

## PROBLEMATICHE GEOLOGICO-TECNICHE DI FORMAZIONI SUPERFICIALI SOGGETTE A VARIAZIONI DI VOLUME

Claudia Meisina<sup>1</sup> & Laura Rolandi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Pavia – [cmeisina@manhattan.unipv.it](mailto:cmeisina@manhattan.unipv.it)

RIASSUNTO: C. Meisina & L. Rolandi, *Problematiche geologico-tecniche di formazione superficiali soggette a variazioni di volume*. IT ISSN 0394-3356, 2004.

Le variazioni di volume dei terreni argillosi (ritiro nei periodi secchi e rigonfiamento in quelli umidi) sono all'origine di numerosi danni a fondazioni di edifici ed infrastrutture (strade). Negli ultimi anni i cambiamenti climatici globali hanno determinato il ripetersi di periodi particolarmente siccitosi che hanno amplificato il fenomeno anche nei nostri climi temperati. I terreni argillosi soggetti a variazioni di volume sono costituiti da depositi quaternari, quali i depositi alluvionali e le coltri eluvio-colluviali, spesso indicati con il termine di "formazioni superficiali". La finalità di questo lavoro è illustrare e discutere le problematiche geologico-tecniche che emergono nello studio delle formazioni superficiali soggette a variazioni di volume. L'area studiata è costituita dal centro urbano di Varzi (Italia Settentrionale, Appennino Pavese), impostato su depositi alluvionali ed eluvio-colluviali. L'approccio adottato è di tipo multidisciplinare; al fine di ricostruire il modello geologico-tecnico dell'area sono stati raccolti dati riguardanti la geologia, la geomorfologia, l'evoluzione del reticolato idrografico, nonché informazioni storiche relative allo sviluppo urbano del paese di Varzi. In una prima fase sono state identificate, tramite fotointerpretazione, le unità morfologiche (terrazzi e conoidi alluvionali, frane, ecc.). Nella seconda fase tali unità sono state caratterizzate dal punto di vista litostratigrafico, idrogeologico e geotecnico in modo da definire delle unità morfo-litotecniche omogenee in base a: geni (alluvionale, di versante, antropica), condizioni topografiche (acclività e drenaggio), litofacies, geometria dei terreni (spessore, variazioni laterali), condizioni idrogeologiche (soggiacenza falda, permeabilità) e geotecniche (potenziale di ritiro-rigonfiamento e spessore della zona attiva). Le unità morfo-litotecniche individuate sono state classificate in funzione del loro potenziale di ritiro-rigonfiamento.

ABSTRACT: C. Meisina & L. Rolandi, *Engineering geological problems related to swelling-shrinking superficial deposits*. IT ISSN 0394-3356, 2004.

The volume changes of clayey soils (shrinking in the drought periods, swelling in the periods of rainfalls) are the cause of many problems in engineered structures. Global climatic changes as prolonged period of dry weather, influence soil moisture content and are the primary cause of volume changes of clayey soils in temperate regions. In Italy most of these soils are associated with alluvial deposits and eluvial-colluvial soils derived from sedimentary rocks by weathering (superficial deposits). The aim of the work is to underline the engineering geological problems related to the study of the superficial deposits characterized by volume changes. The test site is the urbanized area of the town of Varzi (Northern Italy, Pavese Appennines) built on the alluvial and eluvial-colluvial deposits. The lithological setting and geotechnical characteristics of these deposits are poorly defined, due to the lack of outcrops and the intrinsic heterogeneity of the sediments. Engineering geological mapping was carried out to provide engineering geological information as an aid in planning land use. The adopted approach has been multidisciplinary, such that data regarding the geology, geomorphology, hydrographic network, urban development and history of the town area have been used to develop a geological/geotechnical model of the area. In the first step the landforms (alluvial terraces, landslides, alluvial fans, etc.) were mapped from aerial photographs. In the second step for each landforms the nature of surface materials (lithostratigraphic, hydrogeological and geotechnical characteristics) was determined. The datasets included boreholes, trial pits and penetrometer tests. Geotechnical and lithological profiles have been constructed. The geotechnical site investigations had the aim of characterising the soil conditions within each homogeneous zone and consisted of pits with a maximum depth of 3 m for the shallow soil exploration, the soil profile description and the collection of samples in the areas representative of the engineering geological terrain units. In addition to the classical mineralogical and geotechnical tests (index properties and volumetric characteristic determination) the samples were submitted to the methylene blue adsorption test, to the swelling pressure and swell strain tests and to the determination of the suction with the filter paper technique. Engineering geological zoning was carried out by assessing main attribute groups: genesis, topographic conditions (slope angle and drainage), lithologies, geometries, hydrogeological (depth to the water table, hydraulic conductivity) and geotechnical characteristics. The area was divided into 13 morpho-engineering geological units (areas that may be regarded as homogeneous from the geomorphological and engineering geological point of view) analyzed in terms of swelling-shrinking susceptibility. .

Parole chiave: terreni rigonfianti, unità morfo-litotecniche, formazioni superficiali, Varzi.

Keywords: swelling soils, morpho-engineering geological units, superficial deposits, Varzi.

### 1. INTRODUZIONE

Il termine "terreni argillosi rigonfianti" definisce terreni caratterizzati da variazioni di volume (rigonfiamento e ritiro) dovute a cause naturali (precipitazioni, risalita della falda, ecc.) o antropiche (irrigazioni, rotture di condotte, ecc.). Essi fanno parte dei terreni problematici, in quanto sono all'origine di numerosi danni a fondazioni di edifici ed infrastrutture (strade) (MOURoux

et al., 1988; BELL & BRUYN, 1997; PAGE, 2003). Il potenziale di ritiro-rigonfiamento di un terreno argilloso dipende dal tipo e dalla quantità di minerali argillosi presenti, dalla sua struttura e soprattutto dal suo contenuto in acqua e grado di saturazione (CHEN, 1988). Negli ultimi anni i cambiamenti climatici globali hanno determinato il ripetersi di periodi particolarmente siccitosi che hanno amplificato il fenomeno anche nei nostri climi temperati. Le variazioni di volume generalmente si

manifestano nello spessore di terreno che costituisce la zona attiva (zona che risente delle variazioni di contenuto d'acqua in risposta alle condizioni climatiche) (BRE, 1996). Dal punto di vista geotecnico tali terreni vengono definiti come non saturi ed essi sono costituiti da depositi quaternari, quali i depositi alluvionali e le coltri eluvio-colluviali, spesso indicati con il termine di "formazioni superficiali" (McMILLAN & POWELL, 1999). Nelle aree appenniniche le coltri eluvio-colluviali, di natura prevalentemente argillosa, ricoprono in modo diffuso i versanti con spessori variabili da pochi decimetri ad alcuni metri, derivano dall'alterazione del substrato ad opera degli agenti atmosferici e dal successivo trasporto ad opera delle acque superficiali e/o della gravità e costituiscono il terreno di fondazione della maggior parte degli edifici. I danni associati alle variazioni di volume delle coltri eluvio-colluviali sottolineano la necessità di identificare e classificare tali terreni, valutando anche la loro pericolosità al ritiro-rigonfiamento ai fini di una corretta pianificazione territoriale, in particolar modo a scala di dettaglio (Piani Regolatori Comunali).

Il ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi è un fenomeno complesso, il cui studio necessita di un approccio di tipo integrato che si dovrebbe avvalere, oltre che dell'analisi geologica e mineralogica, delle metodologie e dei presupposti teorici propri della meccanica delle terre, anche della conoscenza, propria della geologia del quaternario, dell'ambiente di formazione, del meccanismo deposizionale, e dei caratteri sedimentologici.

La finalità di questo lavoro è illustrare e discutere le problematiche geologico-tecniche che emergono nello studio delle formazioni superficiali soggette a variazioni di volume. A tale scopo viene presentato un esempio di redazione di una carta delle unità morfologico-litotecniche (unità litologiche omogenee dal punto di vista geomorfologico e geologico-tecnico) ai fini della valutazione della pericolosità al ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi in un'area appenninica. L'area studiata è costituita dal centro urbano di Varzi (provincia di Pavia) situato nella parte meridionale dell'Oltrepo Pavese (Italia Settentrionale), nell'alta valle del T. Staffora, tributario di destra del F. Po.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA STUDIATA

Il territorio comunale di Varzi, classificato come sismico (zona 2, Ordinanza P.C.M. n° 3274 del 20/03/2003), è attraversato dal T. Staffora, che in questa zona presenta un andamento EW, parallelo alla Linea Villavernia-Varzi, struttura tettonica di importanza regionale, definita da studi recenti come un sistema transpressivo destro (CERRINA FERONI *et al.*, 2002). Tale struttura giustappone due "mondi" paleogeografico-strutturali ben differenziabili: l'estrema propaggine orientale del bacino Terziario Ligure-Piemontese a Sud, caratterizzata da una relativa tranquillità giaciturale con una successione stratigrafica dall'Eocene superiore al Miocene inferiore, e l'Appennino Pavese a nord con successioni sedimentarie discontinue dal Cretaceo inferiore al Miocene ed intensamente deformate (BEATRIZZOTTI *et al.*, 1969) (Fig. 1). Il fondovalle presenta forme di terrazzamento (terrazzi convergenti e poligeni-

ci) e conoidi per lo più fossili dei principali affluenti del T. Staffora (il T. Reganzo, il Rio Reponte superiore e inferiore in destra idrografica ed il T. Lella in sinistra). La morfologia dei versanti è contrassegnata dalla presenza di numerosi fenomeni franosi di tipo complesso (scivolamenti traslazionali e rotazionali che evolvono in colamenti) (BRAGA *et al.*, 1985).

Il regime pluviometrico è di tipo appenninico con la presenza di due massimi (novembre e maggio) e minimi stagionali ben marcati che caratterizzano l'anno medio.

Il centro urbano del comune di Varzi, dove si è concentrato lo studio, ha un'estensione di 4,5 km<sup>2</sup> e occupa la fascia di fondovalle in destra idrografica del T. Staffora terrazzata e modellata prevalentemente nei depositi di tipo alluvionale e di tipo eluvio-colluviale provenienti dagli adiacenti versanti.

Sul ripiano più alto si è sviluppato il borgo antico, mentre le successive espansioni fino ai tempi più recenti hanno progressivamente occupato anche parte del ripiano inferiore.

In sinistra idrografica le forme di terrazzamento sono meno marcate essendo presente un solo terrazzo modellato nelle alluvioni recenti. Le coltri eluvio-colluviali si sviluppano sui versanti e ricoprono parzialmente i terrazzi alluvionali. Nonostante esse corrispondano al 30 % dell'area studiata sono cartografate solo in parte nella carta geologica ufficiale.

Nel centro urbano gli interventi antropici hanno comportato notevoli modifiche alla morfologia e all'idrografia dell'area. L'alveo del T. Staffora, che in tempi storici (inizio XX secolo) si estendeva fino a ridosso del borgo antico, risulta ora delimitato in sponda destra da opere di difesa (muri e gabbionate) erette in tempi successivi per contrastare i fenomeni di alluvionamento. Ciò ha comportato un sensibile restringimento della sua ampiezza negli ultimi 50 anni (MEISINA, 1998). Nelle zone di confluenza di alcuni corsi d'acqua l'urbanizzazione ha portato alla canalizzazione dell'asta terminale, con contestuale riduzione delle sezioni idrauliche (Rio Reganzo, Rio Lazzuola). Nei Rii Reponte inferiore e Reponte superiore la tombinatura dei corsi d'acqua costituisce un ulteriore elemento critico.

Il paese è attraversato inoltre da un canale artificiale, il Canale Lagozzo, costruito alla fine del XIII secolo per alimentare un mulino.

