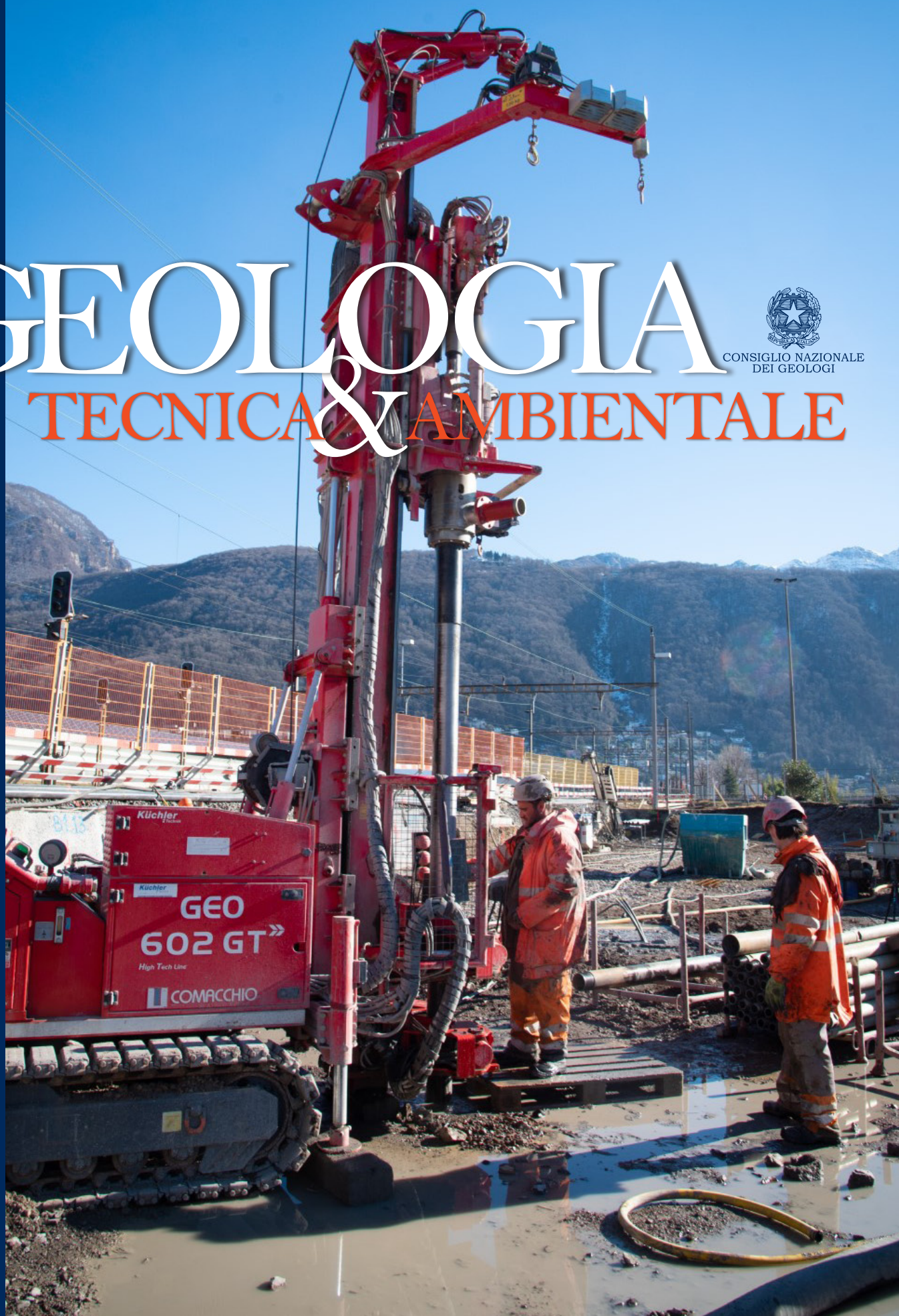


GEOLOGIA

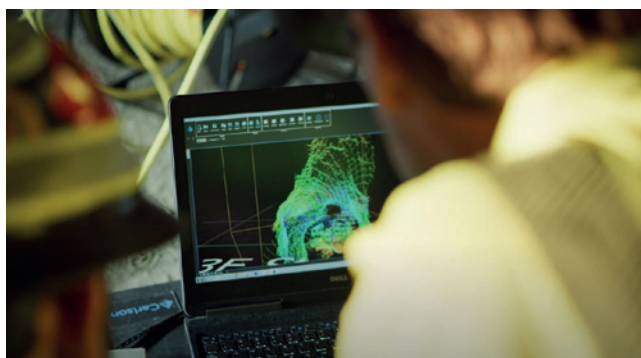
TECNICA & AMBIENTALE



CONSIGLIO NAZIONALE
DEI GEOLOGI



Sottocontrollo



Laser Scanner da foro rileva sinkhole e doline, e mappa in sicurezza cavità sotterranee pericolose.

Tecnologie per:

monitoraggio ambientale

- > frane, argini, cedimenti o smottamenti
- > rilievo di fondali, fiumi e bacini
- > scansione di cavità minerarie o luoghi di estrazione

mappatura 3D del sottosuolo

- > rilievi rapidi dei sottoservizi
- > tecnologia 3D Step Frequency per rilievi di dettaglio a velocità elevate

archeologia

- > indagini archeologiche e pre-scavo
- > rilievo di strutture sotterranee e sommerse



Codevintec rappresenta anche:



CODEVINTEC

Tecnologie per le Scienze della Terra e del Mare

tel. +39 02 4830.2175 | info@codevintec.it | www.codevintec.it

La sicurezza di grandi performance su ogni terreno.

G E O



Solidità, affidabilità, sicurezza e tutela dell'ambiente sono racchiuse in un design flessibile che rende queste perforatrici in grado di eseguire molteplici indagini e prove, garantendo la massima precisione con un'elevata semplicità di utilizzo. La nostra idea di innovazione scende in profondità per garantirti le migliori prestazioni.

Guarda il video:
Deep Innovators
at work.



COMACCHIO
DRILLING HI-TECH



CTD Logger multiparametrico (conducibilità, temperatura, pressione)

- Precisione / scala di conducibilità del sensore:
 $\pm 1\%$ max. / 0,2...200 mS/cm
- Precisione / sensore Pt1000 per monitorare la temperatura:
 $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ / -10...40 $^{\circ}\text{C}$
- Precisione / campo di pressione (profondità):
 $\pm 0,02\%$ FS max. / 5...200 m
- Applicazioni:
monitoraggio della qualità dell'acqua e del livello



Competenza nella idrologia

Unità di trasmissione dati a distanza GSM

- Logger multiparametrico
- Trasmissione dei dati via e-mail, FTP oppure SMS
- Multifunzionale
- Durata della batteria fino a 10 anni
- Facilità d'installazione
- Software incluso

Logger di pressione e temperatura

- Autonomo
- Di facile uso
- Durata della batteria fino a 10 anni
- Applicazioni:
 - Acqua dolce
 - Acqua salata
 - Acqua sporca
- Ottenibile in acciaio Inox, Hastelloy oppure in Titanio



MISURE DI LIVELLO

FREATIMETRI PER MISURE DI LIVELLO, TEMPERATURA, CONDUCIBILITÀ. INTERFACCE ACQUA OLIO.



NOVITÀ
FREATIMETRO
A ULTRASUONI



Una gamma completa di strumentazione di qualità per le misure di livello, dai freatimetri tradizionali o a ultrasuoni, ai misuratori di interfaccia acqua-olio per pozzi, piezometri, cisterne, ecc.

Interface Meter ATEX 122 e 122 Mini, per la determinazione di LNAPL e DNAPL.

Freatimetri

- 101 P7 con nastro piatto fino a 1.500 m in PVDF marcato al laser ogni mm e 101 P2 con nastro in Polietilene fino a 300 m marcato a caldo.
- 107 TLC per profilazione di Temperatura e Conduttività fino a 300 m.
- 201 per profilazione della Temperatura fino a 600 m di profondità e 125° C.

- 101D Drow-down meter con modalità abbassamento per facilitare i test di pompaggio.
- 102 e 102 Mini con cavo coassiale e sonda da 4 o 10 mm per piezometri di piccolo diametro o con strozzature.
- 101B compatto ed economico.
- 105 per rilevare incamicatura metallica e fondo pozzo.
- 104 a ultrasuoni per misure di livello da 3 a 600 metri anche in presenza di ostruzioni, senza l'inserimento di sonde in pozzo.

Scandaglio 103 Tag Line per lo sviluppo dei pozzi e per il posizionamento di precisione di strumenti e attrezzature.

Da sempre impegnati nell'offrire le soluzioni tecnologiche più avanzate e affidabili per misure e monitoraggio di livello, campionamenti low-flow e indisturbati, analisi qualitative delle acque sotterranee o di superficie. Abbiamo selezionato i migliori prodotti disponibili sul mercato internazionale per soddisfare le esigenze dei professionisti del settore.



**DATALOGGER
E TELEMETRIE**



**CAMPIONAMENTO
LOW-FLOW**



**PROFILAZIONE
MULTILIVELLO**



**BONIFICA
IDROCARBURI**

Solinst®

DISTRIBUTORI UFFICIALI PER L'ITALIA E RIVENDITORI PER CROAZIA, SLOVENIA E SVIZZERA DEI PRODOTTI SOLINST®

Una partnership di successo che dura da oltre trent'anni.

EGEO[®] +lab

WWW.EGEO.LAB.IT

GRUPPO EGEO S.R.L. | VIA OVIDIO, 11 - 20026 NOVATE MILANESE (MI) | TEL. +39 02 36 577 830 | EMAIL: EGEO@EGEO.LAB.IT



Maiori (SA) Cala Bellavaia*

Cardine Srl si occupa di interventi strutturali previsti dal PNRR, nell'ambito 'Tutela del territorio e della risorsa idrica' per la gestione del rischio di alluvione e per la riduzione del rischio idrogeologico.



Cardine Srl effettua lavori di messa in sicurezza da frane ed esondazioni, focalizzati alla tutela del territorio, sulla riqualificazione, prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico.



CARDINE SRL

LAVORI IN QUOTA
DISSESTO IDROGEOLOGICO

via Fangarielli, 5 – 84131 SALERNO
Tel. 089/301932 - E-mail: info@cardinesrl.it
www.cardinesrl.it

*Cardine Srl si è occupata della messa in sicurezza del litorale durante le riprese del film Warner Bros 'Tenet'.

Quadrimestrale dell'Ordine Nazionale dei Geologi
N. 1/2022

DIRETTORE RESPONSABILE

Alessandro Reina

CO-DIRETTORI

Domenico Angelone

Rudi Ruggeri

COMITATO DI REDAZIONE

Arcangelo Francesco Violo, Filippo Cappotto, Domenico Angelone, Lorenzo Benedetto, Alessandra Biserna, Giovanni Capulli, Emanuele Emami, Daniele Mercuri, Mario Nonne, Rudi Ruggeri, Domenico Sessa, Paolo Spagna, Fabio Tortorici, Roberto Troncarelli, Valentina Casolini

COMITATO SCIENTIFICO

Eros Aiello, Vincenzo Simeone, Guido Giordano, Antonio Martini, Giulio Iovine, Claudio Mariotti, Sergio Castenetto, Sergio Rusi, Ezio Crestaz, Alfredo Degiovanni, Francesco Maria Guadagno, Paolo Fabbri, Rocco Dominici, Domenico Guida, Tiziana Apuani, Elisabetta Erba, Alessandro Conticelli, Nicola Casagli, Rinaldo Genevois, Gilberto Panebianchi, Silvia Castellaro, Floriana Pergalani, Vincenzo Morra, Silvia Fabbrocino, Gabriele Scarascia Mugnozza, Massimiliano Imperato, Vincenzo Tripodi

SEGRETERIA DI REDAZIONE

Marina Berardi | segreteriaapc@cngeologi.it

DIREZIONE, REDAZIONE, AMMINISTRAZIONE

Consiglio Nazionale dei Geologi

Via Vittoria Colonna, 40 - 00193 Roma

Tel. 06.68807736 / 06.68807737 - Fax 06.68807742

SITO INTERNET

www.cngeologi.it

UFFICIO STAMPA

addebtostampa@cngeologi.it

PUBBLICITÀ

Agicom srl

Viale Caduti in Guerra, 28 - 00060 Castelnuovo di Porto (Roma)

Tel 06.9078285 Fax 06.9079256

agicom@agicom.it

www.agicom.it

GRAFICA E IMPAGINAZIONE

Agicom srl

Immagini: ©shutterstock.com

STAMPA

Stampa digitale

Iscritto al Registro degli Operatori di Comunicazione (ROC) al n. 4768. Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 55 del 5 febbraio 1986.

Questa rivista è disponibile online:

sfogliabile o scaricabile in formato PDF su cngceologi.it

È inoltre disponibile su App Store o Play Store scaricando l'App dedicata.

La comunicazione di uscita del nuovo numero viene inviata per email a tutti gli iscritti.

La rivista ha una distribuzione cartacea destinata agli Ordini Regionali e ad un numero selezionato di indirizzi istituzionali.

L'Autore dell'articolo è responsabile di quanto in esso contenuto, delle autorizzazioni alla pubblicazione di figure, tabelle, ecc., dei riferimenti e strumentazioni.

Associato all'USPI, Unione Stampa Periodica Italiana.

GARANZIA DI RISERVATEZZA

L'editore garantisce la massima riservatezza dei dati forniti dagli abbonati e la possibilità di richiedere gratuitamente la rettifica o la cancellazione, scrivendo a: Consiglio Nazionale dei Geologi - Via Vittoria Colonna 40, 00193 Roma.

Le informazioni custodite nell'archivio elettronico dell'Editore saranno utilizzate al solo scopo di inviare la rivista o altre comunicazioni concernenti l'abbonamento (D.L. 30/6/2003, n. 196, sulla tutela dei dati personali).

PER GLI AUTORI:

Le Norme di Stampa sono consultabili sul sito cngceologi.it, nell'area Rivista.



IN COPERTINA: foto di Riccardo Quarti per Comacchio S.p.A. Realizzazione di impianto geotermico per la stazione ferroviaria di Melide, in Canton Ticino

9

l'editoriale

A. Reina

11

il punto del presidente

A.F. Violo

14

Focus

G. Andiloro

Le acque sotterranee:
salvaguardia e gestione
adattiva della risorsa



19

Risorsa acqua

A. Reina, S. De Carolis

Il sinkhole della città
di Turi: tra storia
e geologia



27

**Dissesti
e alluvioni**

F. Amantia Scuderi

Considerazioni sulle
correlazioni tra Nspt
ed angolo di attrito
interno



43

Risorsa acqua

U. Chiocchini,
G. Savarese, L. Seidenari

L'approvvigionamento
di acqua e il
funzionamento
delle Terme Taurine,
Civitavecchia,
Italia centrale





Surfer

Prendere decisioni consapevoli.
Le potenti funzioni di mappatura, modellazione e analisi di Surfer aiutano a trovare le risposte alle domande più difficili.



Grapher

Ottenere una comprensione completa dei propri dati.
Grapher offre ampie funzionalità di analisi e di rappresentazione grafica.



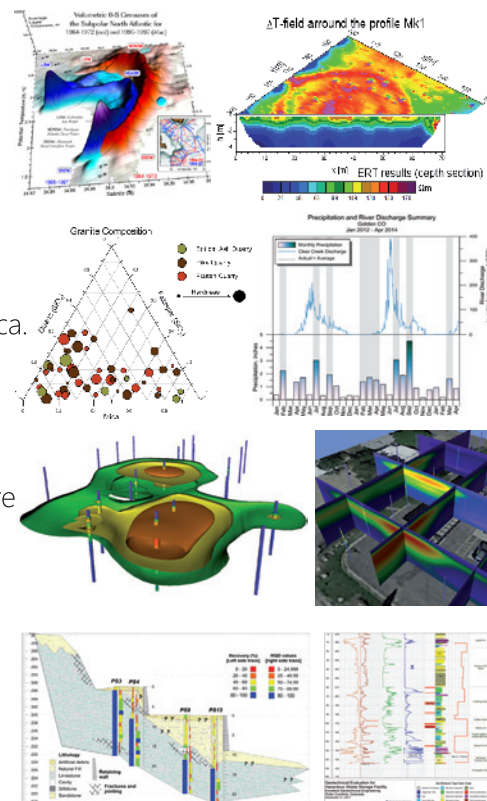
Voxler

Approfondire la conoscenza dei dati tridimensionali.
Utilizzate le potenti capacità di modellazione di Voxler per trasformare i vostri dati in informazioni preziose.



Strater

Eliminare l'incertezza del sottosuolo.
Strater fornisce i mezzi per visualizzare e analizzare i dati del sottosuolo, come pure i registri dei pozzi, i fori di trivellazione e le sezioni trasversali.



