogeologico dell'area oggetto di nuova lottizzazione, comparto c2.1 sub comparto C. ENSER S.r.l.).

Le indagini geognostiche eseguite dallo scrivente hanno consentito la definizione dei rapporti stratigrafici esistenti nel sottosuolo dell'area d'esame, che sono stati studiati attraverso l'esecuzione di n. 7 profili geologici (Tavole PAU 20.5-20.6-20.7).

La profondità media di indagine è stata 15.0 m dal p.c. e solo in n. 2 verticali sono stati raggiunti i 30.0 m.

L'esecuzione di prove di dissipazione distribuite lungo le diverse verticali d'indagine ha consentito di ricavare i parametri fisici necessari alla completa definizione del modello concettuale.

Una volta definito il modello concettuale del terreno, è stata condotta una simulazione matematica tridimensionale applicata ad un areale sufficientemente estesa (di dimensioni pari a 500 m x 650 m) in grado di ricomprendere tutto il comparto di progetto. L'estensione areale è stata valutata anche al fine di evitare un eventuale effetto di disturbo delle assegnate condizioni al contorno, all'interno dell'area d'interesse.

Per la presa visione della verifica eseguita, si rimanda alla relazione PUA20, nei paragrafi seguenti si riporta una sintesi dello studio e le conseguenti conclusioni.

6.2 Lineamenti del modello matematico

Per la valutazione delle interferenze è stata eseguita una simulazione utilizzando il modello matematico MODFLOW prodotto dalla U.S.G.S. Per approfondimenti si rimanda alla bibliografia specifica (e.g. Harbaugh, A. W., 2006; Reilly, T.E., & Harbaugh, A.W. , 2004). La soluzione numerica è ricercata per via iterativa assumendo il criterio di convergenza sul vettore soluzione dei carichi piezometrici risultanti alla fine di ciascuna iterazione.

6.3 Definizione del modello concettuale

Le numerose prove eseguite nell'area di studio hanno consentito la definizione dei rapporti stratigrafici esistenti su tutta l'area di studio fino alla profondità media di 15.0 m dal p.c.; l'acquisizione dello studio ENSER ha inoltre consentito il confronto del modello ipotizzato con quello applicato al comparto C2.1 sub comparto C contiguo all'area di intervento.

Dal confronto dei risultati dei due studi è emersa una sostanziale uniformità sia delle litologie riscontrate, che della distribuzione e dei rapporti esistenti tra le stesse.

Pertanto, per la definizione dei parametri fisici medi dei terreni, è stato possibile fare riferimento sia ai risultati delle indagini geognostiche effettuate che a quelli relativi alle indagini eseguite sul lotto adiacente. L'acquifero in esame può essere definito di tipo multi falda; per chiarezza di esposizione si rimanda alla Figura. 5.3 (consultabile sulla relazione PAU20; pag. 33), uno schema esemplificativo che illustra i possibili rapporti stratigrafici esistenti nel sottosuolo dell'area indagata, secondo quanto già precedentemente esposto nel paragrafo 4.2 Assetto litostratigrafico.

Il TERRENO TIPO 1 risulta essere evidentemente dominante sugli altri e costituisce la litologia di base dell'area. La presenza dei TERRENI TIPO 2 e TIPO 3 è invece riconducibile a livelli e/o lenti di estensione variabile che possono essere o meno collegate tra loro.

Al TERRENO TIPO 1 è associabile una permeabilità molto bassa, che consente di classificarlo come poco permeabile o praticamente impermeabile.

Il TERRENI TIPO 2 invece è caratterizzato da valori di conducibilità idraulica medi, mentre il TIPO 3 presenta una discreta permeabilità.

La tipologia di sviluppo dei livelli attribuiti ai TERRENI TIPO 2 e 3 può considerarsi riconducibile alle cinque seguenti classificazioni esemplificative (consultabili sulla relazione PAU20; pag. 31).