## 3. METODOLOGIA DI LAVORO

L'approccio adottato è di tipo multidisciplinare; al fine di ricostruire il modello geologico-tecnico dell'area sono stati utilizzati dati riguardanti la geologia, la geomorfologia, l'evoluzione del reticolato idrografico ed informazioni storiche sullo sviluppo urbano del paese di Varzi.

Lo studio è stato articolato in due fasi (Fig. 2):

- 1° fase: definizione delle unità morfologiche;
- 2° fase: definizione di unità geologico-tecniche di dettaglio (unità morfo-litotecniche).

Nella prima fase sono state identificati, tramite fotointerpretazione, i principali elementi morfologici dell'area sia naturali (terrazzi e conoidi alluvionali, frane) che antropici (scavi, riporti). La consultazione di documenti storici e l'analisi multitemporale di foto aeree

hanno permesso inoltre di identificare l'evoluzione del reticolato idrografico. Alla fine di tale fase il territorio studiato è stato suddiviso in diverse unità morfologiche.

Successivamente, nella seconda fase, tali unità sono state caratterizzate dal punto di vista geologico-tecnico in modo da definire delle unità morfo-litotecni-

che, omogenee in base a: genesi (alluvionale, di versante, antropica), condizioni topografiche (acclività e drenaggio), litofacies, geometria dei terreni (spessore, variazioni laterali), condizioni idrogeologiche (soggiacenza falda, condizioni di drenaggio) e geotecniche (potenziale di ritiro-rigonfiamento e spessore della zona

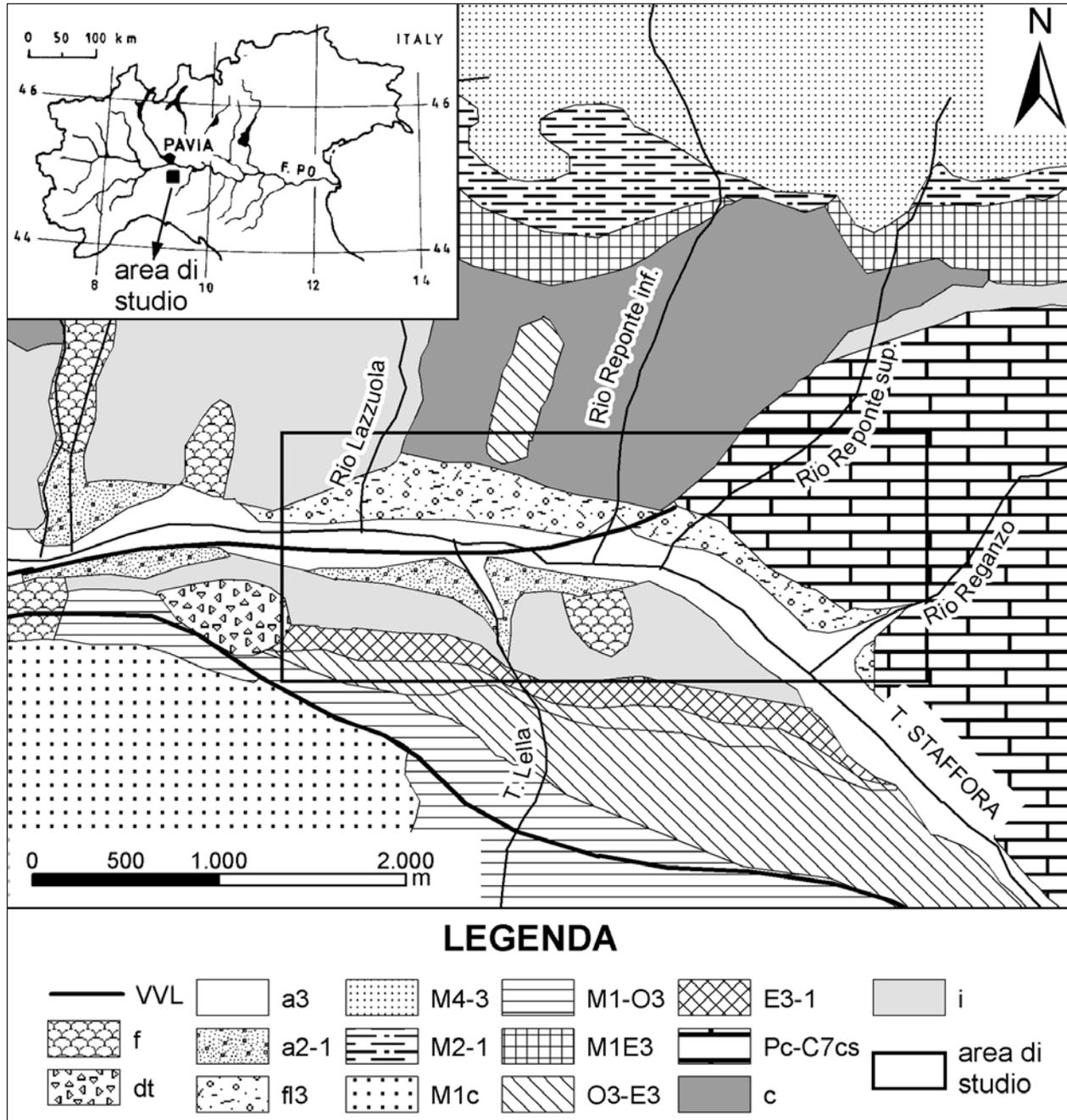


Fig. 1 - Carta geologica (BEATRIZZOTTI *et al.*, 1969). f: frana; dt: eluvio, colluvio e detriti; a<sup>3</sup>: alluvioni attuali degli alvei attivi dei corsi d'acqua; a<sup>2-1</sup>: alluvioni post-glaciali; fl<sup>3</sup>: Fluviale Recente; M<sup>4-3</sup>: Arenarie di M. Vallassa (Tortoniano-Serravalliano); M<sup>2-1</sup>: Marne di M. Lumello (Langhiano - Miocene pre-Langhiano); M<sup>1c</sup>: Formazione di Castagnola (Miocene pre-Langhiano); M<sup>1-O3</sup>: Marne di Rigoroso (Miocene inferiore - Oligocene superiore); M<sup>1-E3</sup>: Marne di Antognola (Miocene pre-Langhiano - Eocene superiore); O<sup>3-E3</sup>: Arenarie di Ranzano (Oligocene superiore - Eocene superiore); E<sup>3-1</sup>: Marne di M. Piano (Eocene superiore - Eocene inferiore); Pc-c<sup>7cs</sup>: Calcarei di M. Cassio (Paleocene - Turoniano); c: Complesso Caotico; i: Complesso Indifferenziato; VVL: Linea Villalvernia-Varzi.

Geological map (BEATRIZZOTTI *et al.*, 1969). f: landslide; dt: eluvium, colluvium and debris; a<sup>3</sup>: Holocenic Alluvium; a<sup>2-1</sup>: post-glacial Alluvium; fl<sup>3</sup>: Upper Pleistocene Alluvium; M<sup>4-3</sup>: M. Vallassa Sandstones (Tortonian-Serravallian); M<sup>2-1</sup>: M. Lumello Marls (Langhian - Miocene pre-Langhian); M<sup>1c</sup>: Castagnola Formation (Miocene pre-Langhian); M<sup>1-O3</sup>: Rigoroso Marls (Lower Miocene - Upper Oligocene); M<sup>1-E3</sup>: Antognola Marls (Miocene pre-Langhian - Upper Eocene); O<sup>3-E3</sup>: Ranzano Sandstones (Upper Oligocene - Upper Eocene); E<sup>3-1</sup>: M. Piano Marls (Upper Eocene - Lower Eocene); Pc-c<sup>7cs</sup>: M. Cassio Limestones (Paleocene - Turonian); c: Chaotic Complex; i: Undifferentiated Complex; VVL: Villalvernia-Varzi Line.

attiva). L'individuazione delle unità morfo-litotecniche è avvenuta tramite l'analisi dei dati geologici e geotecnici del sottosuolo del centro abitato di Varzi. Questi sono stati raccolti presso lo STER (Regione Lombardia - Servizio Territoriale di Pavia) e fanno parte degli studi geologici riguardanti gli interventi edilizi nei territori classificati sismici. La disponibilità di tali dati ha permesso di presentare un quadro sintetico di informazioni integrate sulle caratteristiche geologiche, sedimentologiche, idrogeologiche e geotecniche dei depositi alluvionali ed in particolare di quelli eluvio-colluviali. Le indagini sono costituite da 132 trincee esplorative (profondità variabili da 1 a 5 m), 27 sondaggi (da 5 a 15 m) e 139 prove penetrometriche (da 4 a 12 m). Le trincee esplorative hanno messo in evidenza le caratteristiche delle formazioni superficiali (coltri alluvionali ed eluvio-colluviali), i sondaggi e le prove penetrometriche hanno raggiunto il substrato e hanno permesso di ricostruire lo spessore dei terreni di copertura. Le prove penetrometriche risultano l'elemento principale di caratterizzazione geotecnica dei terreni (n° di colpi correlato con la resistenza del terreno ed il suo potenziale di rigonfiamento). Si tratta per lo più di prove dinamiche DCPT ed in minor quantità di CPT (n°19) e SPT (n°2). Il primo problema relativo alle prove dinamiche continue è stato quello di uniformare e validare i dati in possesso, infatti le prove sono state eseguite con tipi di penetrometri differenti (DPHS Meardi-AGI e medio-leggero DL30) che si differenziano per spinta di infissione,

maglio, altezza di caduta e penetrazione standard (uguale a 30 cm nella maggioranza dei casi, ma anche a 10 o 20 cm). La disponibilità di alcune misure SPT effettuate in foro di sondaggio ha permesso indicativamente di trovare la seguente correlazione tra  $N_{DP}$  e  $N_{SPT}$ :  $N_{SPT} \approx 2N_{DP}$ .

Il censimento degli edifici lesionati ha permesso di individuare le unità morfo-litotecniche che presentano particolari problematiche geologico-tecniche. Il censimento è avvenuto mediante la consultazione presso lo STER delle richieste di finanziamento nel periodo 1980-1999 per interventi di ripristino di fabbricati privati e pubblici lesionati (contributi in conto capitale regolati dalle leggi statali/regionali: L.R. n°59/1978, M. per coord. Prot. Civile n°942 - 31.03.1987, DGR n°23463 23.12.1996, DGR n°43777 18.06.1999). I dati raccolti sono stati successivamente verificati sul terreno, questo ha permesso anche di identificare ulteriori edifici che non risultavano nelle pratiche consultate. Per ogni fabbricato è stata compilata una scheda riportante le caratteristiche del terreno di fondazione, le caratteristiche costruttive dell'edificio stesso e il quadro fessurativo.