ADALTA Rivenditore autorizzato per l'Italia di Golden Software

www.adalta.it/Golden ►



WOLFRAM TECHNOLOGY

LA SOLUZIONE DEFINITIVA PER LA RICERCA E LO SVILUPPO

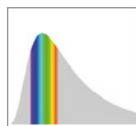
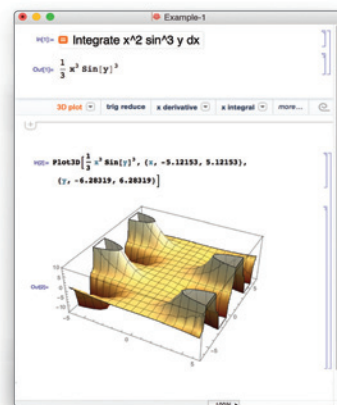
Partecipa ai seminari gratuiti!

La Wolfram Technology offre un ambiente di sviluppo con la piena integrazione della computazione nell'intero flusso di lavoro.

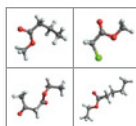
La punta di diamante della tecnologia Wolfram è **Mathematica** che dal 1988 è rinomato per essere il miglior programma al mondo per ogni tipo di calcolo.

Mathematica guida l'utilizzatore dall'idea iniziale fino allo sviluppo di soluzioni che siano individuali o su larga scala.

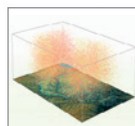
Mathematica integra **la più grande collezione al mondo di algoritmi**, **capacità di calcolo ad alte prestazioni** e **un potente motore di visualizzazione** in un sistema coerente e semplice da usare; ciò rende estremamente intuitivo, veloce ed economico il processo di creazione di modelli di calcolo personalizzati e per questo rappresenta lo strumento ideale per la ricerca di base e applicata in ogni settore.



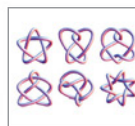
Physics data



Chemical data



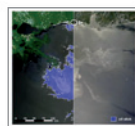
Air Pollution data



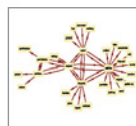
Mathematical data



Geographic data



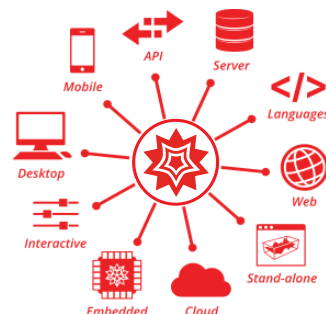
Environmental data



Linguistic data

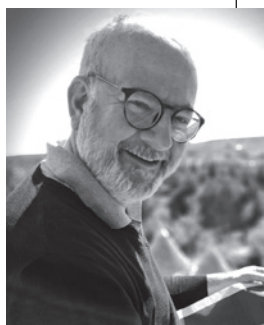
Mathematica ha accesso alle vastissime risorse di conoscenza Wolfram, che includono **dati continuamente aggiornati e gratuiti in migliaia di differenti domini**: fisica, geologia, scienze della terra, chimica, matematica, ecc...Tutti i dati in Mathematica sono immediatamente calcolabili.

Mathematica in versione **OnLine** consente di calcolare, visualizzare, programmare e creare documenti interattivi direttamente nel browser Web; inoltre gli strumenti di collaborazione integrati permettono di condividere i Notebook interattivi con colleghi in tutto il mondo.



ADALTA Distributore unico per l'Italia di Wolfram

www.adalta.it/Wolfram ►



Alessandro Reina

Direttore Responsabile



Nel “libro della risata e dell’oblio” Milan Kundera riporta l’episodio del 21 febbraio 1948, in cui il leader comunista Klement Gottwald salì sul balcone di Palazzo Kinsky a Praga per parlare alle centinaia di migliaia di persone nella Piazza della Città Vecchia. Quello fu uno di quei momenti determinanti nella storia boema. Gottwald era circondato dai suoi compagni e proprio accanto a lui c’era **Vladimir Clementis**. La neve svolazzante era fredda e Gottwald era a capo scoperto. Clementis, sempre così attento, si tolse il cappello di pelliccia e lo mise sulla testa di Gottwald. Anche l’ultimo bambino boemo conosceva quella fotografia che appariva sui manifesti pubblicitari, nei libri di testo delle scuole e nei musei. Quattro anni dopo, però, Clementis fu accusato ingiustamente di tradimento e impiccato. Il dipartimento della propaganda lo ha immediatamente cancellato dalla storia e, ovviamente, da tutte le fotografie. Da allora Gottwald è solo sul balcone. La riflessione sul fatto storico è: ma il berretto sulla testa di Gottwald è stata davvero l’unica cosa rimasta nella storia di Clementis?

Ci sono azioni che scaturiscono da scelte personali, politiche o tecniche, che lasciano un segno indelebile nella storia.

È bene avere la consapevolezza della responsabilità che i geologi possono avere nelle loro scelte professionali: nel determinare la fattibilità di un’opera, nella comunicazione della potenzialità di un dissesto, nel comportamento deontologico e rispettoso nei confronti dei colleghi e/o di altri tecnici.

Tale consapevolezza ha una fortissima ricaduta sulle scelte che possono condizionare l’evoluzione di un contesto naturale o artificiale: si possono lasciare tracce indelebili della propria scelta che permangono visibili anche nel futuro.

Con questo numero abbiamo fatto una scelta che offre una nuova possibilità di fruizione della nostra rivista *Geologia Tecnica e Ambientale*, più moderna, più economica e meglio consultabile.

Il GTA propone una nuova linea editoriale che si combina con le esigenze smart dei giorni nostri: **il giornale conserverà la stampa di un numero limitato di copie ma avrà un formato digitale, consultabile anche attraverso una app sul proprio smartphone. Negli articoli sarà possibile inserire link con quali si visualizzeranno filmati o documenti digitali.** Gli articoli saranno presentati sinteticamente anche in webinar con l’attribuzione di crediti per i colleghi.

In questo primo numero del 2022 si sottopongono all’attenzione dei nostri lettori tre articoli speciali.

La ricerca storica (Reina e De Carolis) ha portato alla conoscenza della **prima testimonianza visiva di un fenomeno di sinkhole verificatosi all’inizio del secolo** scorso nel paese di Turi (BA). L’occasione ha permesso la ricostruzione geologica e idrogeologica del fenomeno.

Un approfondito e suggestivo studio (Chiocchini, Seidenari e Savarese) di carattere archeologico e geo-idrogeologico sulle **Terme Taurine di Civitavecchia** ha permesso di ricostruire le modalità del loro funzionamento, sino a comprendere in termini di quantità e di provenienza delle aree di approvvigionamento idrico.

Nel lavoro di Amantia Scudieri vengono esposti i risultati di uno **studio sulla correlazione tra i risultati delle prove Standard Penetration Test (Nspt) e la resistenza al taglio**, basato su molteplici dati ricavati da indagini in situ ed in laboratorio su terreni incoerenti, effettuati in Nigeria nell’area del delta del Fiume Niger.

Buona lettura.



ACQUISTA SU WATEC.IT

RUGGED TROLL 100

AFFIDABILE. PRATICO. COMPATTO.

La soluzione più economica per misurare e registrare il livello, la pressione e la temperatura dell'acqua.

CORPO IN TITANIO

BATTERIA INTEGRATA

MEMORIA INTEGRATA

ASSOLUTO (NON-VENTED)

ZERO MANUTENZIONE



EURO

399

VALIDO FINO AL
31/07/2022

WATEC.IT
WATER TECHNOLOGY



Arcangelo Francesco Violo

Presidente Consiglio Nazionale dei Geologi

Le grandi strategie del PNRR derivano dagli obiettivi fissati nell'agenda 2030 dell'ONU e fatti propri dalla Commissione Europea nel Green Deal, da cui poi sono derivate le iniziative del Next Generation UE.

Per l'attuazione del Programma sono attualmente disponibili ingenti risorse finanziarie, pari a complessivi 360 miliardi di euro, suddivisi in 230 miliardi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e del Piano Complementare, da impiegare entro il 2026, e 130 miliardi di euro per i fondi strutturali europei della programmazione 2021-2027 ed il Fondo Sviluppo e Coesione (FSC), utilizzabili anche oltre la scadenza del 2026 fissata per il PNRR.

Un'importante occasione di rilancio del Paese e delle politiche di sostenibilità ambientale e sociale, imprescindibile condizione per tutti gli interventi che impattano sul territorio, come espressamente previsto dagli obiettivi principali del Piano, che pongono un'attenzione massima proprio nei confronti di due termini ormai utilizzati quotidianamente: resilienza e sostenibilità.

Il territorio, difatti, costituisce l'ossatura portante, e la "Geologia" - al suo interno - assume un ruolo fondamentale nella pianificazione infrastrutturale, nella gestione delle risorse idriche, nella rigenerazione urbana, nella riqualificazione ambientale e nella mitigazione dei rischi geologici. La "Geologia" indirizza, di fatto, le scelte progettuali.

La crisi energetica attuale, dovuta al conflitto tra Ucraina e Russia, a causa della quale probabilmente ci mancheranno nei prossimi due anni 29 Miliardi di metri cubi di gas, che solo in parte potranno essere sostituiti da approvvigionamenti derivanti da altri paesi, rende ancora più urgente realizzare gli obiettivi che ci ha chiesto l'Europa entro il 2030 in termini di energia prodotta dall' "arcipelago" delle rinnovabili.

Attuare la Transizione Energetica del PNRR vuol dire incrementare di 7-8 volte l'attuale ritmo annuale di installazioni di impianti di produzione di energia rinnovabile, obiettivo che si va a scontrare con la lentezza e la ridondanza delle procedure autorizzative, e delle "resistenze" a vari livelli sull'impiego di alcune forme di approvvigionamento energetico derivante da fonti naturali.

Rispettare i tempi stretti del PNRR vuol dire anche potenziare le strutture tecniche degli Enti che devono

accompagnare gli iter autorizzativi: da un lato occorre accelerare le procedure mediante semplificazioni reali e non solo dichiarate, dall'altro operare evitando gli errori del passato, che sono stati causa di tanti danni ambientali. L'individuazione delle aree idonee in fase di pianificazione e la redazione di progetti esecutivi di qualità, coinvolgono con un approccio multidisciplinare la grande platea dei professionisti tecnici italiani, che necessariamente sono chiamati ad operare in sinergia e con la massima efficienza, tant'è che il sistema ordinistico delle professioni tecniche già da tempo è fortemente impegnato ad aggiornare e formare i propri iscritti su queste tematiche.

Nell'ambito delle energie rinnovabili, la geotermia sta assumendo sempre maggiore importanza nel contesto del rilancio della produzione energetica nazionale, costituendo un'importante fonte energetica alternativa caratterizzata da continuità e programmabilità della produzione ad elevata sostenibilità, sia per i piccoli impianti caratterizzati da un basso gradiente termico che per le centrali rientranti nell'ambito della media ed alta entalpia.

Su questa sfida il CNG si sta impegnando da alcuni anni attraverso la costituzione ed il coordinamento della "Piattaforma Geotermia", uno strumento deputato a fornire proposte e promuovere tale risorsa a livello politico-economico, ponendosi come interlocutore qualificato e privilegiato tra il mondo tecnico scientifico e quello programmatico - legislativo. Un efficace "tavolo permanente" a cui aderiscono tutte le più rappresentative Associazioni del settore geotermico, nonché importanti Enti pubblici e privati, che negli ultimi tempi sta consolidando la propria efficacia ed autorevolezza.

L'emergenza energetica in atto determina la necessità di una scelta immediata riguardo lo sviluppo della Geotermia fonte rinnovabile strategica sia per la produzione elettrica che per le applicazioni termiche e per quest'ultime risulta fondamentale l'attuazione dell'art. 15 del DL del 1° Marzo 2022 N. 17, mediante l'emanazione del Decreto Ministeriale "Geoscambio", che regolamenti la realizzazione di impianti a bassa entalpia in ambito locale, una battaglia che il CNG è pronto a continuare per il bene del Paese e per il rilancio economico.



Ind.A.G.O. s.n.c. - Indagini e Opere Ambientali e Geologiche -
V. Balzan, 1 - 45100 - Rovigo - tel.: 042525185 www.indago-rovigo.it



La migliore qualità dei dati
nelle peggiori condizioni ambientali.

Terrameter LS2

Georesistivimetro 2-12 canali

Esclusivo sistema di upgrade da remoto

Schermo a colori integrato

Resistività-Polarizzazione indotta-Potenziali spontanei

DISTRIBUTORE PER L'ITALIA

GUIDELINEGEO
ABEM MALÅ



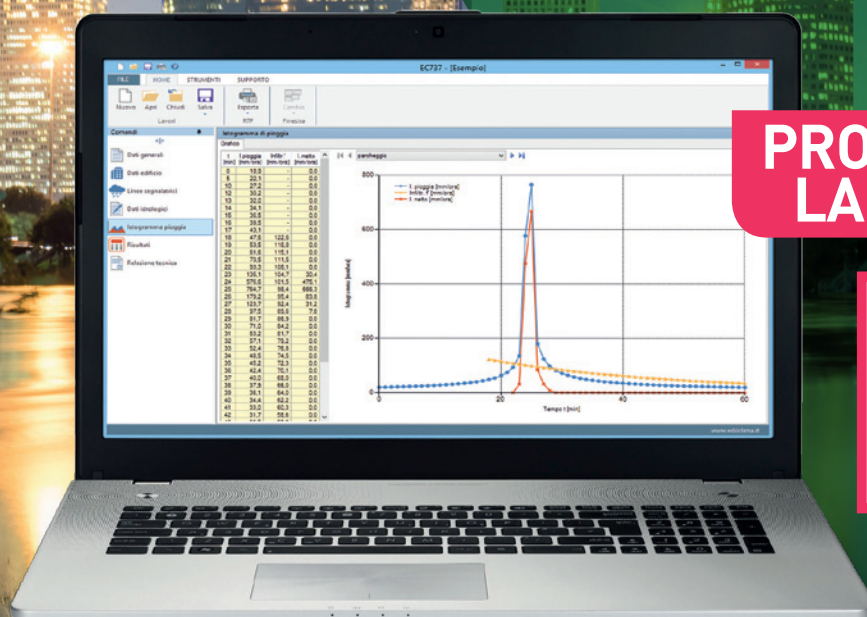
SENSYS[®]
Magnetometers & Survey Solutions



EC737 **NEW V.2**

INVARIANZA IDRAULICA E IDROLOGICA

Il primo software per il
calcolo dei sistemi
a invarianza



**PROVA ORA
LA TRIAL**



Conforme al R.R. Reg. Lombardia n.8 del 19.04.2019 e alla direttiva Reg. Emilia Romagna

EC737 implementa i principali algoritmi richiamati nei regolamenti regionali

Il software calcola sia i sistemi di laminazione che quelli a infiltrazione

ASSISTENZA TECNICA QUALIFICATA E GRATUITA

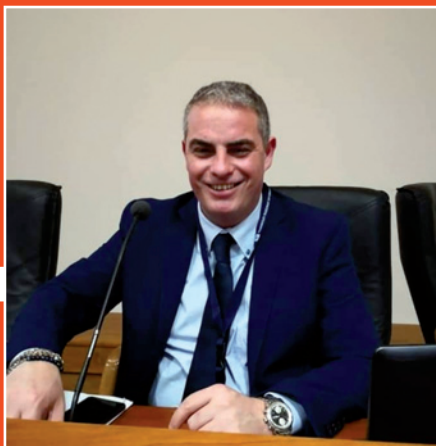


focus

LE ACQUE SOTTERRANEE:

salvaguardia e gestione adattiva della risorsa

Straordinaria partecipazione.



A cura di **Giovanni Andiloro**
componente commissione area tematica
"Risorse Idriche" del CNG

Numerosi professionisti, rappresentanti delle istituzioni, docenti e studenti di tutto il territorio Nazionale, hanno preso parte al Convegno nazionale sul tema "Le acque sotterranee: salvaguardia e gestione adattiva della risorsa", organizzato lo scorso 1 aprile dal Consiglio Nazionale dei Geologi (CNG), l'Ordine dei Geologi della Calabria (ORG-C), la Fondazione Centro Studi del CNG e l'UniCal-DiBEST, nell'ambito della "Giornata Mondiale dell'Acqua 2022". Ogni anno, durante la Giornata Mondiale dell'Acqua, viene scelto un tema di

approfondimento sul quale vengono incentrate tutte le attività celebrative. Per quest'anno, la scelta tematica è ricaduta sulle "Acque sotterranee-rendere visibile l'invisibile." L'obiettivo era quello di porre l'accento sulle criticità relative alla scarsità della risorsa idrica, un bene prezioso che, a causa dei cambiamenti climatici, rischia di essere minacciato dalla siccità.