Sulla base dei risultati delle indagini eseguite nell'area, escludendo la tipologia di lenti A e C poiché non rilevanti ai fini dello studio, è emersa la presenza prevalente di lenti tipo B e di tipo D, e di zone riconducibili al tipo E.

Le lenti limose e sabbiose, possono essere separate da livelli argillosi sottili e discontinui che non ne garantiscono l'isolamento, o possono anche essere collegate tra loro.

La direzione del flusso è NW-SE, caratterizzato da un gradiente piuttosto regolare stimabile nell'intorno di 5m/km.

Il modello concettuale che ne scaturisce risulta omogeneo ed anisotropo, caratterizzato da una permeabilità nel piano orizzontale significativamente maggiore di quella verticale.

Sulla base dei dati desunti dai rilievi piezometrici effettuati (periodi estivo e invernale), è stato ricostruito l'andamento delle linee isofreatiche (Tav. PAU 20.3 e 20.4), mentre per i valori delle misure piezometriche, integrate con le misure effettuate sui pozzi esistenti nell'area, si rimanda alla relazione PAU20 (pag. 34-35).

L'ubicazione dei pozzi misurati è riportata in Tav. PAU 20.1 e le schede di dettaglio di ogni pozzo sono riportate nell'Allegato 4 della relazione PUA20.

Il valore medio della soggiacenza della falda, può essere ritenuto compreso nell'intervallo tra 2.0 e 3.0 m di profondità dal p.c..

Nel profilo stratigrafico tipo, la profondità della superficie piezometrica dal p.c. sarà pertanto fissata in modo cautelativo a 2.0 m (corrispondente alla quota fittizia assoluta 22.00 m s.m. coerente con la base cartografica CTR), comportando nel modello concettuale uno spessore saturo dell'acquifero pari a 13.0 m.

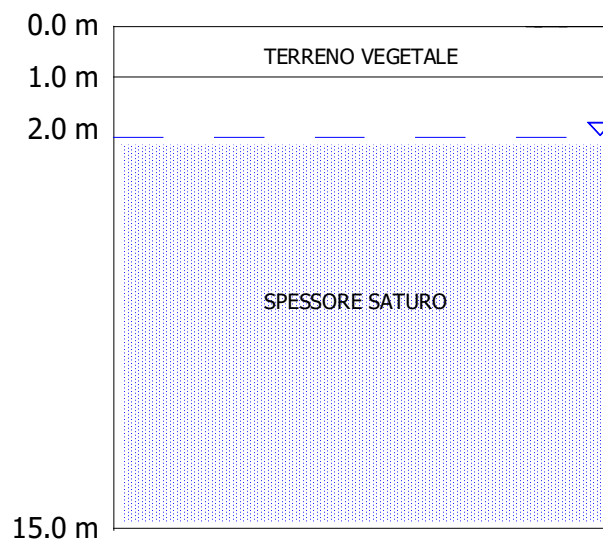


Figura. 5.6 – Modello concettuale dell'acquifero considerato. In evidenza le profondità del saturo e dell'insaturo.

6.1 Definizione del profilo stratigrafico di calcolo e dei parametri idrogeologici dell'acquifero

6.1.1 Valutazione della conducibilità idraulica del sistema acquifero considerato

Per la definizione della permeabilità nel caso in esame, si è fatto riferimento ad analisi statistiche di indagini di campo procedendo come segue:

1. Per ogni litotipo sono state calcolate la media aritmetica, la media armonica e la media geometrica dei risultati delle prove di dissipazione eseguite nell'area di studio, suddivise in base alle litologie individuate,
2. Per ogni tipo di terreno è stato scelto un valore del coefficiente di permeabilità K medio tra quelli risultati dalla media aritmetica e armonica (Matheron 1967),
3. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli riportati nello studio ENSER e sono risultati congruenti, non si è ritenuto quindi necessario effettuare un nuovo calcolo del valore rappresentativo della permeabilità che prendesse in considerazione tutti i dati a disposizione,

Sulla base della stima del valore di permeabilità caratteristico di ciascun terreno si è proceduto alla caratterizzazione della conducibilità idraulica da utilizzare nel modello di calcolo, in riferimento al modello concettuale dell'acquifero.