Le unità morfo-litotecniche argillose sono state caratterizzate anche mediante prove geotecniche di laboratorio. I campioni sono stati prelevati manualmente in corrispondenza di scarpate naturali o artificiali (scavi realizzati per fondazioni, tagli lungo la sede stradale). Le profondità raggiunte, rispetto al piano campagna, sono comprese tra 1,5 e 3 m. Nella descrizione

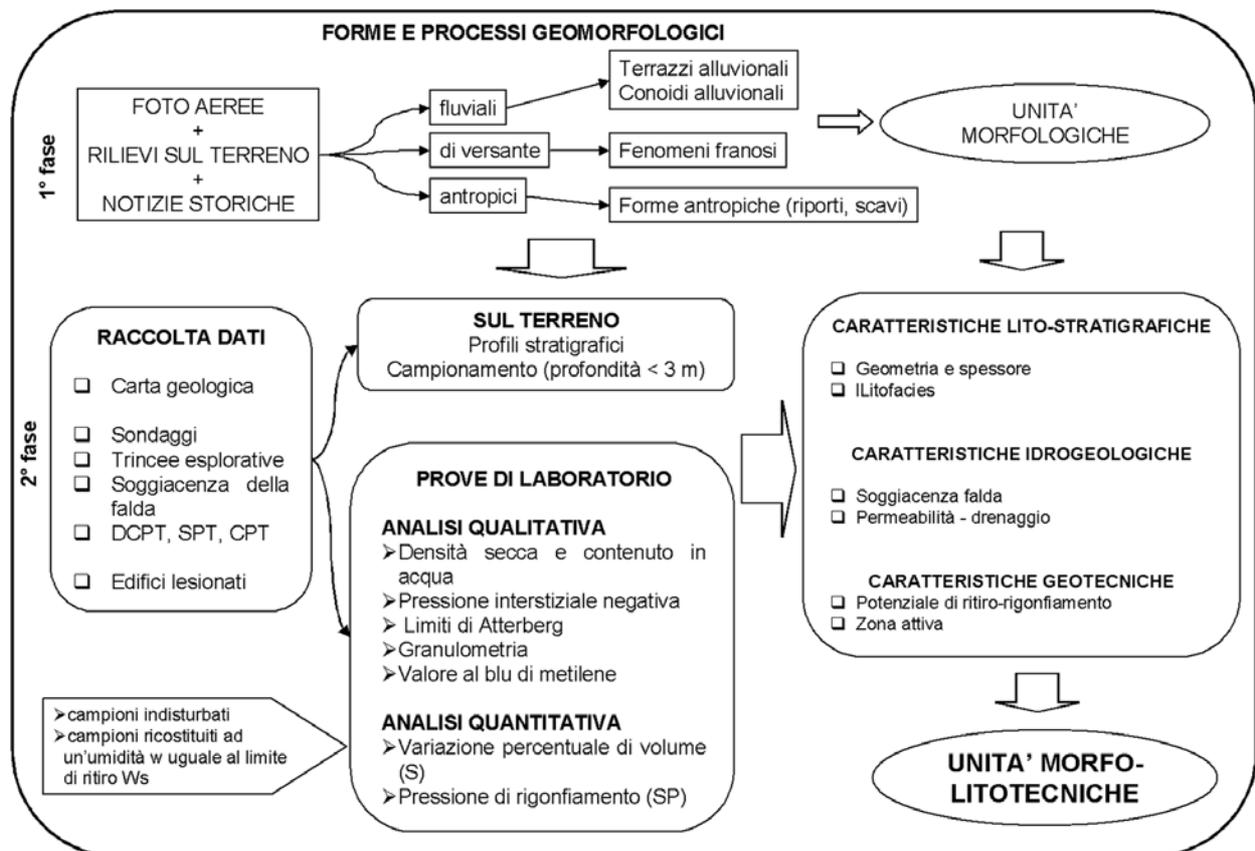


Fig. 2 - Flow-chart illustrante la metodologia di studio.

Flow-chart showing the methodology of study.

litostratigrafia è stata posta particolare attenzione alle caratteristiche diagnostiche del fenomeno di ritiro-rigonfiamento, quali la presenza di fessure di ritiro, superfici di pressione e di scivolamento (slickensides) (AHMAD & MERMUT, 1996). In aggiunta alle tradizionali prove geotecniche di classificazione (limiti di Atterberg, analisi granulometriche, ecc.), i campioni sono stati sottoposti ad analisi più specifiche, quali il test del blu di metilene (AFNOR, 1998), la misura della suzione matriciale con il metodo della carta da filtro (CHANDLER & GUTIERREZ, 1986) e la prova di rigonfiamento in parallelo (AFNOR, 1995). La prova del blu di metilene, consiste nel quantificare la capacità d'assorbimento ionico dei suoli, misurando la quantità di blu di metilene necessaria per ricoprire la superficie totale delle particelle costituenti il terreno. Tale prova permette di avere indicazioni qualitative (tipi di minerali argillosi in funzione della misura della loro superficie attiva) e quantitative sulla frazione argillosa e quindi risulta di grande utilità nello studio delle problematiche connesse alle variazioni volumetriche dei terreni argillosi (MAGNAN & YOUSSEFIAN, 1989; TOURENQ & TRAN NGOC LAN, 1989; FYTIUS *et al.*, 2000). La prova di rigonfiamento in parallelo all'edometro consiste nell'applicare a provini di uno stesso campione carichi diversi per la misura della variazione percentuale di volume (deformazione dovuta al rigonfiamento) e della pressione di rigonfiamento (pressione necessaria per impedire la deformazione di volume) (Fig. 3). Tra le numerose prove di laboratorio esistenti per la misura della pressione di rigonfiamento essa viene considerata come la più attendibile (SERRATRICE & SOYEZ, 1996). Il metodo della carta da filtro consiste nel misurare il contenuto in acqua di una carta da filtro standard (Whatman n°42) a contatto con il terreno e si basa sull'ipotesi che all'equilibrio la suzione matriciale della carta da filtro e del campione siano gli stessi. La variazione della suzione con la profondità permette di determinare lo spessore della zona attiva.

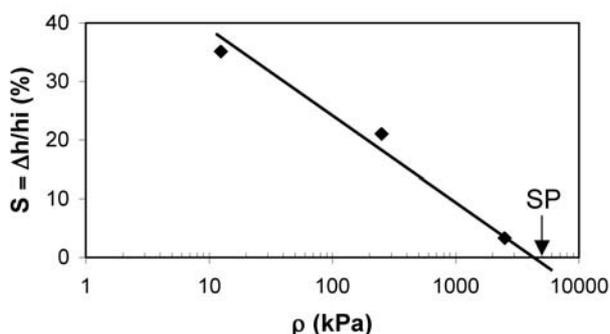


Fig. 3 - Metodologia per la determinazione della pressione di rigonfiamento SP e della variazione percentuale di volume S.  $\Delta h$ : variazione di altezza del campione dovuta al rigonfiamento,  $h_i$ : altezza iniziale del campione.

Method used for the determination of SP and S.  $\Delta h$ : height of swell due to saturation,  $h_i$ : original height of the soil specimen.

#### 4. UNITA' MORFOLOGICHE

L'analisi degli aspetti geomorfologici (forme e processi) dell'area studiata, avvenuta tramite fotointerpretazione, ha permesso di identificare sei unità morfologi-

che preliminari, che sono il risultato di processi morfogenetici fluviali, di versante e antropici.

Le unità morfologiche di tipo fluviale sono rappresentate dall'alveo attivo del T. Staffora, dai terrazzi dello stesso torrente visibili soprattutto in destra idrografica e dai conoidi degli affluenti. L'identificazione di tali unità ha comportato talora alcune difficoltà, connesse soprattutto all'intensa antropizzazione del nucleo urbano, che ha causato la parziale modificazione e/o scomparsa della loro forma. In questo contesto lo studio dell'evoluzione del reticolato idrografico ha fornito un valido strumento di identificazione delle unità morfologiche, permettendo, per esempio di tracciare il limite del conoide fossile del Rio Reponte superiore (Fig. 4). Accurate ricerche storiche dal XIV secolo ad oggi, hanno infatti messo in evidenza che tale Rio ha subito nel tempo due spostamenti verso Est. Si suppone che nei secoli XIV-XV l'alveo del torrente, corrispondente all'attuale strada "Vicolo del Pozzo", sia stato spostato ad Est sul tracciato della via oggi conosciuta come "Via Reponte Vecchio". A riprova di ciò, durante i lavori di scavo eseguiti nelle cantine di un edificio del centro storico, è stato rinvenuto un muro di difesa spondale proprio lungo il tracciato presunto del Rio. L'ultimo spostamento (da via Reponte Vecchio all'attuale sede) è avvenuto intorno al 1873. A quell'epoca il canale scorreva interamente a cielo aperto e solo durante la seconda metà del 1900 è stato progressivamente tombinato (DEBATTISTI, 1996).

Le unità legate a processi di versante sono derivate da fenomeni franosi e da fenomeni di erosione e di deposizione da parte delle acque non incanalate, che hanno portato alla formazione di estese coltri eluvio-colluviali che coprono talora anche i terrazzi alluvionali più antichi.

Gli interventi antropici hanno prodotto notevoli modifiche dell'originaria morfologia dell'area, con prevalenza dei riporti a struttura lineare (rilevati stradali - ferroviari) e areale (fascia a ridosso delle difese di sponda destra). Essi danno origine ad un'unità morfologica, definibile come *made ground* dalla classificazione dei terreni artificiali proposta dal *British Geological Survey* (ELLISON *et al.*, 2002; ROSENBAUM *et al.*, 2003).

#### 5. UNITA' MORFO-LITOTECNICHE

Le unità morfologiche precedentemente descritte sono state successivamente analizzate in base alle caratteristiche litostratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche, che predispongono i terreni al fenomeno di ritiro-rigonfiamento. A tal fine la fotointerpretazione è stata integrata con i dati di sottosuolo derivanti sia dai logs di sondaggi geognostici e di trincee esplorative che dall'analisi dei dati geofisici disponibili. L'insieme dei dati ha permesso di definire in dettaglio le litofacies, l'andamento e la distribuzione geometrica dei vari corpi litostratigrafici più superficiali, con particolare riguardo a quelli argillosi, sede delle variazioni di volume. Successivamente sono state studiate le condizioni idrogeologiche (tipo di falda, soggiacenza della superficie piezometrica). I terreni sono stati, infine, caratterizzati sulla base delle proprietà geotecniche (potenziale di ritiro-rigonfiamento, spessore zona attiva).