L'evento, svoltosi in modalità mista, sia Webinar sia in presenza presso l'Aula Magna "Beniamino Andreatta" del Centro Congressi dell'Università della Calabria, ha visto la partecipazione di oltre 1.800 professionisti da remoto e circa 200 in presenza. La convention ha visto nei saluti iniziali, la partecipazione dei massimi rappresentanti della categoria professionale dei Geologi in Italia (Presidente CNG **Arcangelo Francesco Violo**, Presidente dell'Ordine Regionale **Giulio Iovine** e della Fondazione Centro Studi CNG **Lorenzo Benedetto**) ed Europa (Presidente della Federazione Europea dei Geologi **Marko Komac**), la partecipazione di autorità politiche (come l'Assessore Regionale all'Agricoltura On. **Gianluca Gallo**), dell'ISPRA (dott.ssa **Gafa**) e dell'Università della Calabria (**Fabio Scarciglia**).

I Panel previsti, hanno raccolto la partecipazione di esperti e autorevoli rappresentanti del mondo della ricerca, dell'accademia e delle istituzioni. In particolare sui cambiamenti climatici e gli effetti sulla risorsa idrica, sono intervenuti **Dino Zardi** (Presidente Associazione Italiana Scienze dell'Atmosfera e Meteorologia), **Marco Petitta** (Ordinario di Idrogeologia Università La Sapienza di Roma e Vicepresidente dell'Associazione Internazionale di Idrogeologi IAH), **Carmine Apollaro** (Professore associato del DiBEST Unical). Il Panel sulla Pianificazione della risorsa





idrica ha visto la partecipazione dei Segretari dei Distretti Idrografici dell'Appennino Centrale, Erasmo D'Angelis e di quello Meridionale, Vera Corbelli. **Mauro Grassi** Economista, già Direttore di Italia Sicura, ha fornito indirizzi e soluzioni sulle politiche inerenti la gestione adattiva delle risorse idriche. Tanti i riferimenti sul PNRR e sull'irrisorietà delle risorse destinate al settore idrico (4,3 Miliardi di Euro), che dentro un piano da 190 Miliardi, l'acqua è stata definita in tal senso una "Cenerentola". Sull'Agricoltura ed i fondi destinati dal PNRR sull'ammodernamento delle reti irrigue collettive è intervenuto per l'ANBi **Adriano Battilani**. **Carmelo Gallo**, Presidente di Sogesid, oltre ad illustrare l'importante ruolo di Sogesid nella gestione della risorsa idrica, ha sottolineato l'importanza culturale dei temi trattati rispetto ad un bene prezioso e vitale. **Endro Martini** della fondazione EWA e **Stefano Chiarugi** dell'Associazione Nazionale Pozzi per Acqua, hanno trattato i temi legati al valore ed alla salvaguardia della preziosa risorsa.

Le conclusioni sono state affidate al Presidente del Consiglio Nazionale

Arcangelo Francesco Violo, unitamente ad **Erasmo D'Angelis** che ha presentato ai numerosi uditori il suo nuovo libro "Acque d'Italia".

Grande soddisfazione quindi per l'iniziativa, che ha trattato in maniera completa una tematica di grande attualità, la gestione e la salvaguardia della risorsa Acqua, centrale per un futuro sostenibile legato al concetto di equità intergenerazionale.

L'evento è stato moderato dal Segretario del CNG **Domenico Angelone** e dal Segretario dell'ORG-Calabria e componente della commissione area tematica "Risorse Idriche" del CNG **Giovanni Andiloro**.

'La via dell'acqua' Strategie per una Gestione Sostenibile della risorsa idrica

Le strategie per una gestione sostenibile della risorsa idrica potrebbero essere:

- **Conoscenza:** Quadro conoscitivo sulle potenzialità e disponibilità della risorsa idrica.
- **Monitoraggio:** Controllo delle disponibilità e dei consumi della risorsa idrica.
- **Adattamento:** Insieme di scelte operate nel campo naturale, artificiale e tecnologico, per moderare gli effetti dei cambiamenti climatici anche attraverso azioni culturali volte alla razionalizzazione dell'uso della risorsa idrica.
- **Resilienza sociale:** Capacità, in questo caso della società,



...porre l'accento sulle criticità relative alla scarsità della risorsa idrica, un bene prezioso che, a causa dei cambiamenti climatici, rischia di essere minacciato dalla siccità.



di far fronte ad eventi traumatici come alluvioni e siccità, in grado di attivare una resistenza attraverso risposta, recupero e creazione di nuove opzioni.

- **Potenziamento della Governance:** Sistema decisionale sull'utilizzo della risorsa, teso all'ottimizzazione delle procedure tramite il coinvolgimento degli stakeholder, attraverso la condivisione delle strategie, dialogo continuo e visione unitaria.
- **Mitigazione:** Intervento umano volto a ridurre gli impatti degli effetti dei cambiamenti climatici con interventi strutturali e non strutturali.
- **Utilizzo Plurimo della risorsa idrica:** Pianificare diversi utilizzi al fine di soddisfare più necessità di un territorio con le stesse acque.

Rafforzare il carattere conoscitivo degli aspetti legati all'idrogeologia dei territori, risulta fattore imprescindibile ai fini di una corretta pianificazione dell'uso della risorsa idrica.

A tal riguardo è utile segnalare il ruolo fondamentale dei monitoraggi quali-quantitativi dei corpi idrici superficiali e sotterranei (indispensabili per stimare accuratamente la risorsa disponibile), che si distinguono dai monitoraggi sulle reti e sulle utenze (che servono invece ad identificare le perdite e quantificare usi e consumi).

Il monitoraggio quali-quantitativo delle acque rappresenta, unitamente al censimento delle utenze, uno strumento conoscitivo fondamentale per la costruzione di bilanci affidabili (basati

su dati di imput e non su ipotesi comportamentali della risorsa) e quindi per il rilascio del parere di compatibilità ambientale ex-ante (parere obbligatorio ai fini del rilascio delle concessioni di utilizzo della risorsa).

La Gestione adattiva della risorsa idrica risulterà fondamentale nel prossimo futuro, intervenendo con azioni mitigatrici rispetto agli effetti dei cambiamenti climatici. Le acque superficiali, quando presenti in abbondanza, andranno utilizzate opportunamente avendo cura di "conservarle" per i periodi siccitosi. In tale scenario, dovremmo iniziare ad immaginare il mantenimento e lo sviluppo dei territori, non più dipendente da un solo sistema di captazione, (da acque superficiali o sotterranee), ma entrambi i sistemi dovranno essere interscambiabili, consentendo appunto "l'adattamento" alla disponibilità idrica del periodo. Pertanto, appare necessario e non più procrastinabile una seria politica di governo delle acque, che possa, attraverso una cultura e pianificazione resiliente mettere in campo una serie di azioni necessarie per la regolazione dei flussi di portata derivanti dalle precipitazioni (alluvioni), gestendo e conservando i quantitativi in eccesso salvo poi utilizzarli nei momenti di necessità (siccità). In tale contesto, oltre alle opere di sbarramento (dighe di ritenuta), laddove possibile ed opportuno, si dovrà intervenire con sistemi di ricarica artificiale delle falde acquifere.

Inoltre, mancano misure che prevedano una revisione sui sistemi di captazioni che alimentano la rete acquedottistica, rivisitati e razionalizzati sulla base di conoscenze (idrologiche ed idrogeologiche) aggiornate, che consentano di ottimizzare il servizio (convertendo, ove possibile, gli impianti di sollevamento per quelli a gravità) e mitigare eventuali deficit quantitativi o qualitativi futuri.

Gli usi plurimi della risorsa idrica necessitano di conoscenze approfondite, nonché di strumenti normativi adeguati, in grado di contemperare interessi ed esigenze rilevanti e assai differenti. Lo sviluppo sostenibile di comparti vitali (come l'idropotabile) e strategici (come l'agricoltura e l'industria) non potrà prescindere da nuove strategie di utilizzo e gestione delle risorse idriche, da norme chiare, e da strumenti e pratiche efficaci per valutarne le effettive disponibilità in relazione alla variabilità spaziale delle precipitazioni.

LA TUA SOLUZIONE SU MISURA

Le nostre applicazioni di successo

- ✓ Monitoraggio ambientale
- ✓ Dighe
- ✓ Discariche
- ✓ Centri di ricerca
- ✓ Università
- ✓ Arpa
- ✓ Municipalizzate
- ✓ Comuni, Province, Regioni
- ✓ Geologia
- ✓ Acquedotti
- ✓ Bonifiche ambientali
- ✓ Sorgenti ed acque sotterranee



Sensori di livello

A battente idrostatico per tutti i tipi di fluido



Datalogger

Per la misura di livello, temperatura, conducibilità ed altri parametri fisico-chimici



Trasmissione dati

Sistemi di trasmissione dati WMS-GPRS

STS ITALIA S.R.L.

Il sinkhole della città di Turi: tra storia e geologia

Alessandro Reina | Ricercatore e docente del Politecnico di Bari iscritto ORG Puglia n° 806
Stefano De Carolis | Giornalista e storico

Premessa

Come noto sin dall'epoca di Horatio (siticulosa Apulia), in relazione alla sua natura carsica, il territorio murgiano ha sempre sofferto la presenza di acque superficiali. La vitale necessità di reperire acqua ha esercitato e sviluppato una esperienza notevole (sfruttando la diretta conoscenza delle dinamiche del territorio e del paesaggio) nell'escogitare sistemi di raccolta e regimazione delle acque attraverso diverse forme dell'architettura agreste pugliese realizzando per esempio muretti a secco, cisterne, neviere, ecc. In particolare, molte cittadine

delle Murge sud-orientali come Conversano, Putignano e Turi si sono affidate alla realizzazione di pozzi drenanti superficiali in aree depresse coincidenti anche con bacini endoreici. In questo lavoro si illustrano le condizioni morfologiche e idrogeologiche che hanno portato alla formazione del sinkhole formatosi in pieno centro cittadino del Comune di Turi e precisamente in Largo Pozzi.

Il presente lavoro sottolinea come nel contesto di un paesaggio carsico lo studio delle condizioni stratigrafiche, morfologiche e idrogeologiche rappresentano gli elementi di base per prevenire situazioni che possono evolvere in fenomeni di sinkhole.

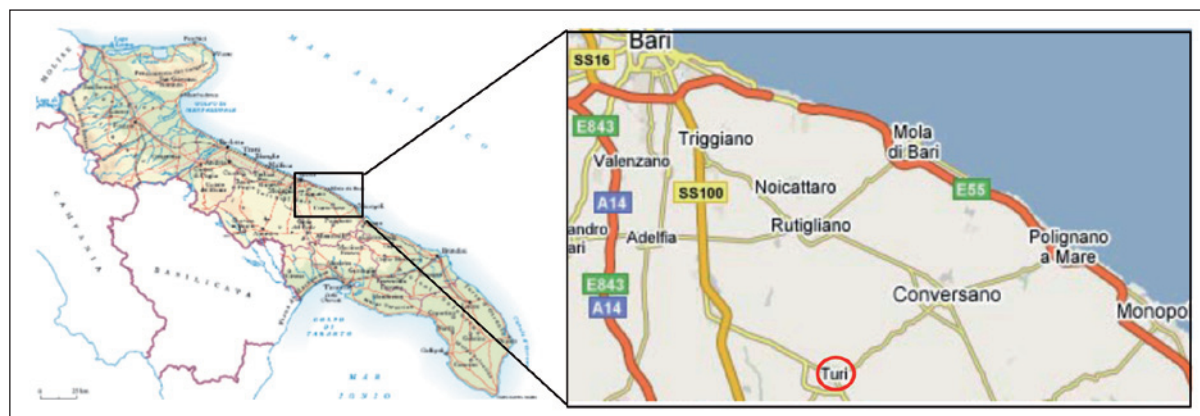


Figura – Ubicazione della Città di Turi nella provincia di Bari

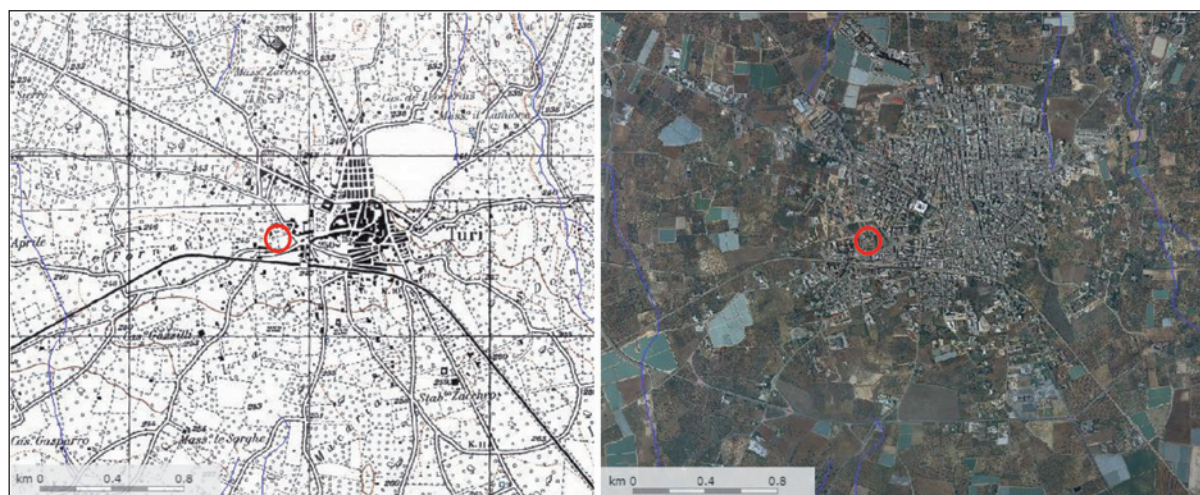


Figura – La città di Turi rappresentata nella carta topografica IGM in scala 1:25.000 del 1944 e nell'ortofoto del 2019

Cenni storici

In un importante documento custodito nell'archivio di Stato di Napoli, dal titolo: "descrizione e apprezzamento del feudo di Turi", redatto il 2 marzo 1746, Luca Vecchione, ingegnere del Regio Tavolario del Regno, scriveva:

".....e perfetto aere che in detta Terra vi si respira, come per li cibi sani, e sostanzievoli, si servano dell'acqua piovana, che si conserva e si ripone nelle cisterne che ogni cittadino ha nella propria casa, a differenza della gente minuta che si va a servire in alcune cisterne dell'Università situate fuori della terra in sito molto inferiore, formando in detto luogo un vallato, in cui si raduna in tempo di piove gran copia d'acque, riempiendo non meno molte cisterne, o siano artefatte, anzi alle volte mercè la grande abbondanza d'acqua forma uno stagno, ove portano i cittadini e i vicini ad abbeverare gli animali, ciò nonostante non produce cattiva aere, ed oltre a ciò si servono delle acque sorgive, e fluenti che nascono nel territorio o di Serri e Canale in grande abbondanza e buona qualità, però con molto incommodo trasportarla..."

Tuttavia, è importante ricordare, che il lago e le cisterne nel largo dei pozzi di Turi, vengono citate in una antica pergamena vergata il 16 giugno 1174 (CDB v.n.134; Archivio storico comunale):

"...rendo noto che Roberto Conte di Conversano, mio avo, a gloria della sua anima e dei suoi genitori, donò, offri e concesse alla detta chiesa, una chiesa detta di San Pietro Novizio sita vicino e nel territorio di frassineto, cioè con case, caselle, vigne con viti, acque, boschi, alberi da frutto e non, con tutte le chiese pertinenti. Offri anche alla stessa chiesa, Giovanni figlio di Bisanzio, suo vassallo, con tutti i suoi beni stabili e mobili e i suoi animali. Dopo che il predetto signore Ugo, nostro padre,

per volontà della signora Olimpia sua moglie, mia nonna, pure confermò la predetta donazione ed anche concessione, e concesse alla stessa chiesa gli olivi e tre cisterne che sono nel villaggio di Turi, e tutte le cose concesse da mio nonno e confermate da mio padre, secondo certi confini indicati da notaio e che la chiesa possiede..."

"... Le cisterne sono vicino al luogo di Turi, vicino lo stesso lago di Turi dove sono altre cisterne e gli olivi sono vicini allo stesso luogo di Turi..."

La dimostrazione che l'acqua dei pozzi fosse utilizzata per l'uso potabile è testimoniata dal certificato del Laboratorio di Chimica di Bari del 1909 e dalle cartoline delle portatrici d'acqua dell'inizio secolo XX.

Le cronache riportano che nei giorni 2 e 3 settembre 1919 nel territorio del sud est barese caddero copiose e forti piogge, in particolare a Turi l'acqua precipitata fu così abbondante che l'intero paese e i suoi terreni limitrofi fu invaso dall'acqua. Le acque meteoriche riempirono prima i pozzi e poi l'intera area di Largo Pozzi. Il livello delle acque superò l'antica chiesetta di San Rocco, e ben presto si formò anche un grande lago.

Nei primi giorni dopo l'alluvione, l'acqua era limacciosa, ma dopo qualche giorno divenne limpida. Per poter attraversare lo specchio d'acqua che si era formato, alcuni trainieri turesi, con i propri carri si portarono a Polignano e qui caricarono alcune barche per poter navigare il lago di Turi. Dopo lo straordinario evento alluvionale si notarono immediatamente i danni provocati dall'acqua (Figura). Ingenti furono i danni dell'intero territorio urbano e extraurbano. Il Comune di Turi dopo una prima ricognizione e stima dei danni indisse un capitolato speciale d'appalto per la sistemazione delle strade urbane ed extraurbane danneggiate. La somma spesa fu di lire 127.800.