Per i dettagli sui calcoli, si rimanda alla relazione PUA20, Capitolo 5, nella quale sono riportate le metodiche utilizzate per la determinazione della conducibilità idraulica.

Secondo i due approcci utilizzati, i valori risultanti sono i seguenti:

APPROCCIO 1

$$k_h = \frac{[(61.1 \text{ cm} * 4.6 * 10^{-5} \text{ cm/s}) + (111.8 \text{ cm} * 2.3 * 10^{-6} \text{ cm/s}) + (1127.1 \text{ cm} * 10^{-7} \text{ cm/s})]}{1300.0 \text{ cm}} = 2.45 * 10^{-6} \text{ cm/s}$$

APPROCCIO 2

$$k_h = \frac{[(3.8 * 27) + (1.7 * 4.6)]}{(27 + 4.6)} = 3.5 * 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Il valore del coefficiente di permeabilità orizzontale assunto nei calcoli è stato ricavato dalla media dei valori ottenuti secondo due approcci:

$$k_h = \frac{2.45 + 3.5}{2} * 10^{-6} = 2.98 * 10^{-6} \text{ cm/s} = 2.98 * 10^{-8} \text{ m/s}$$

Per quanto riguarda il coefficiente di permeabilità verticale, si può certamente ritenere che esso abbia un valore più contenuto rispetto a quello orizzontale. In assenza di dati certi è stato assunto:

$$k_v = 1 * 10^{-6} \text{ cm/s} = 1 * 10^{-8} \text{ m/s}$$

6.1.2 Valutazione della trasmissività idraulica del sistema acquifero considerato

Per la valutazione della trasmissività media dell'acquifero si è proceduto come segue:

1. È stata considerata la soggiacenza media della falda in relazione alle variazioni stagionali, pari a -2.0 m dal p.c.;

2. In riferimento allo spessore dell'acquifero ($D=15$ m) è stato ricavato lo spessore dell'orizzonte saturo ($D_s=15.0 - 2.0 = 13.0$ m),
3. è stato assunto il valore medio della conducibilità orizzontale $K_h = 2.98 \cdot 10^{-6}$ cm/s ricavato come precedentemente esposto.

Assumendo che il moto di filtrazione sia prevalentemente orizzontale (con comportamento nel piano isotropo ed omogeneo) si ha:

$$T_x = T_y = T_h = D_s \cdot k_h = 2.98 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} \cdot 13 \text{ m} = 3.87 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

6.1.3 Portata media della falda

L'esame della carta isofreatica evidenzia un moto di filtrazione in direzione NW-SE caratterizzato da un gradiente idraulico medio pari a

$$i = 5 \cdot \text{m} / \text{km}$$

Considerando lo spessore di 15 m (D) utilizzato nel modello concettuale dell'acquifero, riferendosi allo spessore medio di 13 m dell'orizzonte saturo (D_s), si ottiene la seguente portata per unità di larghezza:

$$q = k_h \cdot i \cdot D_s = 2.98 \cdot 10^{-8} \cdot 0.005 \cdot 13 = 1.97 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

Considerando l'estensione del lato SE del volume di terreno interessato dalla lottizzazione ($L_y=650$ m) si ottiene una portata complessiva che interessa i primi 15 m di terreno al di sotto del piano campagna pari a:

$$Q = q \cdot L_y = 1.97 \cdot 10^{-9} \cdot 650 = 1.28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 4.6 \cdot \text{l}/\text{ora}$$

6.2 Verifica mediante modellazione matematica

L'areale considerato nella modellazione presenta un'estensione di circa 32.5 Ha ($L_x=500$ m; $L_y=650$ m) ed è stato orientato con il lato lungo L_y in direzione NO-SE, coincidente con le linee di flusso prevalenti. La quota del piano campagna è fissata costante e pari a 24.0

m s.m. Lo spessore del volume di terreno simulato, considerato omogeneo ed anisotropo, è complessivamente pari a 15 m.