Durante l'analisi dei dati sono emerse, anche in

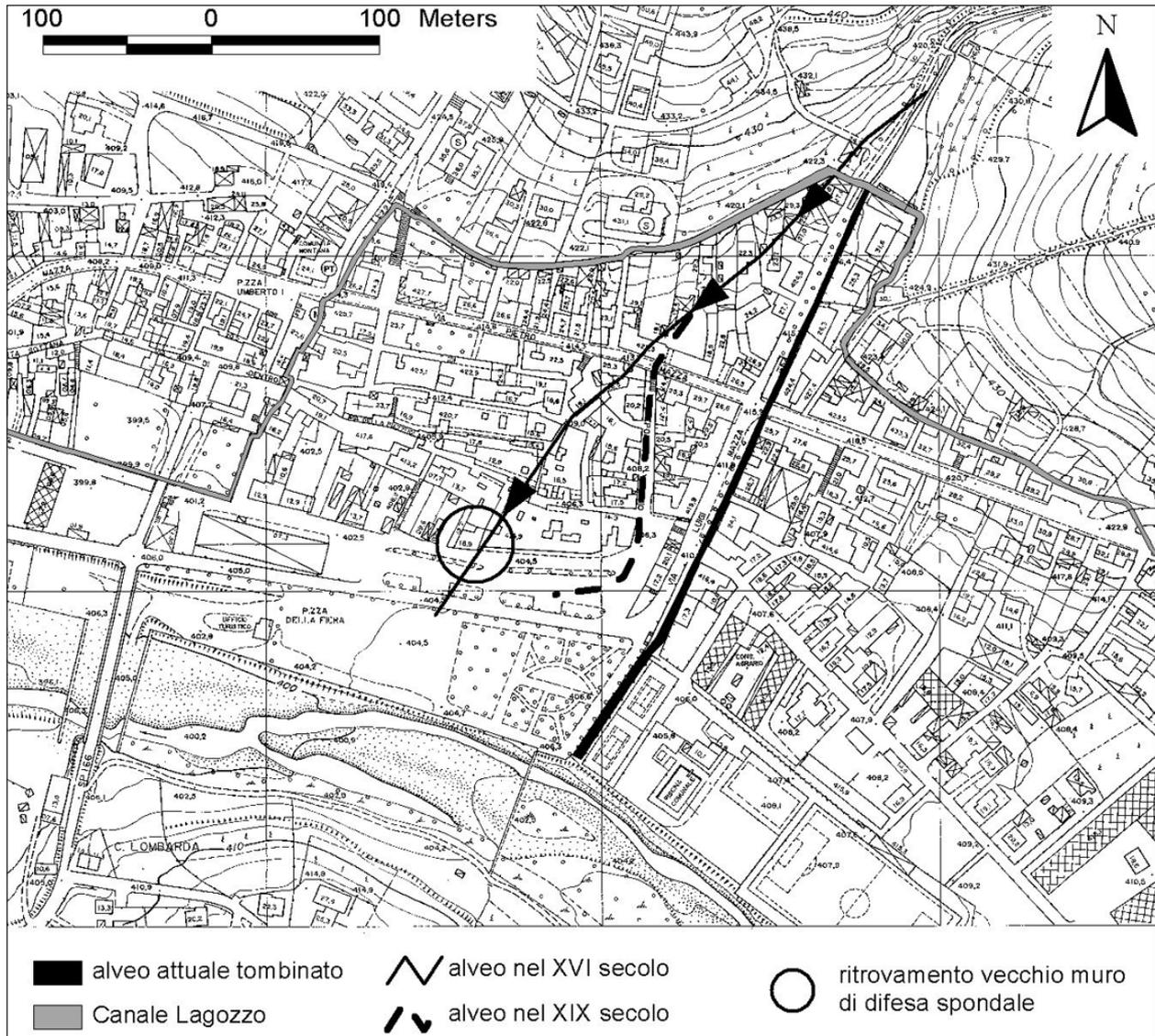


Fig. 4 - Evoluzione dell'alveo del Rio Reponte Superiore.  
Channel evolution of the Upper Reponte stream.

questo caso, alcune difficoltà, connesse alla grande variabilità/eterogeneità dei depositi alluvionali ed eluvio-colluviali, che ha talora reso difficile l'individuazione di zone omogenee, soprattutto nella zona urbana dove sono frequenti i materiali di riporto.

Sulla base dei criteri applicati (caratteristiche litostratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche) le sei unità morfologiche sono state ulteriormente suddivise, ottenendo 13 unità, definite come morfo-litotecniche (Fig. 5 e Tab. 1), il cui scopo è quello di fornire informazioni riguardanti la suscettibilità al ritiro-rigonfiamento dell'area in esame.

### 5.1. Caratteristiche litostratigrafiche

Le unità 1, 2, 4, 5 e 6 derivano dalle unità morfologiche di tipo fluviale. L'unità 1 è costituita dalle alluvioni attuali del T. Staffora, che occupano la fascia di alveo attivo; esse risultano gradate e a composizione ghiaioso-ciottolosa con matrice fine ( $d = 10\div 20$  cm).

Nelle aree laterali, in destra ed in sinistra idrografica, si riconoscono situazioni differenti. Stendimenti sismici a rifrazione eseguiti in sinistra idrografica nell'unità 2 hanno evidenziato uno spessore dei depositi alluvionali ghiaiosi fino a  $8\div 10$  m, che porta ad ipotizzare l'esistenza in tale fascia di un paleoalveo sviluppato su una lunghezza di  $400\div 500$  m e sede dell'acquifero che alimenta i pozzi dell'acquedotto. Sulla sponda opposta tale unità ha una minore potenza ed inoltre è differenziata per composizione e grado di addensamento (livelli argillosi giallastri consolidati e ghiaiosi). La copertura limosa presenta uno spessore ridotto ed irregolare ( $\leq 0,5\div 1$  m), e non è significativa ai fini geotecnici (Fig. 6, profili n°1 e n°2): lo strato ghiaioso sottostante rappresenta infatti il principale riferimento per le fondazioni ricorrenti nell'area.

In destra idrografica i ripiani alluvionali sono caratterizzati da terreni limoso-argillosi di spessore variabile da 0,5 a 5 m, che ricoprono in genere orizzonti

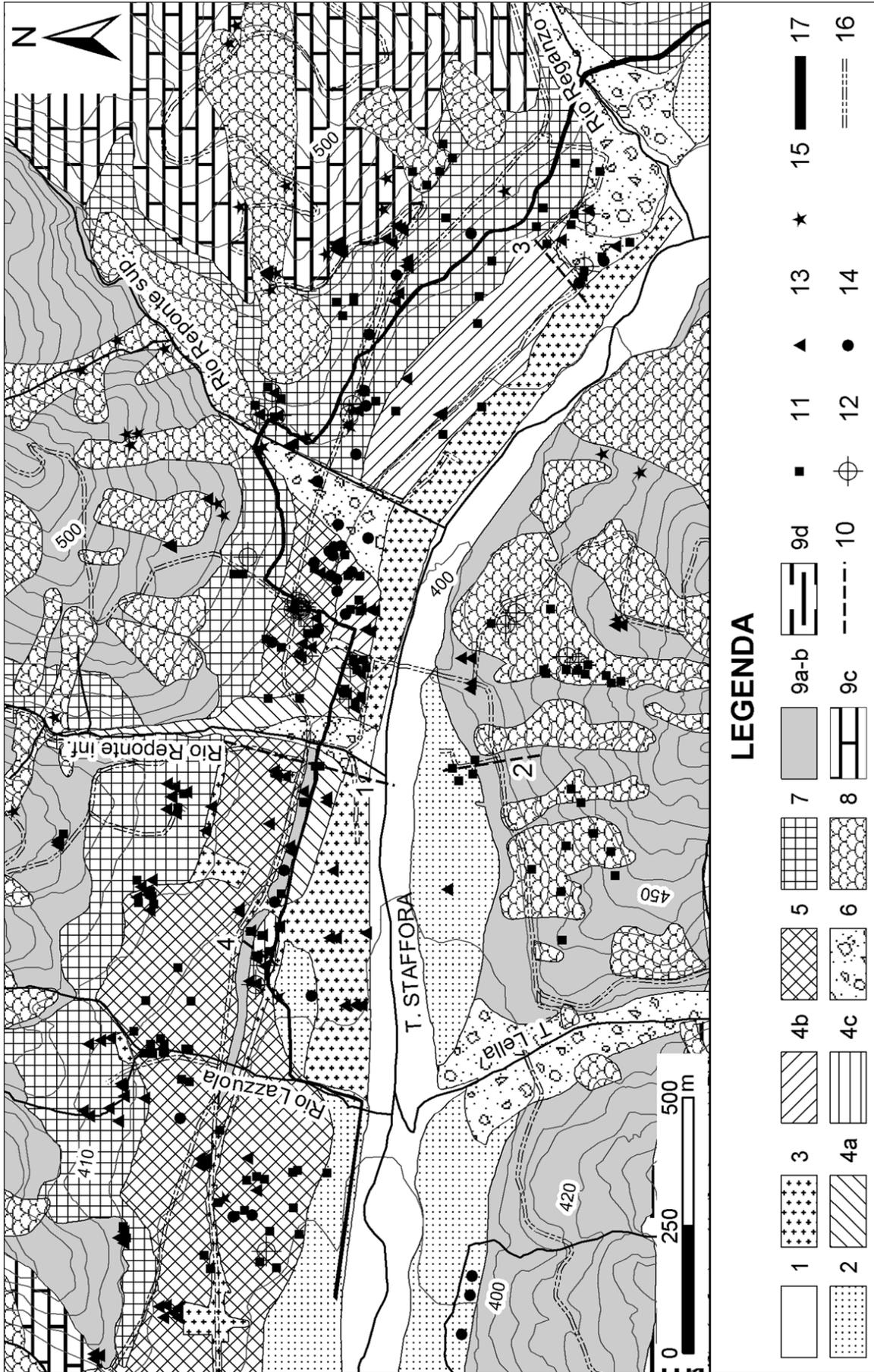


Fig. 5 - Carta delle unità morfo-litotecniche. 1-9: unità morfo-litotecniche (tabella 1); 10: profili geotecnici; 11: trincee esplorative; 12: sondaggi meccanici; 13: prove penetrometriche; 14: pozzii; 15: edifici lesionati; 16: strade; 17: Canale Lagozzo.  
 Morpho-engineering geological terrain unit map. 1-9: morpho-engineering geological terrain units (table 1); 10: geotechnical profiles; 11: trench pits; 12: boreholes; 13: penetrometer tests; 14: wells; 15: damaged buildings; 16: roads; 17: Lagozzo Channel.

Tabella 1 - Descrizione e principali proprietà geotecniche delle unità morfo-litotecniche. S: spessore; P: acclività; K: permeabilità; D: condizioni di drenaggio; h: spessore della zona attiva.

*Description and main geotechnical properties of the morpho-engineering terrain units. S: thickness; P: slope angle; K: permeability; D: drainage conditions; h: thickness of the active zone.*

UNITA'	DESCRIZIONE		FALDA ACQUIFERA	P	K	D	h
1	ghiaia eterometrica con locali intercalazioni sabbioso-limose. S: da 0 a 6-8 m	alveo attivo del T. Staffora	subalvea	<5°	media e alta	buono	
2	ghiaia e sabbia in matrice limosa con copertura limoso-sabbiosa (S < 0,75 m), talora lenti limoso-sabbiose (S = 1-2 m). Spessori dell'unità variabili in destra e sinistra idrografica.	Alluvioni recenti, rilevate di circa 2 m rispetto all'alveo	falda superficiale a carattere stagionale con soggiacenza < 2m; falda principale (> 3 m) sfruttata a scopo potabile	<5°	da media a bassa	mediocre	<0,5
3	materiale risulta scavi e demolizioni (S = 1-2 m), talora con intercalazioni di argilla e limo. Rilevati stradali e ferroviari (ghiaie prevalenti).	made ground	variabile	<5°	molto variabile	variabile	-
4A	limo argilloso con spessore da 1-2,6 m fino a 5 m in prossimità dei versanti (apporti colluviali), talora misto a ghiaia.	terrazzi alluvionali: alluvioni recenti (superficie modificata da interventi antropici)	falda acquifera alimentata dal flusso subalveo del Torrente Staffora, soggiacenza < 4 m.	<5°	bassa	mediocre	0,8
4B	ghiaie grosse frammiste ad argille (S < 5 m) soprastanti ghiaie medie in matrice sabbioso-limoso. (S: 6-10 m). Presenza di strati di riporto con composizione eterogenea.	terrazzi alluvionali: alluvioni recenti, conoidi alluvionali (Rio Reponte sup.)	falda alimentata dal flusso subalveo dei Torrenti Staffora e Reganzo, soggiacenza < 3 m.	<5°	media e alta	buona	-
4C	limo argilloso con variazioni laterali a limo-sabbioso/sabbie fini soprastante ghiaia, presenza di strati di riporto.	terrazzi alluvionali: alluvioni recenti	soggiacenza < 4 m	<5°	bassa	basso	1
5	limo argilloso con frazione detritica (apporti dai versanti) e/o ghiaiosa sparsa o concentrata (S = 1 - 5 m) in lenti/livelletti appoggiante su ghiaia. (S= 10 m).	terrazzi alluvionali: alluvioni antiche	modeste percolazioni nei livelli a componente ghiaiosa prevalente ed al contatto alluvione/substrato	<5°	bassa	mediocre	0,8
6	clasti calcarei e limo argilloso giallastro in alternanza o commisti.	conoidi alluvionali	circolazione idrica nei livelli più permeabili	<5°	media	mediocre	-
7	limi argillosi e argille con detrito sparso di spessore da 2 a 6 m, crescente da SE a NO.	depositi colluviali al piede dei versanti	possibile circolazione idrica di modesta entità nei livelli più permeabili	5°-8°	bassa	basso	1,8
8	argille e limi argillosi con detrito sparso e di spessore 2-4 m.	accumuli di frana	possibile circolazione idrica di modesta entità nei livelli più permeabili	10°-15°	bassa	basso	
9a-b	argilla con inclusi litoidi di varia dimensione e copertura di alterazione di spessore ridotto e irregolare (< 2 m).	copertura eluvio-colluviale su bedrock (Complesso Caotico)	localmente l'eterogeneità litologica e strutturale può favorire la concentrazione di acqua (falde sospese)	10°-20°	bassa	mediocre	0,8
9c	alternanze di argille e calcari marnosi con coltre di alterazione a componente argilloso-detritica (S = 3-4 m). La parte superiore (1,2-1,5 m) è soggetta alle variazioni stagionali del contenuto in acqua	copertura eluvio-colluviale su bedrock (Calcari di M. Cassio)	flussi idrici temporanei nella coltre argilloso-detritica fessurata per essiccamento	10°-20°	media	mediocre	0,8
9d	marne e marne argillose	copertura eluvio-colluviale su bedrock (Marne di M. Piano)		>15°	bassa	mediocre	-