Figura – A sinistra, documento con le analisi delle acque provenienti dai pozzi di Turi e a destra cartolina con le cisterne (pozzi) pubblici. (Archivio storico del Comune di Turi)



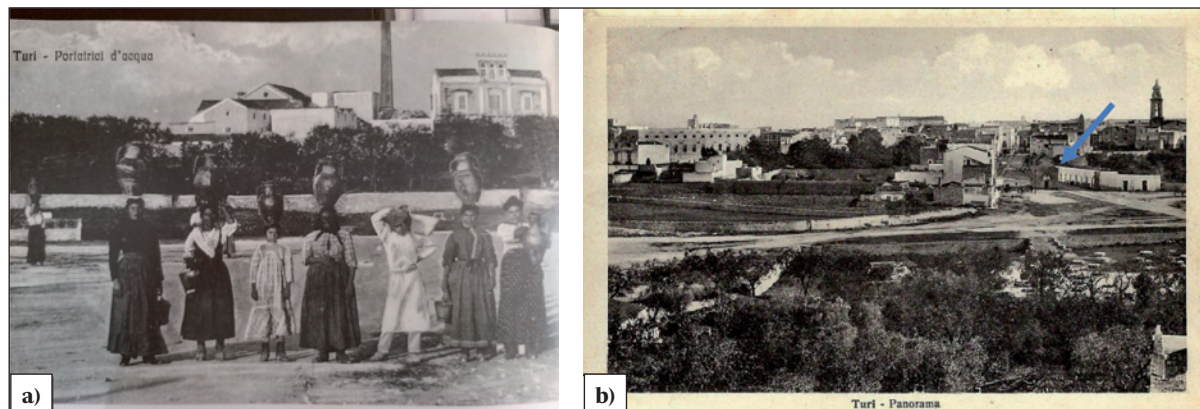


Figura - Foto delle caroline a) Portatrici di acqua; b) panoramica dove si osserva in primo piano la depressione con la posizione dei pozzi, la scalinata di accesso e con la freccia viene indicata la chiesetta di S.Rocco, dove le cronache del 1919 indicano che è arrivata l'acqua dell'alluvione. (Archivio storico del Comune di Turi)

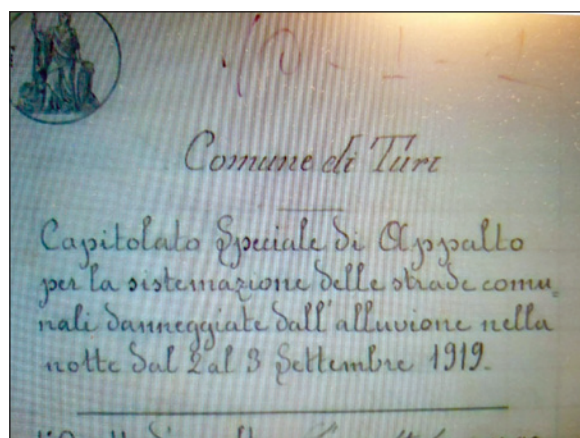


Figura – Documento che tratta dei danni dell'alluvione del 2 e 3 settembre 1919 (Archivio comunale di Turi)

Dopo giorni di apparente tranquillità, nel largo dei pozzi avvenne un evento a dir poco straordinario che rimase impresso nei ricordi di molti turesi. Testimone oculare fu tale Vito Grazio De Grisantis, classe 1887, un esperto 'vaticale' che molti anziani, ancora oggi ricordano, in quanto, ogni anno, durante la festa patronale di Sant'Oronzo, data la sua attività di 'trainiere', puntualmente, era a capo del tiro delle sei mule del carro trionfale del Santo.

Questa importante testimonianza è giunta a noi grazie al prezioso lavoro di ricerca storica, di Don Vito Ingellis, il quale con dovizia di particolari raccolse il racconto di Vito Grazio De Grisantis:

"... mentre venivo con il traino dal casino di Don Tito Aceto (attuale casa di Modesto lo Greco), nei pressi di via Sammichele, vidi partire da largo pozzi una tromba d'acqua che andò prima in alto quanto l'altezza del campanile, dopo ricadde facendo un rumore spaventoso. Seguì un boato tremendo, per l'immensa pressione esercitata dall'acqua, si aprì nel terreno

una enorme voragine, un capovento, vicino alla piscina nuova. Nonostante la grande forza e la forte pressione dell'acqua, la piscina nuova rimase intatta. L'acqua scomparve in un vortice, si videro sul terreno grosse buche, tutta l'acqua era stata succhiata."

La testimonianza del De Grisantis, acquisita dall'arciprete, descrive un evento estremamente interessante: nella depressione carsica in cui si era formato il lago, a seguito dell'evento su descritto, si era aperto un enorme inghiottitoio, profondo circa 30 metri, volgarmente chiamata "Grave", che aveva fatto dissolvere completamente il lago.

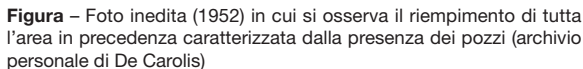


Figura – A sinistra la foto dell'arciprete Don Vito Ingellis; a destra la foto di Vito Grazio De Grisantis

Nella primavera del 1932, a seguito delle leggi fasciste, per la bonifica di zone paludose e malariche, pensarono bene di far demolire la millenaria volta della piscina grande, e riempirla di terra, conci di pietre e materiale inerte (archivio storico comunale). Stessa distruzione subì il ponticello che collegava largo pozzi e via Sammichele, e con esso, dopo alcuni anni, l'intero sito del largo dei pozzi venne completamente interrato (Figura alla pagina seguente).

Negli anni Settanta la grave è stata riaperta e utilizzata come punto di immissione delle acque meteoriche.

Il luogo è ancora tristemente ricordato, anche per un tragico



Più di recente con l'esecuzione di lavori per la realizzazione del nuovo sistema di raccolta delle acque bianche sono state rinvenute alcune strutture riconducibili al muro di sostegno dell'area depressa e i pozzi che erano utilizzati per l'approvvigionamento idrico.

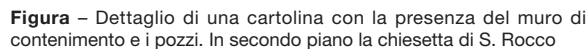
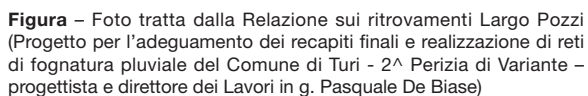


Figura - Foto degli scavi con ritrovamento del muro di sostegno dell'area dei pozzi (Archivio personale S. De Carolis)



diffusamente depositi residuali argillosi: terre rosse. In particolare, le terre rosse affiorano sul fondo delle lame, doline, e più in generale di depressioni morfologiche di genesi carsica. Sono associate a meccanismi deposizionali continentali come sistemi fluviali a regime torrentizio. I depositi sono costituiti da argille rosse residuali miste alternati a clasti calcarei spesso mal classificati in matrice silteosa argillosa.





Foto – Depositi recenti costituiti da livelli di clasti calcarei e limoso terroso di origine alluvionale (foto A. Reina)

Strettamente correlata alla morfologia di superficie, la rete idrografica nel territorio di Turi presenta molti aspetti propri delle Murge sudorientali, caratterizzata dalla mancanza di una rete idrografica superficiale attiva, mentre si riscontra la presenza di una rete idrografica fossile, rappresentata dalle lame, impluvi di origine carsica interessati al trasporto di acqua in occasione di eventi meteorici di particolare intensità e durata. Le lame si sviluppano in prevalenza secondo una direzione prevalentemente nord-sud, e secondariamente est-ovest, su tracciati sovente condizionati dalla presenza di lineazioni di origine tettonica, e che pertanto possono assumere connotati piuttosto articolati, su cui il carsismo ha successivamente giocato un ruolo determinante nel loro modellamento. Il fenomeno carsico ha un ruolo fondamentale nella regolazione delle acque di ruscellamento, laddove la presenza diffusa

di doline lame e bacini endoreici ne rappresentano le forme superficiali più evidenti.

L'area della città di Turi ricade in una porzione di territorio con una superficie topografica che mostra un generale profilo pianeggiante caratterizzato dalla presenza di doline. In particolare, quella presente nel settore occidentale dell'edificato mostra la configurazione tipica di un bacino endoreico debolmente aperto verso nord. Il reticolo idrografico mostra un tracciato orientato in maniera irregolare prevalentemente Nw.SE, che si sviluppa in sistemi poco gerarchizzati e con verso di scorrimento verso NE. Particolarmente interessante è la presenza di grotte di varia dimensione ma con sviluppo prevalentemente superficiale e di inghiottitoi stretti e profondi. La Grotta di S. Oronzo nella zona del cimitero è la più famosa perché in passato oggetto di culto del Santo.

Le modalità di infiltrazione e ruscellamento delle acque meteoriche sono quindi legate sia all'intensità e distribuzione delle discontinuità e cavità che interessano il substrato calcareo, sia all'eventuale presenza in queste, di materiale di riempimento che costituisce un ostacolo al libero drenaggio e deflusso delle acque in profondità.

Come accennato già in precedenza, l'assorbimento, è maggiore nei punti interessati da un carsismo più accentuato e con scarsa o nulla vegetazione, rispetto a zone in cui il substrato carbonatico si presenta in affioramento compatto e omogeneo o con depositi di terra rossa.

Nelle principali forme erosive e carsiche di superficie, nonché nel sistema di fratture delle rocce, si trovano i depositi alluvionali (Terre Rosse), prodotto residuale del fenomeno del carsismo operato dalle acque meteoriche sui calcari. Sono osservabili, nelle zone più depresse del territorio, livelli stratigrafici di terre rosse che conservano spessori molto variabili. In corrispondenza di Largo Pozzi lo spessore osservato da indagini geognostiche effettuate dal comune è di oltre 20m.

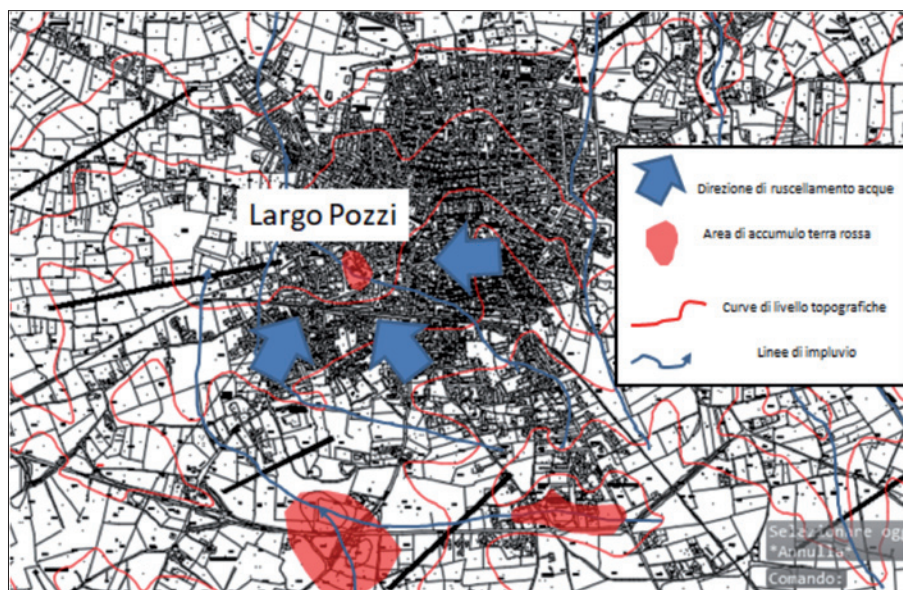


Figura – In relazione alla morfologia superficiale le acque di ruscellamento convergono verso Largo Pozzi



Figura – Stralcio dalla Relazione Geologica a firma del Dott. Melchiorre per il progetto definitivo di Adeguamento dei recapiti finali e realizzazione di reti di fognatura pluviale del Comune di Turi.



Figura – Andamento delle isofreatiche nell'area del Comune di Turi (PTA 2019)

In particolare, la zona di Largo pozzi della Città di Turi ha ereditato nel tempo geologico un ruolo di bacino endoreico. Infatti, i percorsi delle acque di ruscellamento tendono a convergere verso la piazza. Inoltre, la presenza di un notevole spessore di terra residuale e quella della grave (inghiottitoio) testimoniano come la distribuzione delle acque superficiali tendesse convergere e poi a ristagnare verso un recapito finale. La circolazione idrica sotterranea si esplica prevalentemente in pressione, ma il livello piezometrico nei pozzi in condizioni statiche indica soggiacenze dell'ordine dei 150m.

Nella zona di Largo Pozzi in passato si riscontrano testimonianze anche fotografiche dell'esistenza di una falda superficiale per la presenza di pozzi superficiali drenanti. La stessa area che in base alla copiosità delle precipitazioni poteva diventare un piccolo lago a causa dell'innalzamento della superficie freatica. Nel periodo estivo invece era possibile grazie alla presenza dei pozzi superficiali attingere acqua per drenaggio dei depositi terrosi residuali.

Fino all'inizio del secolo scorso l'approvvigionamento idrico

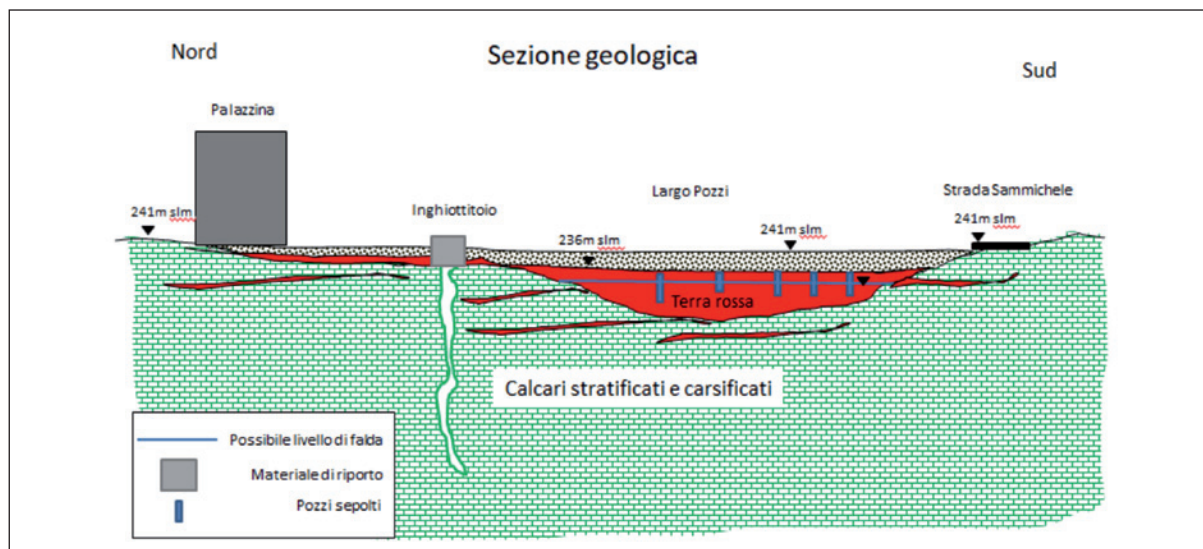


Figura – Sezione geologica passante per l'attuale Largo Pozzi.

del paese di Turi (città delle Murge sud orientali baresi) era affidato alla presenza dei pozzi superficiali realizzati in un numero imprecisato, ma certamente più di venti, ai quali si aggiungevano due piscine pubbliche di forma rettangolare.

Conclusioni

In considerazione della ricostruzione morfologica e stratigrafica dell'area di Largo Pozzi e in base a quanto descritto nella testimonianza storica riportata dall'Arciprete Don Vito Ingellis si può certamente asserire che il De Grisantis è stato il primo testimone oculare di un fenomeno naturale riconducibile alla formazione di un sinkhole.