La conducibilità idraulica orizzontale è pari a

$$K_h = 2.98 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

mentre quella verticale è pari a:

$$K_v = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$



Figura. 5.9a - Planimetria dell'area oggetto di intervento.

Rilievo dello stato di fatto



Sedime dei singoli interventi edilizi

Ubicazione dei sondaggi (campagna 2008)

(in verde) Limite dell'areale considerato nella modellazione dell'acquifero

Il modello dell'acquifero presenta una griglia con valori tipici di interasse di circa 15 m sia in direzione x ed y. La griglia è stata localmente raffittita (in direzione x), riducendo alla metà l'interasse originario, per meglio rappresentare il campo di moto in riferimento alle opere previste.

Le simulazioni considerano un regime stazionario, caratterizzato da una cadente piezometrica di 5 m/km e da una profondità della falda nella zona centrale dell'intervento pari a 2 m sul p.c.

Le condizioni iniziali e al contorno considerano pertanto un carico costante ai margini della griglia di calcolo fissato in 23.25 m s.m. e 20.75 m s.m. sui bordi NW ($x=0$ m) e SE ($x=500$ m) rispettivamente (v. fig. 5.10 consultare la relazione PAU20; pag. 46).

Nelle figure 5.11 e 5.12 (consultabili nella relazione PAU20; pag. 47-49) sono riportati i risultati della simulazione.

Il campo di moto evidenzia che le linee di flusso assumono andamento sostanzialmente regolare sub-orizzontale già ad una profondità di pochi metri dal piano campagna tant'è che nella figura 5.12 (relazione PAU20) la sezione dell'acquifero è rappresentata solo per i primi 12 metri rispetto ai 15 m di estensione verticale complessiva.

La portata risultante alla sezione estrema dell'acquifero (valutata su una profondità complessiva di 15 m) mostra uno scarto dell'ordine percentuale rispetto alla portata calcolata teoricamente, a conferma della corretta implementazione del modello matematico. Successivamente è stato valutato l'effetto degli interrati previsti dall'attuazione del comparto sul moto di filtrazione. A tal fine, in corrispondenza delle aree di sedime degli edifici, sono state inserite celle tridimensionali inattive (profonde 4 m rispetto al p.c.) di dimensioni in pianta cautelative e prudenziali. Lo schema del modello risultante è rappresentato in figura 5.13 (relazione PAU20; pag. 50). I risultati del modello sono illustrati nelle figg. 5.14-5.17 (relazione PAU20; pag. 51-54).

Nelle figg. 5.14a e 5.14b (relazione PAU20) sono rappresentate le linee equipotenziali in condizioni stazionarie, riferite allo strato superficiale di 4.0 m di spessore ed allo strato compreso tra -8.0 m e -12.0 m dal p.c.

Le deformazioni del campo potenziale indotte dalla presenza degli interrati sono modeste e limitate al contorno degli interventi. Gli strati meno superficiali non risentono della

presenza degli interrati. Complessivamente e ovunque la direzione principale del flusso rimane coincidente con quella ante-operam (NW-SE).

La portata risultante è sostanzialmente confrontabile con quella precedente nell'ambito dello scarto dell'ordine percentuale valutato tra il modello teorico e il modello matematico nello stato di fatto.

Una più esaustiva impressione degli effetti limitati prodotti dalle opere interrato si ha osservando le sezioni condotte sulle verticali. In via esemplificativa se ne riportano tre particolarmente significative (relazione PAU20).