alluvionali ghiaiosi (unità 4 con relative sottoclassi e 5 – Fig. 6, profili n° 1 e 3). Essi hanno distribuzione areale e spessore diversi, influenti sulle caratteristiche geotecniche. L'eterogeneità stratigrafica e geotecnica è complicata dalla presenza di conoidi fossili (unità 6) limitate al ripiano delle alluvioni antiche o estese anche alle alluvioni recenti (Rii Reponte superiore ed inferiore), nonché da depositi colluviali nella fascia di transizione al versante soprastante. Negli strati argillosi consolidati sono spesso anche presenti superfici di scivolamento e di pressione ("slickensides"), caratteristiche di terreni che hanno subito variazioni di volume. Il substrato impermeabile si trova ad una profondità media di circa 10 m.

Nell'unità 4B la coltre alluvionale raggiunge spessori di 10÷14 m. I sondaggi eseguiti hanno rilevato al di sotto della copertura vegetale (0,5 m) e fino a 4÷5 m di profondità un orizzonte eterogeneo, costituito da argilla limosa, con ghiaia talora dominante il cui spessore aumenta procedendo verso valle. Seguono quindi ghiaie e sabbie ad elementi poligenici poco arrotondati con subordinata matrice limoso-argillosa diffusa o in lenti (Fig. 6, profilo n° 3).

Nell'ambito dell'unità 4C si differenziano due strati (Fig. 6, profilo n° 4): il superiore (la) essenzialmente limoso-argilloso di colore grigio-azzurro o grigio-bruno, saturo e di bassa consistenza, con variazioni laterali a limo sabbioso/sabbie fini (ls); l'inferiore (gh) costituito da ghiaia con ciottoli e limo addensati, di media permeabilità.

L'unità 5, che interessa il terrazzo più elevato, comprende una copertura limosa argillosa con frazione detritica (apporti colluviali dalle incisioni del versante soprastante) (Fig. 7) e uno strato ghiaioso-ciottoloso (gh1) di colore biancastro, interessato da una modesta circolazione idrica.

Sulle scarpate di raccordo dei ripiani alluvionali e al piede dei versanti è presente una copertura eluvio-colluviale a matrice limoso-argillosa (unità 7) in parte derivata da frane antiche (unità 8) con spessore variabile da 2 a 4÷6 m (unità morfologiche di versante). L'unità 7 è costituita da terreni di medio-alta plasticità distinti in tre livelli: argilla con detrito di spessore 0,7÷1,8 m influenzata dalle variazioni stagionali di umidità ( $N_{SPT} < 8$ ) (c1 e c2), argilla con frammenti litoidi sparsi, struttura poliedrica e fessurata ( $9 < N_{SPT} < 16$ ) (c3), substrato alterato ( $17 < N_{SPT} < 30$ ) (Fig. 6, profilo n° 3). La separazione tra i suddetti strati è segnata dalle variazioni di consistenza, di colore, di umidità e di struttura del terreno. Il passaggio al substrato non è in genere netto per la presenza di una fascia di transizione con marne fessurate e parzialmente alterate.

Coltri eluvio-colluviali di minore spessore ricoprono la parte alta dei versanti (9a-b-c-d).

L'unità 3 corrisponde all'unità morfologica di tipo antropico. La composizione dei materiali che la costituiscono (ghiaia, macerie di demolizioni, terriccio) è estremamente variabile sia verticalmente che in orizzontale. Materiali antropici irregolarmente distribuiti sono ugualmente presenti nelle aree urbanizzate e ricoprono parzialmente le unità 4A, 4B e 4C. Tali depositi sono costituiti da materiali eterogenei, provenienti in parte dall'esterno ed in parte dalla stessa area urbana. Ad esempio nell'unità 4C gli strati di riporto (R1 e R2) accumulati in tempi diversi e con spessore complessivo di 3 m circa,

hanno composizione eterogenea, più grossolana alla sommità, medio-fine inferiormente. La massa si presenta poco consolidata e con grado di permeabilità molto variabile (a contatto con i depositi limoso-argillosi alluvionali sono possibili filtrazioni di acqua) (Fig. 6, profilo n° 4).

## 5.2. Caratteristiche idrogeologiche

I livelli ghiaiosi presenti alla base dei depositi alluvionali di fondovalle e nello stesso alveo attivo del T. Staffora hanno una permeabilità medio-alta che favorisce l'infiltrazione e la circolazione dell'acqua negli stessi depositi, con l'instaurazione di una falda di subalveo, alimentata sia dai deflussi in alveo che da quelli laterali (apporti superficiali dai corsi d'acqua tributari e dai versanti; circolazione sotterranea da livelli permeabili del substrato). La potenzialità di questa falda è tuttavia variabile in funzione dello spessore e dell'estensione laterale della coltre alluvionale, delle condizioni del substrato e degli apporti superficiali. L'interpretazione dei dati disponibili di superficie (variazione di portata in alveo, condizioni geomorfologiche) e delle misure piezometriche (pozzi e sondaggi geognostici) e la loro correlazione con il profilo dell'alveo, portano ad ipotizzare una situazione di drenaggio o di quasi equilibrio tra alveo e falda subalvea. Il regime della falda di subalveo è localmente influenzato anche dalla presenza delle opere trasversali (briglie) che in relazione alle condizioni di imposta, alle caratteristiche geometriche e costruttive esercitano una funzione di locale sbarramento, con innalzamento della piezometrica e contestuale sfioro in superficie della medesima (briglia in prossimità del ponte).

L'esistenza nel fondovalle di 6 pozzi per acqua dell'acquedotto, con relative stratigrafie e misure dei livelli statici e dinamici, ha permesso più dettagliate valutazioni sulle falde presenti nelle unità litotecniche descritte. Nell'unità 4B la falda acquifera, di modesta entità ed intercettata da due pozzi dell'acquedotto, è alimentata in parte dalla conoide del T. Reganzo ed in parte dalle acque di subalveo del T. Staffora (Fig. 6, profilo n° 3).

Nell'unità 2, a valle della confluenza del T. Lella, sono presenti più falde; la più profonda delle quali ha soggiacenza maggiore di 3 m ed è utilizzata dai pozzi dell'acquedotto (Fig. 6, profilo n° 2).

I depositi alluvionali più antichi (unità 5) sono sede di falde idriche laterali, sopraelevate rispetto a quella di subalveo. Esse sono di entità modesta per il limitato spessore dello strato alluvionale permeabile ed in parte a carattere stagionale. Sono inoltre parzialmente drenate dalle incisioni trasversali al T. Staffora ed in parte versano direttamente le loro acque sulle scarpate frontali dei terrazzi che le ospitano. La falda acquifera superficiale è impostata nell'orizzonte ghiaioso e presenta un livello piezometrico generalmente inferiore ai 4 m.

Le misure piezometriche eseguite in vecchi pozzi in muratura indicano una maggiore soggiacenza (da 6 a 11 m) della falda acquifera in corrispondenza dei pozzi che raggiungono profondità da 10 m a 17 m e che quindi penetrano probabilmente nel substrato.

L'idrogeologia dell'unità 7 è caratterizzata da una modesta ed irregolare falda acquifera per lo più a carattere stagionale con flusso sub-parallelo al pendio, alimentato principalmente dalle acque di precipitazione e