Con il presente studio, infatti, si riconoscono le condizioni predisponenti per la formazione di un trasporto del materiale superficiale, poco coeso e saturo, in una cavità o inghiottitoio carsico presente nel sottosuolo. Si è infatti riconosciuto, attraverso il rilevamento geologico e i dati forniti dall'Ufficio Tecnico comunale di Turi, che l'area di studio è caratterizzata dalla presenza di un substrato carbonatico costituito da strati di rocce calcaree fratturate e carsificate ricoperto da uno spessore di depositi terrosi residuali di spessore almeno pari a 20m. L'andamento topografico propone uno scenario morfologico nel quale si distingue un bacino endoreico nel quale confluiscono le acque superficiali in occasione di più o meno copiose precipitazioni. La presenza dei pozzi drenanti fornisce certamente un elemento in più nella ipotesi della presenza di una falda superficiale. L'esistenza della falda superficiale con periodi alternanti di saturazione dei terreni acquiferi può costituire le condizioni predisponenti per il verificarsi di un sinkhole. La definizione è genericamente indicata come: fenomeni di sprofondamento naturale ed improvviso che hanno dato origine a voragini generalmente di forma sub-circolare di diametro variabile da alcuni metri a poche centinaia di metri. Secondo le più recenti metodologie identificative e di classificazione di questi fenomeni (WALTHAM et al. 2005), il caso di studio potrebbe far pensare ad una dolina alluvionale-sub-sidence sinkhole-cover subsidence sinkhole. Come riportato sul sito dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) tale tipologia può riferirsi ad una conca chiusa che si forma su materiali di copertura in genere, e/o alluvionali, in seguito all'originarsi, in rocce solubili sottostanti, di cavità carsiche per dissoluzione sub-superficiale o di crollo. Tale tipologia è caratteristica delle aree dove al di sopra di un bedrock carbonatico carsificato, sono presenti spessori di materiale non coesivo come, ad esempio, sabbie sciolte e ghiaie. I meccanismi di innesco di questo tipo di morfologia sono dovuti a processi di natura gravitativa e di filtrazione (raveling) che subiscono i terreni sciolti nelle cavità carsiche del bedrock. I materiali incoerenti, infatti, posti al di sopra delle cavità del substrato vengono drenati nelle cavità sottostanti mediante meccanismi di raveling (Tihansky, 1999).

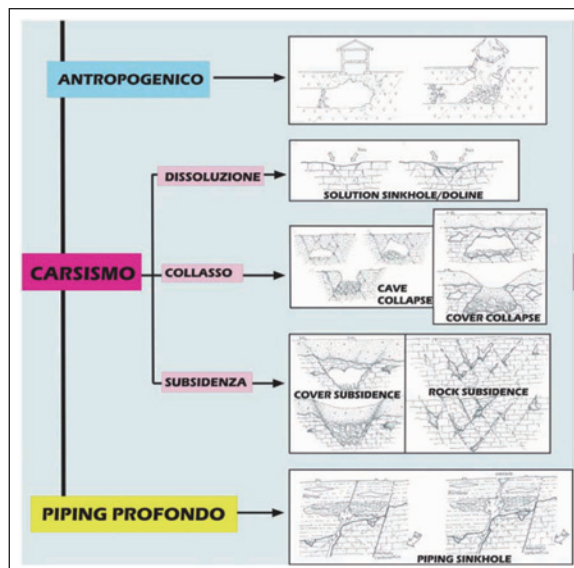


Figura – Classificazione dei fenomeni di sinkhole (da: isprambiente.gov.it)

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano l'Amministrazione comunale e l'Ufficio Tecnico comunale per la disponibilità e la collaborazione dimostrata durante la fase di acquisizione dei dati necessari per la stesura del presente studio.

Bibliografia citata

- Archivio storico del Comune di Turi.
- NISIO S. (2004) I fenomeni di sinkhole in Italia: terminologia, meccanismi genetici e cause innescanti. *Idea Ambiente* anno 1, n°2. 2004. Apat, Roma
- TIHANSKY A. B. (1999). SINKHOLES, WEST-CENTRAL FLORIDA. U.S. Geological Survey, Tampa, Florida, 121-140pp
- WALTHAM A.C. & FOOKES P.G. (2003) Engineering classification of karst with respect to the role and influence of caves. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101-118.
- WALTHAM T., BELL F.G., CULSHAW M.G., KNEZ M. E. SLABE T. (2005) - Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction - Springer: Berlin. 382pp

<https://www.isprambiente.gov.it> - I sinkholes naturali – Italia - no - Ispra

DOVE C'E' UNA GRANDE OPERA, CI SONO I NOSTRI STRUMENTI

Dal 2002, realizziamo strumenti di concezione interamente nuova per:

- prospezione geofisica
(**TROMINO®**, **ELECTRA**,
SOILSPY, **SURICAT**)
- monitoraggio vibrazioni
- caratterizzazione
dinamica delle strutture

- Siamo ente abilitato alla formazione continua per geologi. Vasto calendario di corsi di taglio pratico ma rigoroso.
- Servizi di noleggio, consulenza, supporto all'analisi e alla interpretazione dei dati.
- Sviluppo software *ad hoc* per necessità tecniche speciali.

Considerazioni sulle correlazioni tra N_{spt} ed angolo di attrito interno

Some Consideration on the Relationship between N_{spt} and Friction Angle

Francesco Amantia Scuderi | Libero professionista



Termini chiave: SPT, Angolo di attrito, Correlazioni

Keywords: SPT, Friction Angle, Relationship, Correlation

Abstract

In granular soils, the correlation between the results of the Standard Penetration Test (N_{spt}) and the shear strength has been the subject of numerous studies and attempts aimed at defining numerical relationships capable of translating the N_{spt} values into as many shear parameter values in drained conditions (internal friction angle). This work presents the results of a study on the aforementioned correlation, based on multiple data obtained from in situ and laboratory investigations on inconsistent soils, carried out in Nigeria in the Niger River delta area. In the aforementioned area there are, in fact, extensive formations of recent sediments both cohesive, formed by saturated silty clays and clays, almost always with the presence of widespread organic substance, and incoherent, essentially given by irregular alternations between coarse-grained soils (gravels and sands) and fine grained soils (sands).

Since numerous in situ tests (SPT) and in the laboratory (CD direct shear tests) have been carried out on the incoherent layers, a multitude of pairs of values (SPT and Direct shear) are available, which allow a precise and detailed comparison between the values, allowing both correlations formulated on the basis of existing studies, and the proposal of a new correlation that also takes into account the granulometric characteristics of the named sediments.

The analyzed data come from two distinct areas (Sapele and Eyaen) in which numerous geognostic and geotechnical investigations were carried out both in situ and in the geotechnical laboratory, from whose analysis not many dispersive values were acquired, which allowed the identification of a numerical relationship between normalized N_{spt} value $N1(60)$ with the internal friction angle, comparing at the same time this relationship to the corresponding direct shear tests CD and to the numerous existing relationships, some of which are currently used in geotechnics.

Riassunto

Nei terreni incoerenti la correlazione tra i risultati delle prove Standard Penetration Test (N_{spt}) e la resistenza al taglio è stata oggetto di numerosissimi studi e di tentativi finalizzati a definire delle relazioni numeriche in grado di tradurre i valori N_{spt} in altrettanti valori dei parametri di taglio in condizioni drenate (angolo di attrito interno). Nel presente lavoro vengono esposti i risultati di uno studio sulla suddetta correlazione, basato su molteplici dati ricavati da indagini in situ ed in laboratorio su terreni incoerenti, effettuati in Nigeria nell'area del delta del Fiume Niger. Nella suddetta area si trovano, difatti, estese formazioni di sedimenti recenti sia coesivi, formati da argille ed argille siltose sature, quasi sempre con presenza di sostanza organica diffusa, sia incoerenti, essenzialmente dati da alternanze irregolari tra terreni a granulometria grossolana (ghiaie e sabbie) e terreni a grana più fine (sabbie).

Poiché sugli orizzonti incoerenti sono state effettuate numerosissime prove in situ (SPT) ed in laboratorio (prove di taglio diretto CD) si ha la disponibilità di una moltitudine di coppie di valori (SPT e Taglio diretto) che consentono un puntuale e dettagliato raffronto tra i valori, permettendo sia delle correlazioni formulate sulla scorta degli studi esistenti, sia la proposta di una nuova correlazione che tiene conto anche delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti in questione. I dati analizzati provengono da due aree distinte (Sapele ed Eyaen) in cui sono state eseguite numerose indagini geognostiche e geotecniche sia in situ che in laboratorio, dalla cui analisi sono stati acquisiti valori poco dispersivi, che hanno consentito l'individuazione di una relazione numerica che lega il valore di N_{spt} normalizzato $N1(60)$ con l'angolo di attrito interno, raffrontando nel contempo tale relazione alle corrispondenti prove di taglio diretto CD ed alle numerose relazioni già esistenti, alcune delle quali correntemente utilizzate in geotecnica.

Introduzione

Nel presente lavoro viene analizzata la correlazione tra i valori N_{spt} registrati lungo le verticali di alcuni sondaggi ed i corrispondenti valori di resistenza al taglio determinati in laboratorio, mediante prove di taglio diretto CD, su campioni prelevati all'incirca alle stesse profondità delle prove SPT.

A tal fine sono stati raccolti i dati provenienti da indagini in situ e di laboratorio in due aree distinte, ubicate in Nigeria in prossimità del delta del Fiume Niger, in cui si hanno estese formazioni recenti costituite da alternanze di orizzonti di argille ed argille siltose sature, quasi sempre con sostanza organica diffusa, ed orizzonti di terreni incoerenti, in prevalenza costituiti da sabbie e ghiaia. Nella Figura 1 è riportata l'ubicazione delle suddette aree:

- Sapele, a circa 44 Km a Nord di Warri, in prossimità del Benin River, nel Delta State
- Eyaen, a circa 17 Km a NE di Benin City, nell'Edo State.

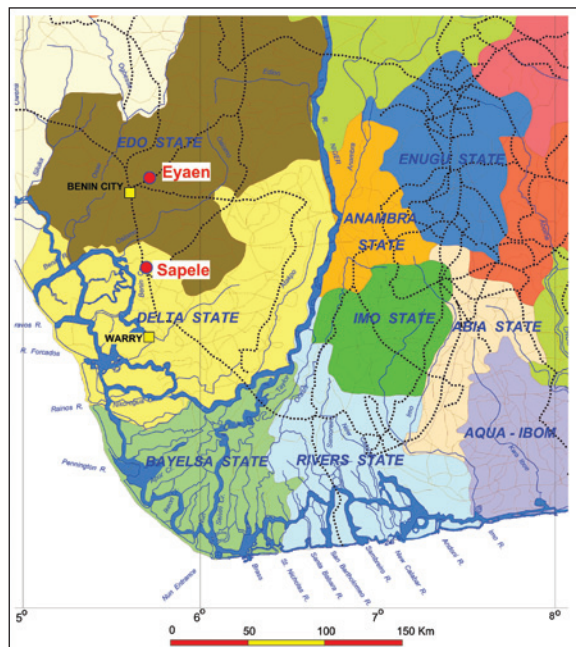


Fig. 1 - Ubicazione delle aree in esame

Nelle suddette aree sono stati eseguiti numerosi sondaggi a carotaggio continuo per la definizione di dettaglio della successione stratigrafica dei terreni e del relativo comportamento meccanico, come di seguito specificato:

Sapele - Nell'ambito del progetto di una costruenda Power Station, che avrebbe dovuto fornire energia elettrica ad una vasta area circostante, sono state eseguite, in varie fasi ed in tempi diversi (nell'intervallo Aprile - Dicembre 2006), le seguenti indagini geognostiche e geotecniche:

- N° 26 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, spinti sino alla profondità massima di m 45 dal p.c., denominati P1 ÷ P-5 (effettuati nel periodo aprile - maggio 2006) e BH.1 ÷ BH.21 (effettuati nel periodo settembre - novembre 2006);

- N° 180 prove Standard Penetration Test eseguite ad ogni 1,50 m di avanzamento, sino alla profondità di m 30,0 dal p.c.
- N° 65 analisi geotecniche di laboratorio.

Eyaen - Anche in questo caso per il progetto di una costruenda Power Station, che avrebbe dovuto fornire energia elettrica all'area urbana ed extraurbana della città di Benin; complessivamente nel periodo Maggio - Luglio 2006 sono state eseguite le seguenti indagini geognostiche e geotecniche:

- N° 13 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, spinti sino alla profondità massima di m 42 dal p.c., denominati BH.1 ÷ BH.13;
- N° 143 prove Standard Penetration Test, eseguite ad ogni 1,50 m di avanzamento, sino alla profondità di m 30,0 dal p.c.
- N° 61 analisi geotecniche di laboratorio.

Tutti i sondaggi sono stati effettuati a carotaggio continuo, con recupero totale del cutting; le prove Standard Penetration Test sono state eseguite mediante attrezzatura di caratteristiche standard della Pilcon Engineering, recante all'estremità il tubo campionario (sezionato longitudinalmente) "Raymond", di diametro 51 mm e lunghezza utile $L = 562$ mm, munita di dispositivo per lo sganciamento automatico della massa battente (Pilcon Trip Monkey), con massa battente del peso $P = 63,5$ Kg ed altezza di caduta $H = 760$ mm.

Le analisi geotecniche di laboratorio sono state effettuate in parte in loco, presso il Laboratorio Geotecnico Achumu and Co, Jigo Behind Mikt Square, Bwari - Abuja, F.C.T., in parte in Italia nel laboratorio della Geo s.r.l.

Caratteristiche geologiche del tratto di territorio in esame

I lineamenti geologici generali del Delta del Niger sono ampiamente trattati nel "The Niger Delta Petroleum System" dell'USGS a cura di TUTTLE M.L.W., CHARPENTIER R.R. & BROWN-FIELD M. E. (1999); una sintetica mappa geologica dell'area del Niger Delta è pubblicata dal FEDERAL MINISTRY OF MINES, POWER & STEEL (1984), ove sono riportate le principali formazioni presenti nel territorio nigeriano. La zona in cui ricadono le tre aree in studio fa parte del Niger Delta, ove sono presenti depositi attuali e recenti.

Le aree in esame sono ubicate nel delta del Fiume Niger, ad una distanza dalla costa atlantica rispettivamente di circa 70 Km Sapele, ricadente nel Delta State, e 100 Km Eyaen, nell'Edo State. Si tratta di una zona totalmente pianeggiante che è soggetta a continue inondazioni ad opera della marea, che raggiunge oscillazioni anche superiori a m 1,5.

La rete idrografica è quanto mai ricca ed articolata con corsi d'acqua caratterizzati da meandri liberi in continua evoluzione; la parte più prossima alla costa è praticamente un acquitrino con una fitta vegetazione a mangrovie.

Lo schema geologico di questa parte della Nigeria è riportato nella Figura 2, dove vengono distinte le seguenti formazioni:

Quaternario:

- Qa - Depositi alluvionali: torba, sabbie ed argille lacustri
 - Qm - Sabbie, argille e depositi di palude (paludi a mangrovie)
 - Qbr - Sabbie e ciottoli (linea di spiaggia abbandonata)
 - Qp - Sabbie ed argille (depositi sabbiosi di pianure costiere)
- ### Terziario
- Tm - Argille con scisti e calcari (Imo Clay - Shale Group)

Cretaceo

Kuc - Arenarie non stratificate, scisti e carbone

Paleozoico

Pcg - Graniti antichi (Basement Complex)

Pcm - Metascisti indifferenziati (Basement Complex)

Pcq - Quarziti (Basement Complex)

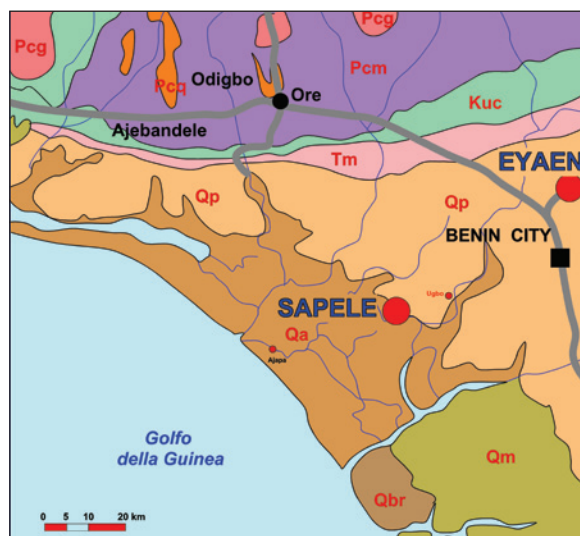


Fig. 2 – Schema geologico dell'area in studio

L'area in studio ricade nell'ambito dei depositi alluvionali quaternari, costituiti da spesse bancate di torbe, argille torbose con intercalati livelli di sabbie fini, poggianti su spessi depositi di sabbie e ghiaie.

La falda acquifera a Sapele si pone praticamente al piano di campagna; durante la perforazione dei sondaggi, non appena superato il primo strato di argille torbose soffici, si sono avuti fenomeni di artesianesimo, con fuoriuscita di acqua da boccaforo, risalente dagli strati sabbiosi inferiori; si tratta, quindi, di una falda confinata, al tetto, dallo strato di argille torbose. Ad Eyaen la falda è stata riscontrata solo in alcuni sondaggi, a profondità tra m 30 e 40 dal p.c..

Schema litologico delle due aree interessate

In tutte e due le aree analizzate si hanno depositi recenti costituiti da una alternanza di argille più o meno plastiche, sempre con contenuto di sostanza organica diffusa, talora con abbondanti tracce di ferro, e di orizzonti di sabbie e ghiaie, che fanno parte dei depositi di materiali fini dell'ampio delta del Fiume Niger, ove si è formato un complesso reticolo di corsi d'acqua, che hanno dato luogo ad una vastissima area paludosa, denominata localmente *mangrove swamp* per la copiosa presenza di vegetazione a mangrovie.