La prima è posta circa a metà dell'estensione areale simulata. Lungo di essa non sono presenti interventi. Il confronto con i risultati della modellazione della situazione ante-operam sulla medesima sezione (v. figura 5.12; consultabile sulla relazione PAU20; pag. 49) evidenzia una sostanziale coincidenza dei risultati.

Se si considerano sezioni verticali direttamente interessate dalle opere (v. figura. 5.16 e 5.17; consultabili nella relazione PAU20; pag 53-54) è evidente che la deformazione del campo di moto è limitata al contorno degli interventi e non produce effetti estesi di deformazione del campo potenziale al di fuori dell'areale interessato dagli edifici.

Si osserva inoltre che la deformazione delle linee di flusso ha un campo di influenza significativo limitato a circa 1-2 m al di sotto dell'intradosso delle opere previste.

Di conseguenza le linee di flusso mantengono globalmente la stessa direzione che le caratterizza nello stato di fatto.

7 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI

7.1 Metodologia di indagine per la caratterizzazione sismica dei terreni mediante tromini

Nell'area di studio è stata eseguita una caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali) o HVSR (*Horizontal to Vertical*

Spectral Ratio - Metodo di Nakamura), i risultati dell'indagine sono riportati nell'Allegato PAU 20c.

I risultati che si possono ottenere attraverso le registrazioni del "microtremore" naturale sono:

- la stratigrafia del sottosuolo;
- la velocità media delle onde di taglio V_s ;
- la frequenza caratteristica di risonanza del sito;

Nella caratterizzazione sismica dei terreni dell'area in esame tramite la tecnica HVSR è stato utilizzato il Tromografo digitale serie *Tromino*.

7.2 Caratterizzazione sismica secondo D.M. del 14 gennaio 2008

Successivamente all'approvazione delle N.T.C. dell'anno 2008, la classificazione sismica dei terreni di fondazione avviene sulla base della raccolta di parametri di carattere litologico, stratigrafico, sismico, geotecnico, topografico.

Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, approvate con DM 14/01/2008, pubblicato sulla G.U. del 4 febbraio 2008, al punto 3.2.2 riportano le "Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche" per la determinazione dell'azione sismica di progetto.

L'area di studio è stata indagata mediante il metodo HVSR passivo, eseguito in corrispondenza delle prove penetrometriche CPT 12 e CPT 16, spinte fino alla profondità di 30.0 m dal p.c..

L'indagine ha consentito di ottenere il valore del **V_{s30}** compreso tra circa **218 m/s** e **260 m/s**, e di inquadrare pertanto il terreno di fondazione nella categoria di suolo C.

Per quanto concerne le condizioni topografiche, si utilizza la classificazione riportata nella Tab. 3.2.IV allegata al punto 3.2.2 della normativa (di cui si riporta stralcio nella relazione PAU20 Tab. 6.1, pag. 58).

Sulla base della tabella suddetta, l'area di progetto rientra nella categoria T1, in quanto si colloca in un territorio pianeggiante.

7.3 Verifica al pericolo di liquefazione

In presenza di terreni incoerenti saturi in occasione di un evento sismico possono instaurarsi fenomeni di **liquefazione** del terreno.

Nell'area di studio, vista la presenza di terreni prevalentemente coesivi, non sussistono le condizioni per l'instaurarsi del fenomeno della liquefazione.

7.4 Caratterizzazione ai sensi "Delibera regionale progr. N°112-oggetto n°3121 del 02/05/2007 – fattori di amplificazione sismica

Secondo quanto disposto nella "delibera regionale progr. N°112-oggetto n°3121 del 02/05/2007" è stata condotta un'analisi sismica semplificata con grado di approfondimento pari al II livello.

La zona oggetto ricade in un'area pianeggiante e urbanizzata, non è stata riscontrata la presenza di terreni soggetti a fenomeni di densificazione o liquefazione, poiché i terreni riscontrati nel sottosuolo dell'area d'esame presentano una natura prevalentemente argillosa o limo-argillosa; pertanto non si è ritenuto necessario eseguire un'analisi approfondita corrispondente al III livello.