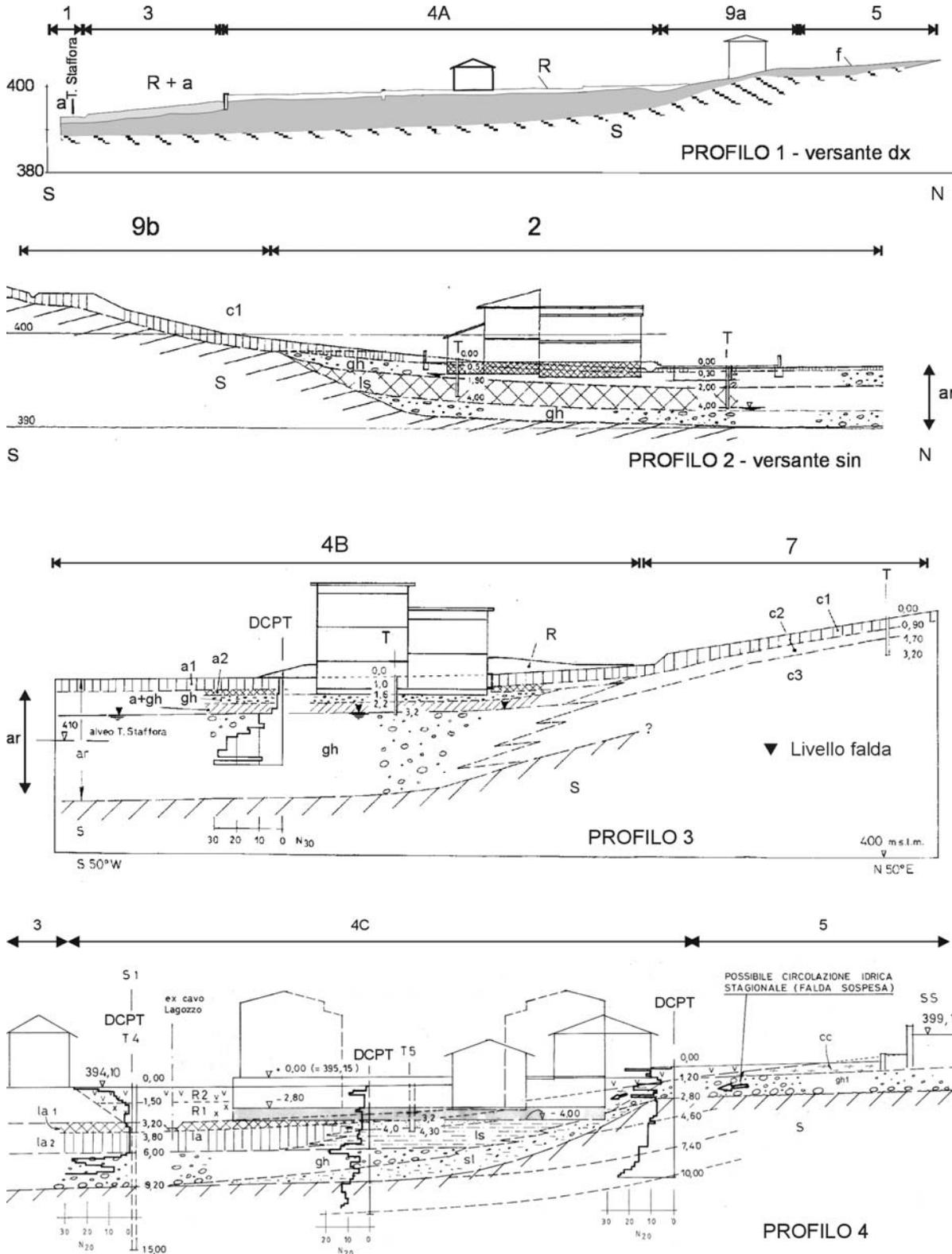


Fig. 6 - Profili geotecnici relativi alle unità morfo-litotecniche 1, 2, 4A, 4B, 4C, 5 e 7. Riporto R: materiale eterogeneo (detriti, macerie di demolizioni, terriccio) antico (1) e recente (2), poco consistente. Depositi alluvionali: a: alluvioni attuali; ar: alluvioni recenti; f: alluvioni antiche; gh1: ghiaia e ciottoli prevalentemente calcarei con limo; gh: ghiaia e ciottoli con frazione limoso-sabbiosa in percentuale variabile; ls: limi sabbiosi e limi argillosi; a1: argilla soggetta a variazioni stagionali di umidità; a2: argilla leggermente sovraconsolidata per essiccamento; a+gh: argilla limosa con ghiaia. Depositi alluvio-colluviali: la: limo argilloso grigio-bruno, consistente nella parte superiore (la1); prevalenza di limi sabbiosi (ls), sabbie medio-fini (sl) miste a ghiaia, mediamente addensate. Depositi eluvio-colluviali c: c1: limo argilloso soggetto alle variazioni stagionali di umidità; c2: argilla limosa con frammenti marnoso-calcarei; c3: argilla limosa con frammenti marnoso-calcarei consolidata; cc: argilla di media consistenza. Substrato S: substrato marnoso-argilloso di colore grigio-scuro, sovraconsolidato.

Geotechnical profiles. Artificial ground R: heterogeneous material (debris, building rubble, soil) old (1) and recent (soft) (2). Alluvial deposits: a: riverbed; ar: recent alluvium; f: old alluvium; gh1: silty gravels and cobbles; gh: slightly to very silty/sandy gravels and cobbles; ls: sandy silt and clayey silt; a1: clay with volume change; a2: overconsolidated clay; a+gh: silty clay with gravel. Alluvial-colluvial deposits: la: brown gray clayey silt, firm in the upper part (la1); sandy silt (ls), slightly gravelly medium to fine sand (sl) medium dense. Colluvial deposits c: c1: clayey silt with swelling/shrinking phenomena; c2: silty clay with marly-calcareous boulders; c3: consolidated silty clay with marly-calcareous boulders; cc: firm clay. Bedrock S: dark gray marly clay bedrock, overconsolidated.

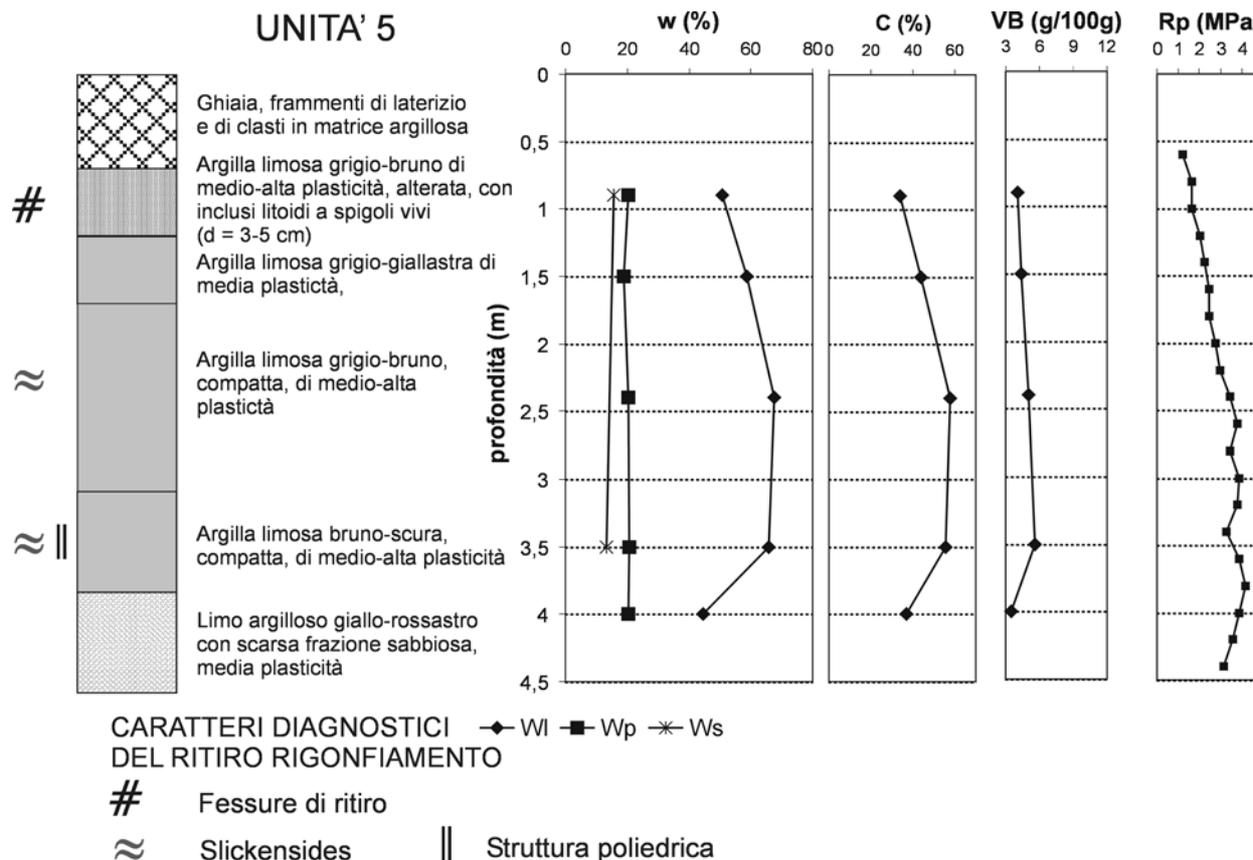


Fig. 7 - Distribuzione con la profondità delle caratteristiche fisico-meccaniche dell'unità morfo-litotecnica 5. WI: limite di liquidità; Wp: limite di plasticità; Ws: limite di ritiro; C: frazione argillosa; VB: valore al blu di metilene; Rp: resistenza alla punta.

Physical-mechanical characteristics trend with depth of the 5 morpho-engineering geological unit. WI: liquid limit; Wp: plastic limit; Ws: shrinkage limit; VB: value of blue; Rp: tip resistance.

anche dalla circolazione idrica nelle intercalazioni calcareo-marnose del substrato (zona ad Est Rio Reponete Superiore), con soggiacenza variabile da 4,5 a 5,3 m.

**5.3. Caratteristiche geotecniche**

Per ogni unità morfo-litotecnica il profilo stratigrafico è stato suddiviso in strati, in funzione della diversa resistenza alla penetrazione (intervalli di profondità all'interno dei quali i terreni presentano valori di N omogenei) (Fig. 8).

I profili evidenziano una grande eterogeneità geotecnica, particolarmente pronunciata per le unità 4B e 5. La presenza di strati ghiaiosi addensati o dello stesso substrato determina un incremento della resistenza alla penetrazione sulla verticale, dall'alto al basso (unità 4A, 5, 9a), in altri casi tale incremento è molto meno evidente per il minore addensamento degli strati ghiaiosi e la minore consistenza di quelli coesivi. Il passaggio da orizzonti coesivi a strati ghiaiosi sotto falda acquifera è talora segnato da una diminuzione del numero di colpi (livelli limoso-sabbiosi meno addensati nelle unità 4B e 5).

Le unità morfo-litotecniche, con strato coesivo affiorante o subaffiorante di spessore maggiore o uguale a 3 m, sono caratterizzate da resistenze penetrometriche generalmente crescenti sulla verticale, da 2 a 26

N<sub>SPT</sub>. In tale tendenza si evidenziano incrementi locali di resistenza riferibili a livelli decimetrici/metrici maggiormente consolidati per essiccamento (zona superiore), o per oscillazione della falda acquifera (zona intermedia) o alla presenza di frazione detritica nella matrice argillosa.

La profondità della zona attiva nei depositi limoso-argillosi è stata stimata sulla base dei seguenti dati: valori di soggiacenza minimi e massimi della falda; prove penetrometriche dinamiche continue eseguite in terreni omogenei in periodi diversi (secchi e umidi) (un disseccamento del terreno comporta un aumento di resistenza del terreno e di conseguenza del numero di colpi); strutture pedologiche rilevate nel corso dell'esecuzione di trincee esplorative, quali la presenza e la profondità di fessure di ritiro e di slickensides; misura della suzione matriciale. La zona attiva, così verificata presenta uno spessore variabile da 0,8 a 1,8 m (Tab. 1).

I risultati sperimentali di laboratorio sono limitati ai terreni a prevalente composizione argillosa delle unità 4C, 5, 8 e 9 (Tab. 2), per i quali il numero di colpi N30 risulta in genere inferiore a 10. Si tratta di argille limose e limi argillosi di medio-alta plasticità, con un contenuto in acqua naturale appena superiore al limite plastico. L'unità 5 ha caratteristiche geotecniche molto variabili, che riflettono l'eterogeneità litologica già precedentemente descritta (Tab. 2). Nell'unità 7 la composizione