Nell'area di Sapele si ha una successione di livelli di argilla molto plastica grigio-bruna, localmente siltosa, contenente tracce di sostanza organica diffusa, con sporadici livelletti di limo scuro; tale formazione, facente parte di un ciclo di sedimentazione (*depobelts*) del Delta Niger (Stacher, 1995), viene designata, nel caso

in esame, con l'appellativo di *Mangrove Swamps*; essa ha uno spessore medio di circa m 10 e poggia su depositi incoerenti di sabbie e ghiaie; questi ultimi si rinvenivano anche con passaggi laterali eteropici ai sedimenti coesivi di cui sopra. Nello studio in esame si fa riferimento all'area in cui si ha una successione di livelli sub orizzontali con superfici di contatto pian-parallele, investigata dalla campagna di sondaggi geognostici P1 ÷ P5 e BH.6 ÷ BH.10, il cui schema litologico è evidenziato nella Figura 3.

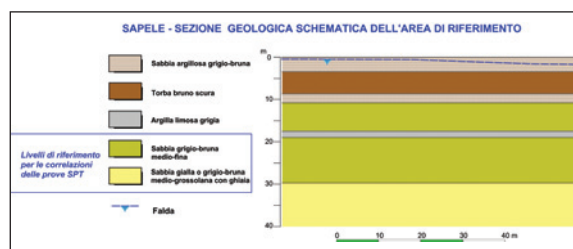


Fig. 3 – Schema litologico dell'area di riferimento di Sapele

Nell'area Eyaen si ha uno spesso deposito di argille mediamente plastiche, leggermente siltose, di colore rossastro per la presenza di ossidi di ferro, provenienti dall'erosione di formazioni lateritiche. Tale formazione, caratteristica della parte più interna del Delta Niger, denominata *Meander Belt* o *Back Swamps*, dà luogo lateralmente ad una formazione di argille rossastre (*coastal plain clays*) che si rinvenivano a Sud di Benin City.

Nello studio in esame si fa riferimento all'area in cui si ha una successione di livelli sub orizzontali con superfici di contatto pian-parallele, investigata dalla campagna di sondaggi geognostici BH.1 ÷ BH.12, il cui schema litologico è evidenziato nella Figura 4.

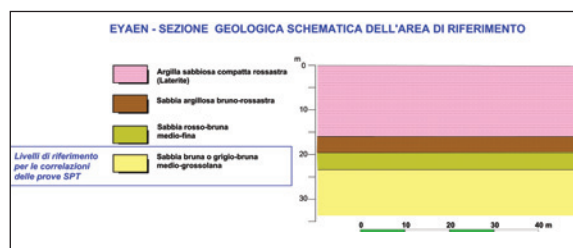


Fig. 4 – Schema litologico dell'area di riferimento di Eyaen

Prove Standard Penetration Test

Per le valutazioni delle correlazioni tra Nspt e valori di resistenza al taglio dei terreni incoerenti si è fatto riferimento alle prove S.P.T. effettuate nei livelli omogenei caratterizzati dall'appartenenza a due classi granulometriche distinte:

- Sabbie, da fini a grossolane, nell'area di Sapele: sono stati analizzati i dati di N° 48 prove;
- Sabbie e ghiaie, nell'area di Sapele: sono stati analizzati i dati di N° 48 prove;
- Sabbie, da fini a grossolane, di Eyaen: sono stati analizzati i dati di N° 34 prove.

In totale quindi si è fatto riferimento a N° 82 prove in sabbie e N° 48 in sabbie e ghiaia.

I valori degli N_{spt} ricavati dalle indagini in situ nelle due aree in esame sono state anzitutto corretti per la presenza dell'acqua, laddove rilevata, secondo la relazione di TERZAGHI & PECK (1948) valida per terreni a grana fine:

$$N' = 15 + \frac{1}{2} [N_{spt} - 15] \quad (1)$$

Successivamente i valori così ottenuti sono stati normalizzati secondo il criterio suggerito da SKEMPTON A.W. (1957):

$$N_{60} = N_{spt} \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R \quad (2)$$

in cui

N₆₀ valore normalizzato

N_{spt} valore misurato, assunto nel caso in esame già corretto per la presenza dell'acqua

C_E correzione per il rapporto di energia (C_E = E_R/60 energia standardizzata al 60%; essa viene misurata in cantiere con apposita strumentazione secondo le norme europee EN ISO 22476-3:2005; con procedura di strumentazione *Safety hammer* si ha un valore prossimo a C_E = 0,9)

C_B correzione per il diametro del foro, secondo i valori della Tabella 1

Diametro del foro	65 + 115 mm	C _B	1,0
	115 + 150 mm	C _B	1,05
	150 + 200 mm	C _B	1,15

Tabella 1 – Correzione diametro del foro

C_S correzione per il metodo di campionamento, con i valori come da Tabella 2

Tipo di campionatore	Standard	C _S	1,0
	Senza astuccio	C _S	1,2

Tabella 2 – Correzione metodo campionamento

C_R correzione per la lunghezza delle aste sotto la testa di battuta, come da Tabella 3

Lunghezza aste	3 + 4 m	C _R	0,75
	4 + 6 m	C _R	0,85
	6 + 10 m	C _R	0,95
	> 10 m	C _R	1,0

Tabella 3 – Correzione lunghezza aste

Per i terreni incoerenti, quali quelli in studio, ai valori N₆₀ così ottenuti va apportata la correzione per la tensione litostatica efficace per la determinazione dell'angolo di attrito interno (φ); in tal caso i valori assumono la sigla N1(60).

Poiché la *profondità della prova* influenza il risultato N_{spt}, come già detto, è stata apportata la correzione (per i soli terreni incoerenti) che tiene conto della *tensione litostatica efficace* (σ_v = γxh); tra le tante proposte formulate da molti AA. quella che sembra correntemente più utilizzata è quella di GIBBS & HOLTZ (1957), che introducono un fattore di correzione “C_N”, ricavabile dalla seguente relazione, al fine di riportare tutte le prove ad una tensione litostatica efficace pari a σ_v =

1 Kg/cm²:

$$C_N = 0,77 \times \log_{10} [20/\sigma_v] \quad (3)$$

Un'altra relazione, di più semplice applicazione, che tiene conto della tensione litostatica è stata proposta da LIAO & WHITMAN (1986):

$$C_N = \frac{1}{\sqrt{\sigma_v}} \quad (4)$$

I risultati delle due relazioni di cui sopra sono confrontabili nella Tabella 4, dalla quale si evince che il coefficiente C_N di LIAO & WHITMAN risulta leggermente più cautelativo per tensioni litostatiche maggiori di 1 Kg/cm²; pertanto nei calcoli di normalizzazione i valori N_{spt} per i terreni incoerenti [N1(60)] verrà adottata la suddetta relazione (4).

Tensione litostatica σ _v (Kg/cm ²)	N _{spt}	Gibbs & Holtz	Liao & Whitman
0,5	10	12,3	14,1
1,0	15	15,0	15,0
1,5	20	17,3	16,3
2,0	25	19,2	17,7

Tabella 4 – Raffronto tra le formule per la correzione per la tensione litostatica

Nelle Tabelle 5, 6 e 7 vengono riportati i valori normalizzati rispettivamente per le sabbie (Tabella 5 e 6) e per le sabbie e ghiaie (Tabella 7).

Caratteristiche granulometriche e di resistenza al taglio dei campioni prelevati

Nel corso delle indagini geotecniche eseguite nelle aree in studio sono stati prelevati molti campioni disturbati e semi-disturbati, tra cui sono stati scelti quelli prelevati in prossimità delle prove SPT sopra elencate.

In particolare sono stati analizzati i risultati delle caratteristiche granulometriche e di taglio dei seguenti campioni:

- N° 20 campioni prelevati ad Eyaen in corrispondenza di livelli sabbiosi;
- N° 26 campioni prelevati a Sapele in corrispondenza di livelli sabbiosi
- N° 17 campioni prelevati a Sapele in corrispondenza di livelli di sabbie con ghiaia.

Nella Tabella 8 sono riportate le profondità di prelievo dei campioni e le relative composizioni granulometriche.

Su tutti i campioni sono state eseguite le analisi granulometriche mediante vagliatura, i cui risultati sono compendati nelle Figure 5, per le sabbie, e 6 per le sabbie e ghiaie.

Nel complesso si hanno quindi:

- N° 46 campioni di sabbia, con la seguente composizione granulometrica:
Ghiaia 0 ÷ 5 % Sabbia 85 ÷ 100 % Limo/argilla 0 ÷ 10 %
rientrando nei campi granulometrici delle *sabbie* e delle *sabbie debolmente limose*.
 - N° 17 campioni di sabbia e ghiaia, con la seguente composizione granulometrica:
Ghiaia 1 ÷ 35 % Sabbia 60 ÷ 90 % Limo/argilla 0 ÷ 5 %
rientrando nei campi granulometrici delle *sabbie con ghiaia* e delle *sabbie debolmente limose* o *sabbie ghiaiose*.
- Su tutti i campioni sono state eseguite le prove di taglio diretto

NORMALIZZAZIONE N_{SPT}														
SAPELE - NIGERIA			DEPOSITI SABBIOSI					SONDAGGI P.3 + P.5 e BH.6 - BH.7 (ANNO 2006)						
Sondaggio	Falda	Peso specifico immerso (gr/cm^3) =	1,900		Valori rilevati	Correzione per acqua	N(60)					Correzione per tensione litostatica		
N°	(m)	Profondità (m)	σ_v (Kg/cm ²)	U (Kg/cm ²)	σ_v' (Kg/cm ²)	Nspt	N'spt	Rapporto di energia (Ce)	Diametro del foro (Cb)	Tipo di campionatore (Cs)	Lunghezza aste (Cr)	N(60)	C_N	N1(60)
P.3	1,60	13,00	2,47	1,15	1,32	14	14,6	0,9	1	1	1	13,06	0,87	11,38
	1,60	17,00	3,23	1,55	1,88	15	15,0	0,9	1	1	1	13,80	0,77	10,42
	1,60	20,00	3,89	1,85	1,96	16	16,0	0,9	1	1	1	13,90	0,72	9,67
	1,60	22,00	4,18	2,05	2,13	20	17,8	0,9	1	1	1	16,75	0,68	10,79
P.4	1,60	26,00	4,94	2,45	2,49	23	19,0	0,9	1	1	1	17,10	0,63	10,84
	1,60	10,00	1,90	0,85	1,05	7	11,0	0,9	1	1	1	9,90	0,98	9,66
	1,60	12,00	2,28	1,05	1,23	4	9,6	0,9	1	1	1	8,58	0,90	7,71
	1,60	14,00	2,66	1,25	1,41	9	12,0	0,9	1	1	1	10,80	0,84	9,10
P.5	1,60	16,00	3,04	1,45	1,89	10	12,5	0,9	1	1	1	11,25	0,79	8,92
	1,60	18,00	3,42	1,65	1,77	13	14,0	0,9	1	1	1	12,60	0,75	9,47
	1,60	22,00	4,18	2,05	2,13	7	11,0	0,9	1	1	1	9,90	0,68	6,78
	1,60	24,00	4,56	2,25	2,31	38	26,5	0,9	1	1	1	23,85	0,66	15,69
	1,60	26,00	4,94	2,45	2,49	16	16,0	0,9	1	1	1	13,60	0,63	8,66
	1,60	30,00	5,70	2,85	2,86	32	23,5	0,9	1	1	1	21,15	0,69	12,63
	1,60	32,00	6,08	3,05	3,03	33	24,0	0,9	1	1	1	21,60	0,67	12,41
	0,10	10,50	2,00	1,04	0,96	34	24,5	0,9	1	1	1	22,05	1,02	22,66
	0,10	12,00	2,28	1,19	1,09	35	25,0	0,9	1	1	1	22,50	0,96	21,55
	0,10	13,50	2,67	1,34	1,23	36	25,5	0,9	1	1	1	22,95	0,90	20,74
	0,10	15,00	2,85	1,49	1,36	37	26,0	0,9	1	1	1	23,40	0,86	20,07
	0,10	16,50	3,14	1,64	1,50	38	26,5	0,9	1	1	1	23,85	0,82	19,51
BH.6	0,10	18,00	3,42	1,79	1,63	39	27,0	0,9	1	1	1	24,30	0,78	19,03
	0,10	24,00	4,56	2,39	2,17	40	27,5	0,9	1	1	1	24,75	0,68	16,80
	0,10	26,50	4,85	2,54	2,31	41	28,0	0,9	1	1	1	25,20	0,66	16,60
	0,10	27,00	5,13	2,69	2,44	42	28,5	0,9	1	1	1	25,65	0,64	16,42
	0,10	28,50	5,42	2,84	2,58	43	29,0	0,9	1	1	1	26,10	0,62	16,26
	0,10	30,00	5,70	2,99	2,71	44	29,5	0,9	1	1	1	26,55	0,61	16,13
	0,10	31,50	5,99	3,14	2,85	45	30,0	0,9	1	1	1	27,00	0,59	16,01
	0,10	33,00	6,27	3,29	2,98	46	30,5	0,9	1	1	1	27,45	0,58	15,90
	0,10	34,50	6,56	3,44	3,12	47	31,0	0,9	1	1	1	27,90	0,57	15,81
	0,10	36,00	6,84	3,59	3,25	48	31,5	0,9	1	1	1	28,35	0,55	15,73
	0,10	37,50	7,13	3,74	3,39	49	32,0	0,9	1	1	1	28,80	0,54	15,65
	0,10	39,00	7,41	3,89	3,52	50	32,5	0,9	1	1	1	29,25	0,53	15,59
	0,10	42,00	7,98	4,19	3,79	51	33,0	0,9	1	1	1	29,70	0,51	15,28
	0,10	43,50	8,27	4,34	3,93	52	33,5	0,9	1	1	1	30,15	0,50	15,22
	BH.7	0,10	12,00	2,28	1,19	1,09	53	34,0	0,9	1	1	1	30,60	0,96
0,10		13,50	2,67	1,34	1,23	54	34,5	0,9	1	1	1	31,05	0,90	28,05
0,10		15,00	2,85	1,49	1,36	55	35,0	0,9	1	1	1	31,50	0,86	27,01
0,10		16,50	3,14	1,64	1,50	56	35,5	0,9	1	1	1	31,95	0,82	26,13
0,10		18,00	3,42	1,79	1,63	57	36,0	0,9	1	1	1	32,40	0,78	25,38
0,10		24,00	4,56	2,39	2,17	58	36,5	0,9	1	1	1	32,85	0,68	22,30
0,10		26,50	4,85	2,54	2,31	59	37,0	0,9	1	1	1	33,30	0,66	21,93
0,10		27,00	5,13	2,69	2,44	60	37,5	0,9	1	1	1	33,75	0,64	21,61
0,10		28,50	5,42	2,84	2,58	61	38,0	0,9	1	1	1	34,20	0,62	21,31
0,10		30,00	5,70	2,99	2,71	62	38,5	0,9	1	1	1	34,65	0,61	21,05
0,10		31,50	5,99	3,14	2,85	63	39,0	0,9	1	1	1	35,10	0,59	20,81
0,10		33,00	6,27	3,29	2,98	64	39,5	0,9	1	1	1	35,55	0,58	20,59
0,10		36,00	6,84	3,59	3,25	65	40,0	0,9	1	1	1	36,00	0,55	19,97
0,10	37,50	7,13	3,74	3,39	66	40,5	0,9	1	1	1	36,45	0,54	19,81	

Tabella 5
– Sapele –
Sabbie – Valori
normalizzati
[N1(60)]