In base al valore di V_{s30} ottenuto è stato possibile valutare i *fattori di amplificazione sismica* come previsto dall'analisi di secondo livello.

Il valore di **accelerazione massima orizzontale** di picco al suolo, riportata nella tabella 2 dell'allegato A4 della delibera, è, per il comune di Budrio, pari a **0.174**.

In relazione alle caratteristiche stratigrafiche e morfologiche dell'area di studio, per la definizione dei fattori di amplificazione sono state utilizzate le tabelle relative al contesto "PIANURA 2", secondo quanto contenuto nell'allegato 2 della delibera regionale.

Di seguito si riportano i valori dei **fattori di amplificazione** validi per il sito in esame:

F.A. P.G.A.	1.5
F.A. INTENSITA' SPETTRALE $-0.1 s < T_0 < 0.5s$	1.8
F.A. INTENSITA' SPETTRALE $- 0.5s < T_0 < 1.0s$	2.5

Tabella. 6.2

Le aree esaminate si colloca in contesti prevalentemente pianeggianti in cui non è stata rilevata la presenza di scarpate sub-verticali o di versanti con acclività $> 15^\circ$, è pertanto da escludersi il presentarsi di fenomeni di instabilità derivanti dall'acclività.

In considerazione delle caratteristiche geologiche dell'area è da escludersi anche la presenza di cavità sotterranee e di zone di contatto laterale tra terreni con comportamenti meccanici sensibilmente diversi.

La realizzazione delle opere previste non implica alcuna variazione delle attuali condizioni in riferimento ai fenomeni di amplificazione sismica locale

Per quanto riguarda la determinazione delle categorie di suolo l'area oggetto di indagine è stata investigata, mediante l'esecuzione di un profilo sismico con la tecnica "*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*" **HVSR**. I risultati dell'indagine, riportati nell'Allegato PUA20c consentono di collocare il sottosuolo in **classe C** "*Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri.

8 CONCLUSIONI

Dai sopralluoghi effettuati nell'area in esame, mirati alla caratterizzazione dei luoghi dal punto di vista geologico e geomorfologico e dai risultati delle indagini geognostiche eseguite è emersa la presenza di terreni prevalentemente argillosi e limo-argillosi dotati di scadenti caratteristiche fisico-meccaniche.

Secondo *il D.M. 14 gennaio 2008*, i terreni in esame possono essere attribuiti alla **Categoria di suolo C** – Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, argille di media consistenza, con coefficiente di amplificazione topografica T1.

In merito al problema della liquefazione, i terreni presenti non mostrano le caratteristiche fisiche che potrebbero provocare l'instaurarsi del fenomeno.

In riferimento agli effetti indotti dalle opere previste sulla falda si osserva che l'effetto delle strutture interrato di progetto non genera apprezzabili interferenze sull'assetto del regime idrogeologico del sistema, anche in virtù delle caratteristiche dell'acquifero, che si presenta con comportamento anisotropo e permeabilità molto bassa.

Il gradiente idraulico dedotto dalla ricostruzione delle isofreatiche, che non manifesta rilevanti variazioni stagionali, si mantiene al di sotto di valori significativi essendo limitato a qualche metro per chilometro. Da ciò consegue che la portata di filtrazione nell'orizzonte dei primi 15.0 m al di sotto dell'area di intervento è stimabile in qualche litro per ora. Tale portata non evidenzia variazioni significative a seguito della realizzazione delle opere interrato, così come la direzione principale del flusso non risulta alterata dalla presenza dalle opere in progetto.

Le simulazioni matematiche hanno evidenziato la limitata influenza delle strutture interrato sul campo di moto e che le velocità si mantengono ovunque (anche fra i corridoi tra le strutture interrato) molto basse anche in riferimento al gradiente idraulico modesto.

Perugia, 15/03/2018

Il Geologo
Dott. Marianna Casavecchia