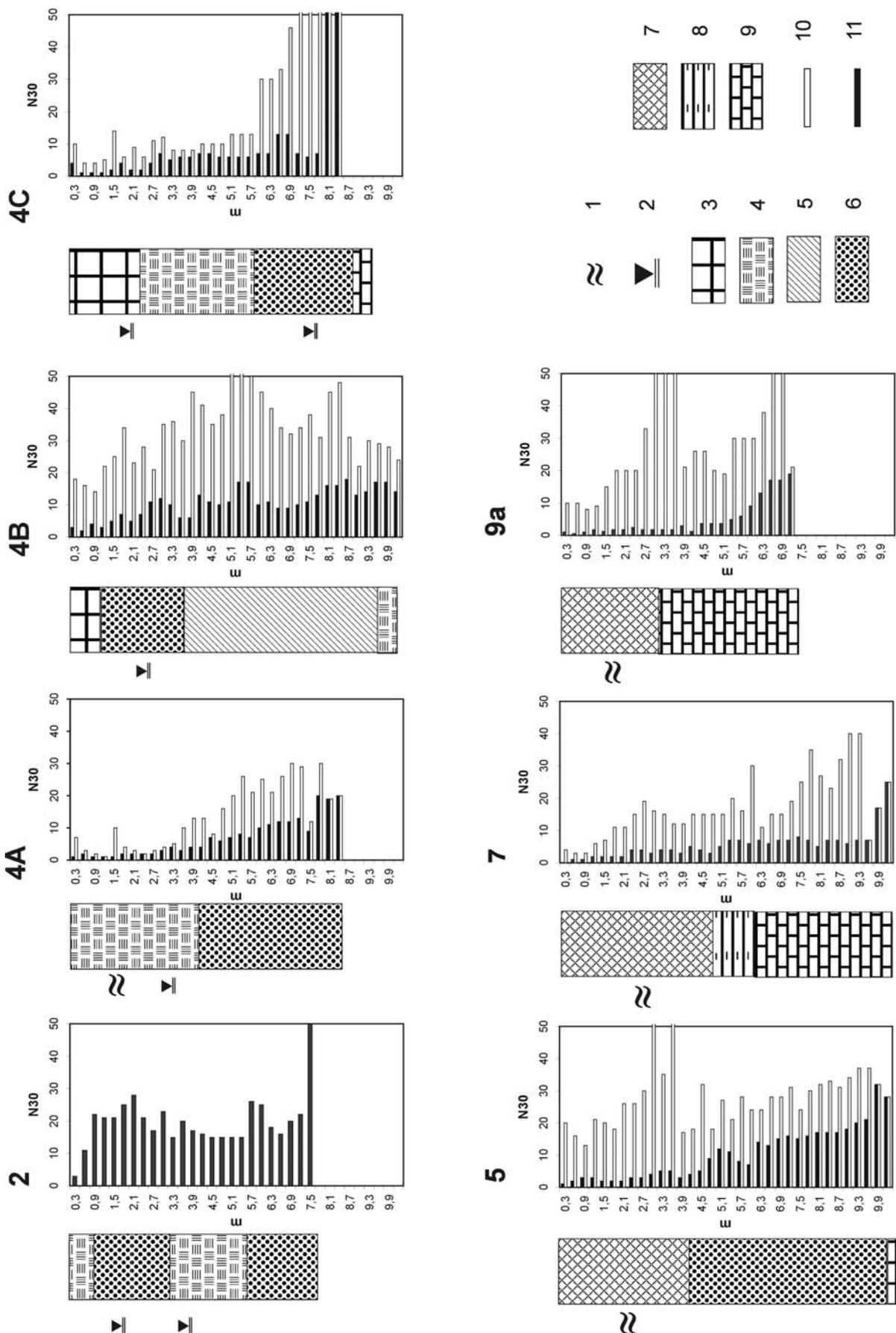


Fig. 8 - Profili penetrometrici e corrispondenti stratigrafie: range di variazione di  $N_{30}$  per unità morfo-litotecnica. 1: caratteri diagnostici del ritiro-rigonfiamento, presenza di facce di pressione e di scivolamento, sovraconsolidazione per essiccamento, fessure da ritiro; 2: livello falda acquifera; 3: materiale di riporto; 4: limo argilloso, argilla limosa; 5: ghiaia con intercalazioni limoso-argillose; 6: ghiaia in matrice argillosa-limosa; 7: argilla con frammenti litoidi; 8: substrato alterato; 9: substrato mamoso; 10: n° di colpi massimo; 11: n° di colpi minimo. Penetrometric profiles and stratigraphies: range of  $N_{30}$  for each morpho-engineering terrain unit. 1: diagnostic characteristics of swelling-shrinkage, cracking, slickensides; overconsolidation due to desiccation; 2: ground water level; 3: artificial ground; 4: clayey silt, silty clay; 5: gravel with clay and silt interbedded; 6: gravel within a silty clay matrix; 7: clay with boulders; 8: weathered bedrock; 9: marly bedrock; 10: max number of penetrometer blows; 11: min number of penetrometer blows.

Tabella 2 - Principali parametri fisico-meccanici delle unità morfo-litotecniche argillose unità 4C, 5, 7, 8, 9. WI: limite di liquidità; IP: indice plastico; C: frazione argillosa; VB: valore al blu; w: contenuto in acqua naturale;  $\gamma_d$ : densità secca; Sr: grado di saturazione.  
 Main physical-mechanical parameters of the morpho-engineering geological units. WI: liquid limit; IP: plasticity index; C: clay content; VB: value of blue; w: natural water content;  $\gamma_d$ : dry density; Sr: saturation degree.

UNITA'	WI	IP	C (%)	VB (g/100g)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Sr (%)
4C	69	48	-	-	25,9	1,58	98,8
5	33-84	18-61	34-58	2,58-8,98	21,9-35,7	1,32-1,66	88-100
8	59-64	34-43	29-63	-	-	1,19-1,67	65-98
9a-9b	57-69	37-49	32-56	5,6-6,08	-	1,5-1,68	80-100

granulometrica dei terreni esaminati (presenza in molti casi di blocchi eterometrici) ha reso difficile il campionamento e comunque poco significative le misure sperimentali di laboratorio.

Secondo il metodo proposto da WILLIAMS & DONALDSON (1980) le unità 5, 8 e 9a-b presentano un potenziale di rigonfiamento da alto a molto alto (Fig. 9), evidenziato anche dagli elevati valori al blu di metilene.

Le prove di rigonfiamento all'edometro eseguite su campioni naturali delle unità 5 e 9a-b, in condizioni di saturazione e con densità secca variabile da 13,0 a 16,6 kN/m<sup>3</sup>, hanno misurato delle variazioni di volume comprese tra 0,7 e 1,6 % e una pressione di rigonfiamento da 97 a 273 kPa. Al fine di determinare la massima variazione di volume che i terreni possono sviluppare, le medesime prove sono state eseguite su campioni ricostituiti con un'umidità pari al limite di ritiro; i valori misurati (>=25%) riflettono l'elevata predisposizione al rigonfiamento (Fig. 10).

La variazione delle proprietà fisiche e meccaniche nello strato argilloso superiore, campionato ed esaminato in laboratorio, presenta una buona correlazione con il diagramma di resistenza alla penetrazione misurato

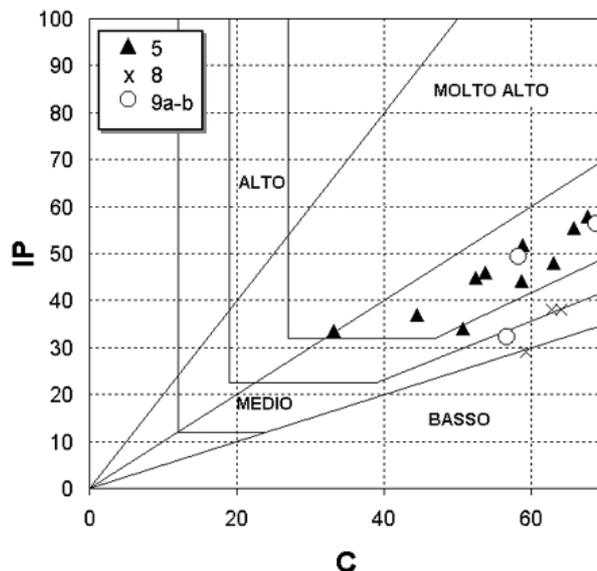


Fig. 9 - Carta di attività modificata (WILLIAMS & DOLDSON, 1980). Activity modified chart.

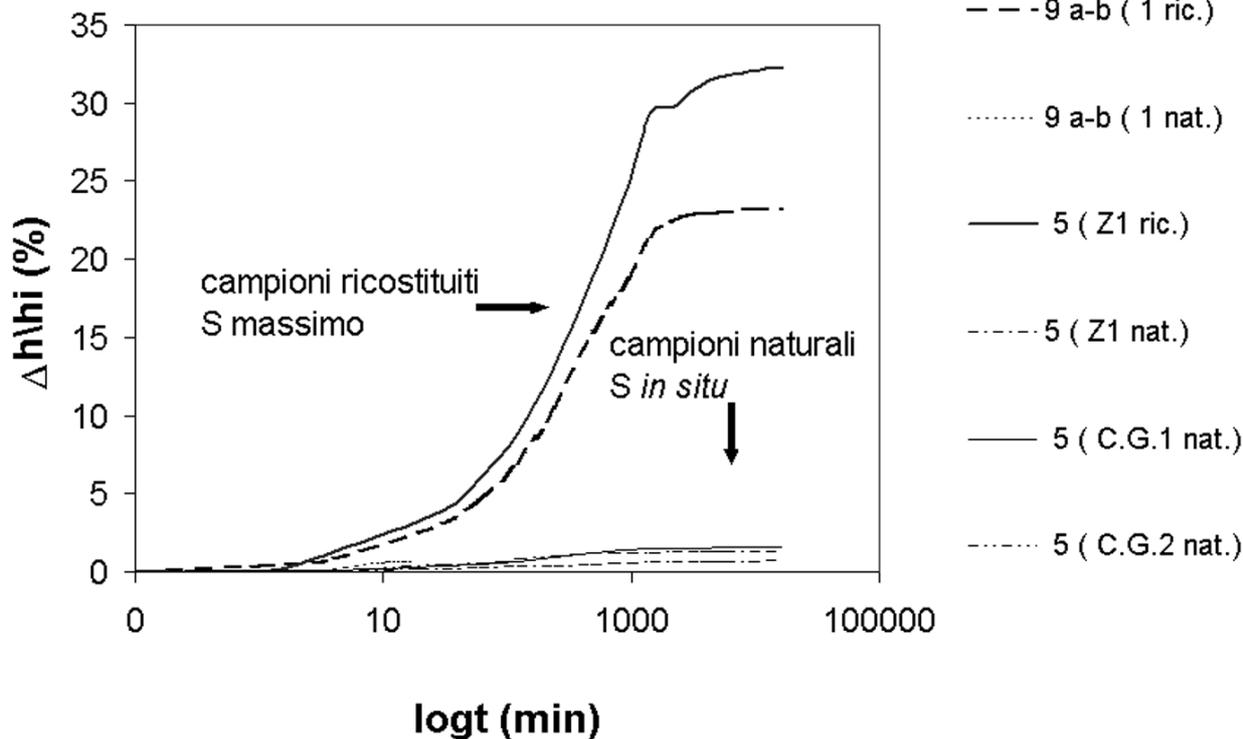


Fig. 10 - Variazione percentuale di volume. Swelling strain.

per lo stesso deposito con prove penetrometriche dinamiche e statiche. In particolare queste ultime mostrano un maggiore grado di definizione e di dettaglio nel rilevare orizzonti differenziati, alla pari dei risultati sperimentali puntuali distribuiti sulla verticale (Fig. 7).

## 6. VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ AL RITIRO-RIGONFIAMENTO

Ogni unità morfo-litotecnica, precedentemente descritta, è individuata da specifiche caratteristiche lito-stratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche, che presentano i fattori predisponenti il fenomeno di ritiro-rigonfiamento nell'area di studio (Tab. 3). Al fine della valutazione della suscettibilità alle variazioni di volume, ad ogni fattore è stato assegnato un peso in funzione della sua importanza nel determinare il ritiro e/o il rigonfiamento del terreno. La suscettibilità è stata calcolata come sommatoria dei pesi dei vari fattori. I valori ottenuti sono stati successivamente riclassificati in quattro classi qualitative (suscettibilità bassa, media, alta, molto alta) (Tab. 3).

Presentano una suscettibilità alta e molto alta al ritiro-rigonfiamento le unità caratterizzate da una copertura alluvionale o eluvio-colluviale prevalentemente argillosa sovrastante strati ghiaiosi (unità 4A, 5) o direttamente a contatto con il substrato marnoso-argilloso (unità 7, 8 e 9a-b). In questa associazione di unità morfo-litotecniche, che interessa il 52% dell'area stu-

diata, può rientrare anche l'unità 4C, nelle situazioni in cui lo spessore del riporto è inferiore allo spessore della zona attiva.

La suscettibilità di tali depositi al ritiro-rigonfiamento è confermata, oltre che dai risultati sperimentali di laboratorio, dalle strutture presenti nel terreno (fessure subverticali da ritiro, superfici di pressione e di scivolamento), che testimoniano lo sviluppo del fenomeno anche in tempi geologici, e dalla distribuzione degli edifici lesionati.