NORMALIZZAZIONE N_{SPT}												
EYAEN, EDO STATE - POWER STATION			DEPOSITI SABBIOSI				SONDAGGI BH.3 - BH.8 - BH.12 (ANNO 2006)					
Sondaggio	Falda	Peso specifico (gr/cm ³) =	1,900	Valori rilevati	Correzione per acqua	N(60)				Correzione per tensione litostatica		
N°	(m)	Profondità (m)	Tensione efficace σ_v (Kg/cm ²)	Nspt	N'spt	Rapporto di energia (Ce)	Diametro del foro (Cb)	Tipo di campionatore (Cs)	Lunghezza aste (Cr)	N(60)	C _N	N1(60)
BH.3	50,00	22,50	4,28	31	31,0	0,9	1	1	1	27,90	0,48	13,49
	50,00	24,00	4,56	30	30,0	0,9	1	1	1	27,00	0,47	12,64
	50,00	25,50	4,85	28	28,0	0,9	1	1	1	26,20	0,46	11,45
	50,00	27,00	5,13	29	29,0	0,9	1	1	1	26,10	0,44	11,52
	50,00	28,50	5,42	32	32,0	0,9	1	1	1	28,80	0,43	12,38
	50,00	30,00	5,70	29	29,0	0,9	1	1	1	26,10	0,42	10,93
	50,00	31,50	5,99	33	33,0	0,9	1	1	1	29,70	0,41	12,14
	50,00	33,00	6,27	47	47,0	0,9	1	1	1	42,30	0,40	16,89
	50,00	36,00	6,84	59	59,0	0,9	1	1	1	53,10	0,38	20,30
	50,00	34,50	6,56	51	51,0	0,9	1	1	1	45,90	0,39	17,93
	50,00	37,50	7,13	86	86,0	0,9	1	1	1	77,40	0,37	29,00
	50,00	39,00	7,41	52	62,0	0,9	1	1	1	46,80	0,37	17,19
BH.8	50,00	34,50	6,56	51	51,0	0,9	1	1	1	45,90	0,39	17,93
	50,00	24,00	4,56	28	28,0	0,9	1	1	1	25,20	0,47	11,80
	50,00	25,50	4,85	33	33,0	0,9	1	1	1	29,70	0,45	13,49
	50,00	27,00	5,13	44	44,0	0,9	1	1	1	39,60	0,44	17,48
	50,00	28,50	5,42	47	47,0	0,9	1	1	1	42,30	0,43	18,18
	50,00	30,00	5,70	71	71,0	0,9	1	1	1	63,90	0,42	26,76
	50,00	31,50	5,99	33	33,0	0,9	1	1	1	29,70	0,41	12,14
	50,00	33,00	6,27	94	94,0	0,9	1	1	1	84,60	0,40	33,79
	50,00	34,50	6,56	84	84,0	0,9	1	1	1	75,60	0,39	29,53
	50,00	36,00	6,84	80	80,0	0,9	1	1	1	72,00	0,38	27,53
	50,00	37,50	7,13	82	82,0	0,9	1	1	1	73,80	0,37	27,66
	50,00	39,00	7,41	63	63,0	0,9	1	1	1	56,70	0,37	20,83
BH.12	50,00	24,00	4,56	30	30,0	0,9	1	1	1	27,00	0,47	12,64
	50,00	25,50	4,85	40	40,0	0,9	1	1	1	36,00	0,45	16,36
	50,00	27,00	5,13	41	41,0	0,9	1	1	1	36,90	0,44	16,29
	50,00	28,50	5,42	38	38,0	0,9	1	1	1	34,20	0,43	14,70
	50,00	30,00	5,70	40	40,0	0,9	1	1	1	36,00	0,42	16,08
	50,00	31,50	5,99	59	59,0	0,9	1	1	1	53,10	0,41	21,71
	50,00	33,00	6,27	83	83,0	0,9	1	1	1	74,70	0,40	29,83
	50,00	34,50	6,56	87	87,0	0,9	1	1	1	78,30	0,39	30,58
	50,00	36,00	6,84	91	91,0	0,9	1	1	1	81,90	0,38	31,32
	50,00	37,50	7,13	88	88,0	0,9	1	1	1	79,20	0,37	29,67

Tabella 6
Eyaen –
Sabbie – Valori
normalizzati
[N1(60)]

NORMALIZZAZIONE N_{SPT}

NORMALIZZAZIONE N _{SPT}														
SAPELE - NIGERIA			DEPOSITI GHIAIOSI					SONDAGGI BH.7 + BH.10 (ANNO 2006)						
Sondaggio	Falda	Peso specifico immerso (gr/cm ³) =	1,900			Valori rilevati	Correzione per acqua	N(60)					Correzione per tensione litostatica	
N°	(m)	Profondità (m)	σ _v (Kg/cm ²)	U (Kg/cm ²)	σ _v ' (Kg/cm ²)	N _{spt}	N'spt	Rapporto di energia (Ce)	Diametro del foro (Cb)	Tipo di campionatore (Cc)	Lunghezza aste (Cr)	N(60)	C _N	N1(60)
BH.7	0,10	12,00	2,28	1,19	1,09	53	34,0	0,9	1	1	1	30,60	0,96	29,31
	0,10	13,50	2,57	1,34	1,23	54	34,5	0,9	1	1	1	31,05	0,90	28,05
	0,10	15,00	2,85	1,49	1,36	55	35,0	0,9	1	1	1	31,50	0,86	27,01
	0,10	16,50	3,14	1,64	1,50	56	35,5	0,9	1	1	1	31,95	0,82	26,13
	0,10	18,00	3,42	1,79	1,63	57	36,0	0,9	1	1	1	32,40	0,78	25,38
	0,10	24,00	4,56	2,39	2,17	58	36,5	0,9	1	1	1	32,85	0,68	22,30
	0,10	25,50	4,85	2,54	2,31	59	37,0	0,9	1	1	1	33,30	0,66	21,93
	0,10	27,00	5,13	2,69	2,44	60	37,5	0,9	1	1	1	33,75	0,64	21,61
	0,10	28,50	5,42	2,84	2,58	61	38,0	0,9	1	1	1	34,20	0,62	21,31
	0,10	30,00	5,70	2,99	2,71	62	38,5	0,9	1	1	1	34,65	0,61	21,06
	0,10	31,50	5,99	3,14	2,85	63	39,0	0,9	1	1	1	35,10	0,59	20,81
	0,10	33,00	6,27	3,29	2,98	64	39,5	0,9	1	1	1	35,55	0,58	20,59
	0,10	36,00	6,84	3,59	3,25	65	40,0	0,9	1	1	1	36,00	0,55	19,97
	0,10	37,50	7,13	3,74	3,39	66	40,5	0,9	1	1	1	36,45	0,54	19,81
BH.8	0,10	10,50	2,00	1,04	0,96	67	41,0	0,9	1	1	1	36,90	1,02	37,78
	0,10	12,00	2,28	1,19	1,09	68	41,5	0,9	1	1	1	37,35	0,96	35,77
	0,10	13,50	2,57	1,34	1,23	69	42,0	0,9	1	1	1	37,80	0,90	34,15
	0,10	15,00	2,85	1,49	1,36	70	42,5	0,9	1	1	1	38,25	0,86	32,80
	0,10	16,50	3,14	1,64	1,50	71	43,0	0,9	1	1	1	38,70	0,82	31,65
	0,10	19,50	3,71	1,94	1,77	72	43,5	0,9	1	1	1	39,15	0,75	29,47
	0,10	21,00	3,99	2,09	1,90	73	44,0	0,9	1	1	1	39,60	0,73	28,73
	0,10	22,50	4,28	2,24	2,04	74	44,5	0,9	1	1	1	40,05	0,70	28,08
	0,10	24,00	4,56	2,39	2,17	75	45,0	0,9	1	1	1	40,50	0,68	27,49
	0,10	25,50	4,85	2,54	2,31	76	45,5	0,9	1	1	1	40,95	0,66	26,97
	0,10	27,00	5,13	2,69	2,44	77	46,0	0,9	1	1	1	41,40	0,64	26,50
	0,10	28,50	5,42	2,84	2,58	78	46,5	0,9	1	1	1	41,85	0,62	26,08
	0,10	15,00	2,85	1,49	1,36	79	47,0	0,9	1	1	1	42,30	0,66	35,27
	0,10	16,50	3,14	1,64	1,50	80	47,5	0,9	1	1	1	42,75	0,62	34,96
BH.9	0,10	18,00	3,42	1,79	1,63	81	48,0	0,9	1	1	1	43,20	0,78	33,84
	0,10	19,50	3,71	1,94	1,77	82	48,5	0,9	1	1	1	43,65	0,75	32,86
	0,10	21,00	3,99	2,09	1,90	83	49,0	0,9	1	1	1	44,10	0,73	31,99
	0,10	22,50	4,28	2,24	2,04	84	49,5	0,9	1	1	1	44,55	0,70	31,23
	0,10	24,00	4,56	2,39	2,17	85	50,0	0,9	1	1	1	45,00	0,68	30,55
	0,10	25,50	4,85	2,54	2,31	86	50,5	0,9	1	1	1	45,45	0,66	29,94
	0,10	27,00	5,13	2,69	2,44	87	51,0	0,9	1	1	1	45,90	0,64	29,38
	0,10	28,50	5,42	2,84	2,58	88	51,5	0,9	1	1	1	46,35	0,62	28,88
	0,10	30,00	5,70	2,99	2,71	89	52,0	0,9	1	1	1	46,80	0,61	28,43
	0,10	31,50	5,99	3,14	2,85	90	52,5	0,9	1	1	1	47,25	0,59	28,01
	0,10	33,00	6,27	3,29	2,98	91	53,0	0,9	1	1	1	47,70	0,58	27,63
	0,10	10,5	2,00	1,04	0,96	92	53,5	0,9	1	1	1	48,15	1,02	49,27
	0,10	12,00	2,28	1,19	1,09	93	54,0	0,9	1	1	1	48,60	0,96	46,55
	BH.10	0,10	13,50	2,57	1,34	1,23	94	54,5	0,9	1	1	1	49,05	0,90
0,10		15,00	2,85	1,49	1,36	95	55,0	0,9	1	1	1	49,50	0,86	42,45
0,10		16,50	3,14	1,64	1,50	96	55,5	0,9	1	1	1	49,95	0,82	40,55
0,10		24,00	4,56	2,39	2,17	97	56,0	0,9	1	1	1	50,40	0,68	34,21
0,10		25,50	4,85	2,54	2,31	98	56,5	0,9	1	1	1	50,85	0,66	33,48
0,10		27,00	5,13	2,69	2,44	99	57,0	0,9	1	1	1	51,30	0,64	32,84
0,10	28,50	5,42	2,84	2,58	100	57,5	0,9	1	1	1	51,75	0,62	32,25	

Tabella 7
Sapele – Sabbie
e ghiaie - Valori
normalizzati
[N1(60)]

EYAE		SAPELE		SAPELE	
Sabbie		Sabbie		Sabbie e ghiaie	
Profondità (m)	Granulometria	Profondità (m)	Granulometria	Profondità (m)	Granulometria
22,5	Sabbia	10,5	Sabbia	12,0	Sabbia ghiaiosa
24,0	Sabbia	12,0	Sabbia debolmente limosa	13,5	Sabbia con ghiaia
25,5	Sabbia debolmente limosa	13,0	Sabbia	15,0	Sabbia debolmente ghiaiosa
25,5	Sabbia	13,5	Sabbia	16,5	Sabbia con ghiaia
27,0	Sabbia	14,0	Sabbia	16,5	Sabbia ghiaiosa
28,5	Sabbia	15,0	Sabbia	18,0	Sabbia ghiaiosa
28,5	Sabbia debolmente limosa	16,5	Sabbia debolmente limosa	19,5	Sabbia debolmente ghiaiosa
30,0	Sabbia con tracce di limo	18,0	Sabbia	22,5	Sabbia ghiaiosa
30,0	Sabbia	18,0	Sabbia	24,0	Sabbia ghiaiosa
31,5	Sabbia	20,0	Sabbia	24,0	Sabbia con ghiaia
31,5	Sabbia	24,0	Sabbia	25,5	Sabbia ghiaiosa
31,5	Sabbia	24,0	Sabbia	25,5	Sabbia ghiaiosa
33,0	Sabbia debolmente limosa	25,5	Sabbia debolmente limosa	27,0	Sabbia debolmente ghiaiosa
34,5	Sabbia	26,0	Sabbia	28,5	Sabbia ghiaiosa
34,5	Sabbia	26,0	Sabbia con tracce di limo	28,5	Sabbia con ghiaia
36,0	Sabbia	28,5	Sabbia	30,0	Sabbia ghiaiosa
36,0	Sabbia debolmente limosa	28,5	Sabbia	33,0	Sabbia ghiaiosa
37,5	Sabbia	30,0	Sabbia		
37,5	Sabbia	31,5	Sabbia		
39,0	Sabbia debolmente limosa	32,0	Sabbia		
		33,0	Sabbia		
		34,5	Sabbia debolmente limosa		
		36,0	Sabbia		
		37,5	Sabbia		
		39,0	Sabbia		
		43,5	Sabbia		
N° 20 campioni		N° 26 campioni		N° 17 campioni	

Tabella 8
Profondità
di prelievo e
caratteristiche
granulometriche
dei campioni

consolidate drenate (CD) condotte su N° 3 provini per ciascuna prova, sottoposti a tre diversi gradini di carico scelti nell'intorno della tensione litostatica esistente alla profondità di prelievo dei campioni stessi.

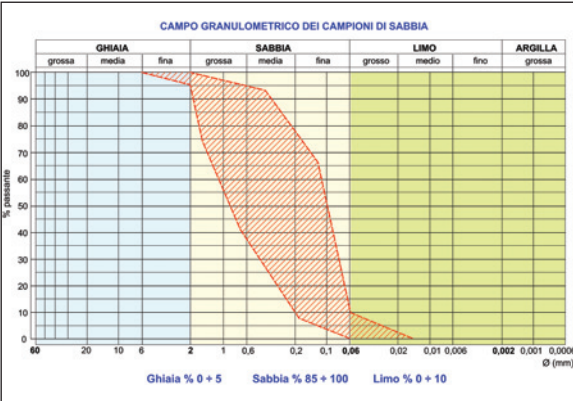


Fig. 5 – Campo granulometrico dei campioni di sabbia

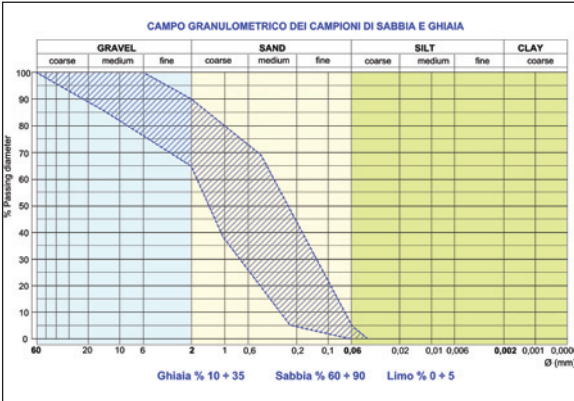


Fig. 6 – Campo granulometrico dei campioni di sabbia e ghiaia

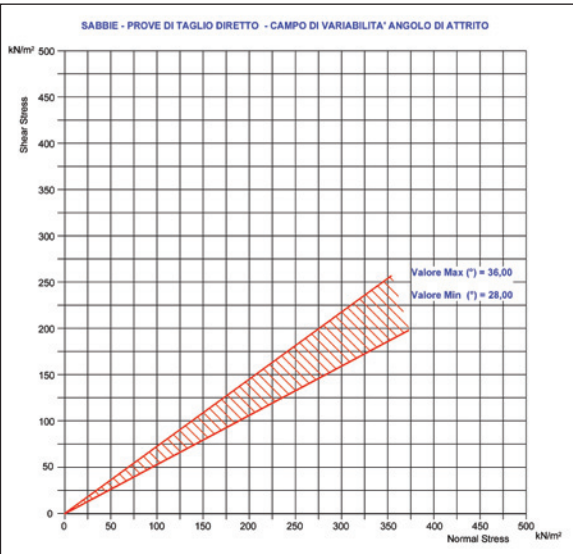


Fig. 7 – Grafico delle prove di taglio diretto CD per i campioni di sabbie

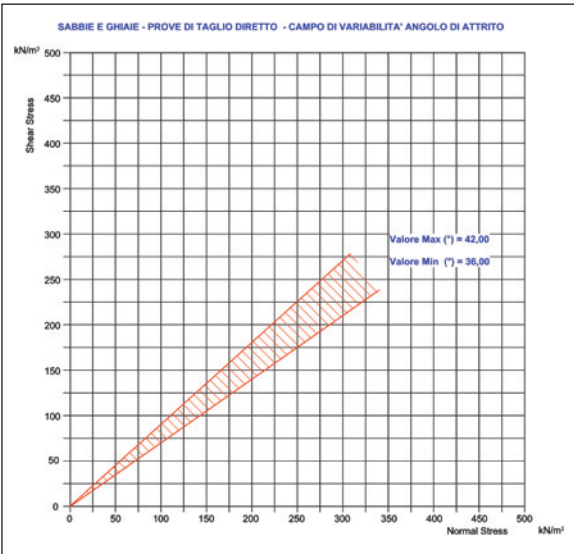


Fig. 8 – Grafico delle prove di taglio diretto CD per i campioni di sabbie e ghiaie

Sintesi risultati delle prove di TD CD	Eyaen	Sapele	Sapele
	Sabbie	Sabbie	Sabbie e ghiaia
Angolo di attrito interno (°)			
Valore Massimo	36,0	33,5	42,0
Valore Minimo	29,7	28,0	36,0
Valore Medio	33,2	31,7	38,2