I fabbricati dissestati sono ubicati su pendio con quote diverse di fondazione, in relazione alla forma in pianta, alla presenza di cantinati e di riporti sul lato valle. Le strutture portanti sono prevalentemente in muratura. Gli edifici hanno due o più piani fuori terra, con presenza di cantina o di seminterrati. Le fondazioni sono di tipo diretto continuo, generalmente in muratura (meno frequentemente in calcestruzzo), con profondità di posa variabile da 0,5 a 3 m in funzione della morfologia del pendio e della presenza o meno di piani interrati totali o parziali. La maggior parte degli edifici ricadono nelle unità 7 e 8 (17 e 24 edifici/km<sup>2</sup> rispettivamente). Nel primo caso le lesioni, registrate in evoluzione nel 1989-1991, appaiono connesse prevalentemente a fenomeni di ritiro del terreno argilloso. Nel secondo caso il dissesto sembrerebbe connesso per lo più a frane. Tuttavia il fenomeno di ritiro-rigonfiamento interessa anche le coperture argillose coinvolte da movimenti di versante. In questi terreni, normalmente poco permeabili o impermeabili, la fessurazione indotta dal-

Tabella 3 - Fattori e pesi scelti per la valutazione della suscettibilità SC al ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi. Classi di suscettibilità: B: bassa; M: media; A: alta; MA: molto alta.

Factors and weights used for the swelling-shrinking soil susceptibility (SC) assessment. Susceptibility classes: B: low; M: medium; A: high; MA: very high.

CRITERI UTILIZZATI PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ AL RITIRO-RIGONFIAMENTO																							
UNITÀ	LITOLOGIA				CONDIZIONI GEOMETRICHE			SPESSORE ARGILLA LIMO (cm)				SOGGIACENZA DELLA FALDA (m)			DRENAGGIO			ZONA ATTIVA (m)			SC		
	argilla e limo	argilla e limo con inclusi lapidei	ghiaia in matrice argilloso-limosa	ghiaia e sabbia	argilla e limo in intercalazioni (non predominanti)	argilla e limo in intercalazioni (predominanti)	argilla e limo continui	< = 50	50-100	100-200	>200	>10	4 < d < = 10	2 < d < = 4	d < 2	basso	mediocre	buono	< 0,5	0,5 - 1		1 - 2.	> 2 m
1				1		1,5		1							2			1	-	-	-	-	B
2				1		1,5				1,7					1,6		1,5		1				M
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4A	2						2				2				1,6					1,3			MA
4B			1,3		1			1							1,6			1	-	-	-	-	B
4C	2						2				2				1,6						1,6		MA
5		1,5					2				2				1,6					1,3			A
6			1,3		1				1,3			-	-	-			1,5		-	-	-	-	B
7		1,5					2				2	-	-	-	2		1,5				1,6		MA
8		1,5					2				2	-	-	-		2			-	-	-	-	MA
9a		1,5					2			1,7		-	-	-			1,5			1,3			A
9b		1,5					2			1,7		-	-	-			1,5			1,3			A
9c		1,5					2				2	-	-	-			1,5			1,3			MA
9d	2				1				1,3			-	-	-			1,5			-	-	-	M

l'essiccamento (ritiro) favorisce all'arrivo delle piogge, dopo un periodo siccitoso prolungato, un elevato assorbimento di acqua nello strato superficiale. Tale fenomeno, ripetuto nel tempo con cicli stagionali, determina la deformazione e l'instabilità per scivolamento della massa argillosa (rigonfiamento per saturazione, formazione di superfici di taglio e instaurazione di pressioni neutre elevate nelle fessure e nei pori).

Ai fini delle problematiche di fondazione si individua anche un secondo gruppo di unità morfo-litotecniche costituito dalle unità 2 e 4B, con un'estensione pari al 8 % della superficie di indagine, non soggetto al fenomeno di ritiro-rigonfiamento. Esso è caratterizzato da un orizzonte superiore ghiaioso piuttosto eterogeneo e di spessore 2 – 2,5 m, giacente su strati limoso-argillosi compatti, sotto una debole copertura limoso-argillosa o di riporto.

## 7. CONCLUSIONI

La disponibilità di una cospicua mole di dati, ha permesso in un'area urbana a geologia complessa con prevalenza di coperture quaternarie ("formazioni superficiali"), la definizione di un quadro conoscitivo di dettaglio dei depositi alluvionali, eluvio-colluviali ed antropici, generalmente descritti in maniera indifferenziata.

L'indagine geologico-technica, rappresentata nelle diverse fasi operative, ha consentito di individuare più unità morfo-litotecniche, ciascuna delle quali definite da caratteristiche geomorfologiche, litostratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche relativamente omogenee. Un ulteriore sintesi ha permesso di raggruppare le suddette unità in associazioni caratterizzate da specifiche problematiche geologico-tecniche riconducibili ai seguenti schemi:

1. strato argilloso di spessore 3-5 m con elevata suscettibilità al ritiro-rigonfiamento su orizzonte ghiaioso addensato o sullo stesso substrato marnoso (unità 4A, 5, 7, 8, 9a e 4C). Le proprietà geotecniche sono generalmente crescenti con la profondità, pur presentando locali riduzioni riferibili a livelletti meno consolidati o a composizione limoso sabbiosa ed incrementi in livelli induriti da essiccamento o da oscillazione della falda acquifera o contenenti una frazione detritica nella matrice argillosa;
2. strato ghiaioso eterogeneo di spessore 2-2,5 m, su orizzonte limoso-argilloso, talora con ghiaia, compatto e di spessore da 2 a 6 m (unità 2 e 4B).

La carta delle unità morfo-litotecniche costituisce il supporto preliminare per affrontare problematiche applicative, tra le quali anche lo studio della suscettibilità al ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi, causa di numerose lesioni agli edifici dell'area. Essa è utile anche per identificare le aree problematiche che richiedono studi di dettaglio (es. unità 4A, 4C, 5 e 7).

Lo studio, condotto nell'abitato di Varzi, ha evidenziato le seguenti problematiche:

- assenza di carte delle "formazioni superficiali" (generalmente non rilevate nelle carte geologiche di "vecchia generazione"), con terminologie (nomenclature stratigrafiche standard) e classificazioni facilmente comprensibili anche per i non addetti ai lavori;
- nelle aree urbane le "formazioni superficiali" sono soggette alle trasformazioni antropiche e di conse-

guenza sarebbe auspicabile poter disporre anche di una classificazione dei depositi di natura antropica;

- i processi genetici (geologici e geomorfologici), che sono causa della formazione di terreni problematici, quali quelli soggetti a variazione di volume, possono modificare ed influenzare le caratteristiche geologico-tecniche degli stessi; il loro studio appare di conseguenza di primaria importanza per le applicazioni geologico-tecniche.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano la Regione Lombardia – Sede Territoriale di Pavia (STER), in particolar modo l'Ing. Malaspina e il Geom. Bartilucci, per i dati messi a disposizione relativi alle indagini geognostiche effettuate (studi geologici riguardanti gli interventi edilizi in territorio classificato sismico) e agli edifici lesionati nel comune di Varzi.

## BIBLIOGRAFIA

- AFNOR (1995) - *Essai de gonflement a l'oedometre* - Norme française homologuée, XP P94-060-1.
- AFNOR (1998) - *Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse) détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai a la tache* - Norme française homologuée, NF P94-068.
- AHMAD N. & MERMUT A. (eds.) (1996) - *Vertisols and technologies for their management* - Developments in soil science, 24, 566, Elsevier Science Ltd.
- BEATRIZZOTTI G., BELLINZONA G., BELTRAMI G., BONI A., BRAGA G., MARCHETTI G., MOSNA, S. (1969) - *Geological map of Italy Fg. 71 - Voghera (2nd Ed)* - Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- BELL F.G. & BRUYN I.A. (1997) - *Sensitive, expansive, dispersive and collapsive soils*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, **56**, pp. 19-38.
- BRAGA G., BRASCHI G., CALCULLI S., CAUCIA F., CERRO A., COLLESELLI F., GRISOLIA M., PICCIO A., ROSSETTI R., SETTI M., SPALATO A., SOGGETTI F., VENIALE F. (1985) - *I fenomeni franosi nell'Oltrepo Pavese: tipologia e cause* - Geologia Applicata e Idrogeologia, **20**, pp.621-666.
- BRE (1996) - *Desiccation in clay soils* - Digest, 412.
- CERRINA FERONI A., OTARIA G., MARTINELLI P., MARTELLI L. 2002 - *Structural geological map of the Emilia Romagna Apennines*. Firenze. SELCA.
- CHANDLER R.J. & GUTIERREZ C.I. (1986) - *The filter paper of suction measurement* - Géotechnique, **36** (2), pp.265-268.
- CHEN F.H. (1988) - *Foundations on expansive soils* - Developments in geotechnical engineering vol.18, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 464 pp.
- DEBATTISTI F. (1996) - *Storia di Varzi* - Guardamagna Editori
- ELLISON R.A., McMILLAN A.A., LOTT G.K. (2002) - *Ground characterisation of the urban environment: a guide to practice* - British Geological Survey Research Report, RR 02-05. ©NERC Copyright 2002 British

- Geological Survey, Nottingham, Contributors: Kessler H., Lawley R.S..
- FITYUS S.G., SMITH D.W., JENNAR A.M. (2000) - *Surface area using methylene blue adsorption as a measure of soil expansivity*. Proc.Int.Conf. on Geotechnical & Geological Engineering Geoeng2000, Melbourne, 19-24 November 2000 (on CD).
- MAGNAN J.P. & YOUSSEFIAN G. (1989) - *Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols* - Bull.Liaison Labo P. et Ch., **159**, pp. 93-104.
- MCMILLAN A.A. & POWELL J.H (1999) - *BGS Rock Classification scheme, Volume 4: Classification of artificial (man-made) ground and natural superficial deposits - applications to geological map and datasets in the UK* - British Geological Survey Research Report, RR 94-04. ©NERC Copyright 1999 British Geological Survey, Nottingham, Contributors: Evans C.D.R., Irving A.A.M., Merritt J.W., Morigi A.N., Northmore K.J.
- MEISINA C. (1998) - *Analisi dei processi evolutivi del T. Staffora* - Proc. Int. Conf. "La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica", Alba 5-7 novembre 1996, **2**, pp. 157-167.
- MOUROUX P., MARGOM P. & PINTÉ J.C. (1988)- *La construction économique sur sols gonflant* - Bureau de Recherches Géologiques et Minières - Manuels et méthodes n.14, Orleans.
- PAGE C.(2003) - *Shrinkable soils in the United Kingdom - An ongoing national disaster* - Int. Conf. On Problematic Soils:29-30 July, 2003, Nottingham, **1**, pp. 73-82.
- ROSENBAUM M.S., MCMILLAN A.A., POWELL J.H., COOPER A.H., CUSHAW M.G. & NORTHMORE K.J. (2003) - *Classification of artificial (man-made) ground* - Engineering Geology, **69**, pp. 399-409.
- SERRATRICE J.F. & SOYEZ B. (1996) - *Les essais de gonflement* - Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées, **204**, pp. 65-85.
- TOURENQ C., & TRAN NGOC LAN (1989). *Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène. Application aux sols, roches et granulats* - Bull. Liaison Labo P. et Ch., **159**, pp. 79-92.
- WILLIAMS A.B., & DONALDSON G.W. (1980) - *Developments relating to Building on expansive soils in South Africa: 1973-1980* - Proc. 4th Int. Conf. on Exp. Soils, Denver, **2**, pp. 834-844.

Ms. ricevuto l'11 maggio 2004  
 Testo definitivo ricevuto il 30 novembre 2004

Ms. received: May 11, 2004  
 Final text received: November 30, 2004