Tabella 9 – Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto CD

EYAE		SAPELE		SAPELE	
Sabbie		Sabbie		Sabbie e ghiaie	
Profondità (m)	Angolo di attrito interno (°)	Profondità (m)	Angolo di attrito interno (°)	Profondità (m)	Angolo di attrito interno (°)
22,5	29,7	10,5	29,5	12,0	37,0
24,0	30,2	12,0	30,0	13,5	38,5
25,5	31,0	13,0	31,0	15,0	37,5
25,5	32,5	13,5	28,0	16,5	38,0
27,0	32,4	14,0	29,8	16,5	38,6
28,5	33,0	15,0	30,5	18,0	38,0
28,5	31,5	16,5	31,5	19,5	39,0
30,0	32,3	18,0	32,0	22,5	38,0
30,0	34,0	18,0	32,5	24,0	37,0
31,5	31,2	20,0	30,0	24,0	37,0
31,5	33,0	24,0	31,0	25,5	36,5
31,5	32,0	24,0	32,0	25,5	39,0
33,0	35,5	25,5	32,5	27,0	37,5
34,5	34,0	26,0	33,0	28,5	36,0
34,5	34,0	26,0	33,5	28,5	39,5
36,0	35,2	28,5	32,0	30,0	40,0
36,0	35,5	28,5	33,5	33,0	42,0
37,5	34,5	30,0	32,0		
37,5	36,0	31,5	32,5		
39,0	35,5	32,0	32,0		
		33,0	33,0		
		34,5	32,4		
		36,0	32,0		
		37,5	33,0		
		39,0	31,2		
		43,5	32,8		
N° 20 campioni		N° 26 campioni		N° 17 campioni	

Tabella 10

Risultati delle prove di taglio diretto CD

AUTORE	Anno	Condizioni	Formula
PECK, HANSON, THORNBURN, MEYERHOF	1956		$\varphi' = 27,2 + 0,28N_{spt}$
MEYERHOF	1956	Sabbie fini e sabbie limose	$\varphi' = 19,8 + 4,38 \cdot \ln N_{spt}$
MEYERHOF	1956	Sabbie medie e grosse	$\varphi' = 25,2 + 4,28 \cdot \ln N_{spt}$
OWASAKI & IWASAKI	1959		$\varphi' = \sqrt{(20N_{spt}) + 15}$
SOWERS	1961	Per $\sigma > 0,5 \text{ Kg/cm}^2$	$\varphi' = 28,3 + 0,27N_{spt}$
MALCEV	1964	Per profondità $> m \ 2$	$\varphi' = 18,9 - 5 \cdot \ln(\sigma'_v) + 4 \cdot \ln(N_{spt})$
KISHIDA	1967		$\varphi' = \sqrt{20N_{spt} + 15}$
DE MELLO	1971		$\varphi' = \tan^{-1} \left[0,21 + 0,631 \cdot \log \left(\frac{N_{spt}}{\sigma'} \right) \right]$
MUROMACHI ET AL.	1974		$\varphi' = \sqrt{3,5N_{spt} + 20}$
PECK, HANSON, THORNBURN	1974		$\varphi' = 21,2 + 2,7 \cdot \sqrt{N_{(60)}}$
SHIOI E FUKUNI (ROAD BRIDGE SPECIFICATION)	1982		$\varphi' = \sqrt{15N_{spt} + 15}$
SHIOI E FUKUNI (JAPANESE NATIONAL RAILWAY)	1982		$\varphi' = 0,3 \cdot N_{spt} + 27$
WOLFF	1989		$\varphi' = 27,1 + 0,3 \cdot N_{160} - 0,00054 \cdot (N_{1(60)})^2$
HATANAKA & UCHIDA	1996		$\varphi' = 20 + \sqrt{15,4 \cdot N_{1(60)}}$

Tabella 11

Formule per la correlazione tra N_{spt} ed angolo di attrito

Correlazioni tra N_{spt} ed angolo di attrito interno

Nella letteratura geotecnica inerente alla resistenza al taglio dei terreni incoerenti esistono numerose correlazioni tra i valori di N_{spt} e l'angolo di attrito interno, tra le quali si riportano le più utilizzate, proposte da molti AA nel periodo compreso tra il 1956 ed il 1996, le cui formule sono esposte nella seguente Tabella 11.

Dall'esame delle relazioni proposte dai vari AA, esposte nella Tabella 11 (13 in tutto), si evidenzia che molte di esse si basano sul valore N_{spt} rilevato in campagna (11 formule), altre (2) tengono conto del valore normalizzato N₍₆₀₎, una tiene conto del valore N₁₍₆₀₎ e solo in una viene calcolata la tensione litostatica.

Sono stati eseguiti numerosi calcoli per valutare la differenza dei risultati tra le varie formule e ne è derivato che per un

dato valore di N_{spt} si ottengono risultati molto discordanti, con differenze di valori talora molto elevati. Per visualizzare i risultati derivanti dall'applicazione delle varie formule sono stati eseguiti, a titolo puramente esplicativo, i calcoli relativi ad alcuni valori di N_{spt} , esposti in Tabella 12, scelti tra quelli effettuati nelle aree in studio.

Nella Tabella 13 è riportato il calcolo del valore dell'angolo di attrito in accordo alle formule proposte dagli AA. di cui alla Tabella 11, da cui risultano differenze sostanziali; difatti per valori di N_{spt} inferiori a 15 si hanno differenze anche di 11°, mentre per valori superiori tali differenze raggiungono quasi 18° (cfr. Tabella 14 e Figura 9).

Profondità	Tensione litostatica efficace	Falda	N_{spt}	$N(60)$	$N1(60)$
(m)	σ'_v (Kg/cm ²)	(m dal p.c.)			
10,0	1,05	1,50	7	9,90	9,66
13,0	1,32	1,50	14	13,05	11,36
16,0	1,59	1,50	10	11,25	8,92
20,0	1,95	1,50	15	13,50	9,67
24,0	2,31	1,50	38	23,85	15,69
30,0	2,71	0,10	44	26,55	16,13
36,0	3,25	0,10	48	28,35	15,73

Tabella 12 – Dati assunti per la determinazione dell'angolo di attrito con varie formule

VALORI DELL'ANGOLO DI ATTRITO (°)																			
Prova	Prof.	Tens. Ut. eff.	Falda (m dal p.c.)	N _{spt}	N(60)	N1(60)	Peck, Hanson, et Al.(1956)	Meyerhof (1956)	Owasaki & Iwasaki (1959)	Sowers (1961)	Malcev (1964)	Kishida (1967)	De Mello (1971)	Muromachi & Al (1974)	Peck, Hanson, et Al.(1974)	Shioi & Fukuni (1982)	Shioi & Fukuni (1982)	Wolff (1989)	Hatanaka & Ughida (1996)
N°	(m)	σ _v (Kg/cm ²)																	
1	10,0	1,05	1,50	7	9,90	9,66	29,16	28,32	26,83	30,19	26,43	26,83	36,125	24,95	29,70	25,25	29,10	29,95	32,20
2	13,0	1,32	1,50	14	13,05	11,36	31,12	31,36	31,73	32,08	27,98	31,73	40,601	27,00	30,95	29,49	31,20	30,44	33,23
3	16,0	1,59	1,50	10	11,25	8,92	30,00	29,89	29,14	31,00	25,65	29,14	35,524	25,92	30,26	27,25	30,00	29,73	31,72
4	20,0	1,95	1,50	15	13,50	9,67	31,40	31,66	32,32	32,35	26,19	32,32	37,564	27,25	31,12	30,00	31,50	29,95	32,20
5	24,0	2,31	1,50	38	23,85	15,69	37,84	35,73	42,57	38,56	29,01	42,57	44,345	31,53	34,39	38,87	38,40	31,67	35,54
6	30,0	2,71	0,10	44	26,55	16,13	39,52	36,37	44,66	40,18	28,75	44,66	44,240	32,41	35,11	40,69	40,20	31,80	35,76
7	36,0	3,25	0,10	48	28,35	15,73	40,64	36,76	45,98	41,26	28,14	45,98	43,467	32,96	35,58	41,83	41,40	31,69	35,56

Tabella 13 – Calcolo dell'angolo di attrito interno con formule di vari AA

DIFFERENZE DI VALORI DELL'ANGOLO DI ATTRITO (°)									
Prova	Prof.	Tens. Lit. eff.	Falda	N_{spt}	$N(60)$	$N1(60)$	VALORI Max (°)	VALORI Min (°)	Differenza (°)
N°	(m)	σ'_v (Kg/cm ²)	(m dal p.c.)						
1	10,0	1,05	1,50	7	9,90	9,66	36,13	24,95	11,18
2	13,0	1,32	1,50	14	13,05	11,36	40,60	27,00	13,60
3	16,0	1,59	1,50	10	11,25	8,92	35,52	25,65	9,87
4	20,0	1,95	1,50	15	13,50	9,67	37,56	26,19	11,37
5	24,0	2,31	1,50	38	23,85	15,69	44,35	29,01	15,33
6	30,0	2,71	0,10	44	26,55	16,13	44,66	28,75	15,91
7	36,0	3,25	0,10	48	28,35	15,73	45,98	28,14	17,85

Tabella 14 – Differenze dei valori di cui alla Tabella 13

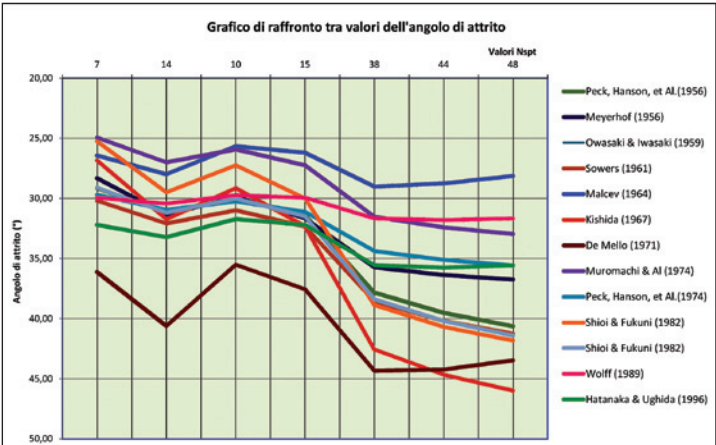


Fig. 9 – Grafico dei valori dell'angolo di attrito di cui alla Tabella 13

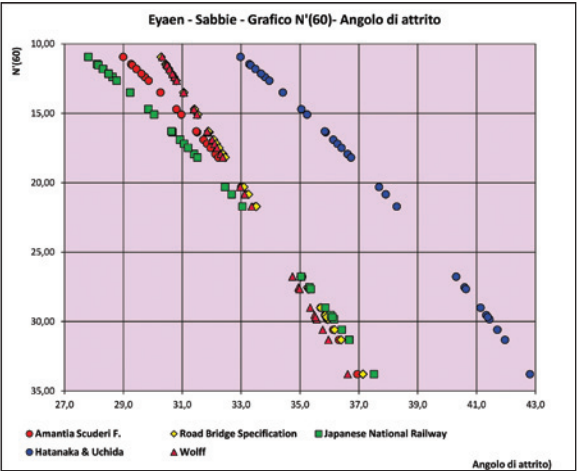


Fig. 10 – Eyaen – Sabbie: Grafico di confronto

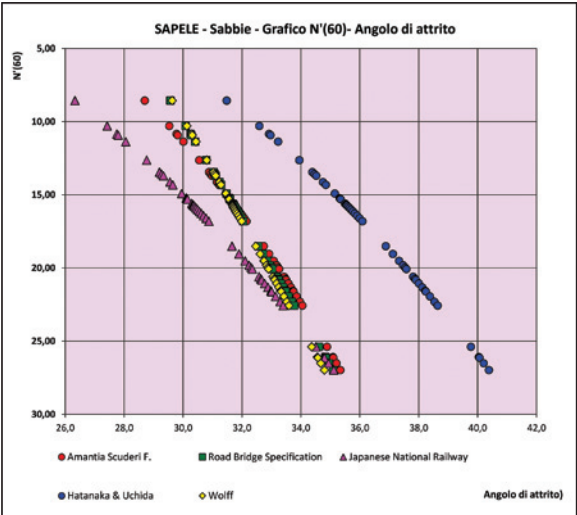


Fig. 11 – Sapele – Sabbie: Grafico di confronto

Angolo di attrito (°)					
N1(60)	Amantia Scuderi F.	Road Bridge Specification	Japanese National Railway	Hatanaka & Uchida	Wolff
20,74	35,6	33,2	32,6	37,9	33,1
20,81	35,6	33,2	32,7	37,9	33,1
21,05	35,7	33,3	32,8	38,0	33,2
21,31	35,8	33,4	32,9	38,1	33,2
21,55	35,8	33,5	33,0	38,2	33,3
21,61	35,9	33,5	33,0	38,2	33,3
21,93	36,0	33,6	33,1	38,4	33,4
22,30	36,1	33,7	33,3	38,5	33,5
22,56	36,1	33,8	33,4	38,6	33,6
25,38	36,8	34,6	34,5	39,8	34,4
26,08	37,0	34,8	34,8	40,0	34,6
26,13	37,0	34,8	34,8	40,1	34,6
26,50	37,1	35,0	34,9	40,2	34,7
26,97	37,2	35,1	35,1	40,4	34,8
27,01	37,2	35,1	35,1	40,4	34,8
27,49	37,4	35,2	35,3	40,6	34,9
27,63	37,4	35,3	35,4	40,6	35,0
28,01	37,5	35,4	35,5	40,8	35,1
28,05	37,5	35,4	35,5	40,8	35,1
28,08	37,5	35,4	35,5	40,8	35,1
28,43	37,6	35,5	35,7	40,9	35,2
28,73	37,6	35,6	35,8	41,0	35,3
28,88	37,7	35,7	35,8	41,1	35,3
29,31	37,8	35,8	36,0	41,2	35,4
29,38	37,8	35,8	36,0	41,3	35,4
29,47	37,8	35,8	36,0	41,3	35,5
29,94	37,9	36,0	36,2	41,5	35,6
30,55	38,1	36,2	36,4	41,7	35,8
31,23	38,2	36,4	36,6	41,9	35,9
31,65	38,3	36,5	36,8	42,1	36,1
31,99	38,4	36,6	36,9	42,2	36,1
32,25	38,4	36,7	37,0	42,3	36,2
32,80	38,5	36,8	37,2	42,5	36,4
32,84	38,6	36,9	37,2	42,5	36,4
32,86	38,6	36,9	37,2	42,5	36,4
33,49	38,7	37,0	37,4	42,7	36,5
33,84	38,8	37,2	37,5	42,8	36,6
34,15	38,8	37,2	37,6	42,9	36,7
34,21	38,8	37,3	37,7	43,0	36,7
34,96	39,0	37,5	37,9	43,2	36,9
35,77	39,2	37,7	38,2	43,5	37,1
36,27	39,3	37,9	38,3	43,6	37,3
37,76	39,5	38,3	38,6	44,1	37,7
40,85	40,1	39,3	39,6	45,1	38,5
42,45	40,4	39,7	40,2	45,6	38,9
44,32	40,8	40,3	40,8	46,1	39,3
46,55	41,1	41,0	41,4	46,8	39,9
49,27	41,6	41,8	42,2	47,5	40,6

Tabella 18 – Sapele - Prove in sabbie e ghiaia

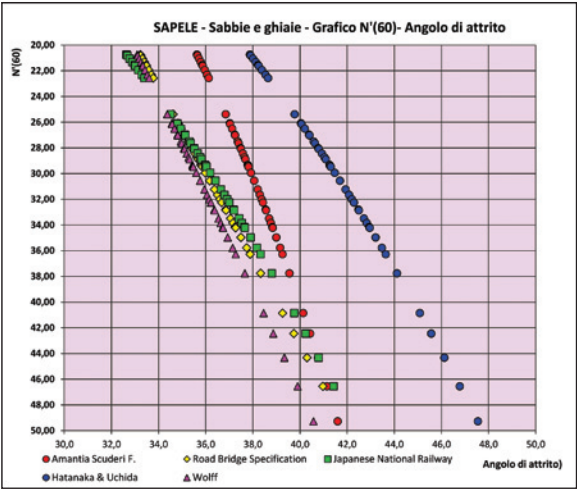


Fig. 12 – Sapele – Sabbie e ghiaie: Grafico di confronto

Nei suddetti grafici la distribuzione dei valori da taglio diretto e ricavati dalla (5) risultano occupare delle aree confrontabili e sovrapponibili, come evidenziato dalle linee di tendenza che nella Figura 13 (sabbie di Eyaen) praticamente si sovrappongono; nelle Figura 14 (sabbie di Sapele) e 15 (sabbie e ghiaie di Sapele) sono molto ravvicinate ed in parte sovrapposte.

Conclusioni

Nel presente lavoro la disponibilità di coppie di valori di prove Standard Penetration Test e prove di taglio diretto CD, provenienti da due aree ubicate nel delta del Niger (Eyaen e Sapele), laddove si ha la sovrapposizione di sedimenti prevalentemente coesivi su livelli incoerenti, ha consentito la valutazione, in

Tabella 19
Dati analizzati

EYAEN - SABBIE				SAPELE - SABBIE				SAPELE - SABBIE E GHIAIE			
N'(60)	Profondità (m)	Prove di TD	Amantia Scuderi F.	N'(60)	Profondità (m)	Prove di TD	F. Amantia Scuderi	N'(60)	Profondità (m)	Prove di TD	F. Amantia Scuderi
13,49	22,50	29,70	30,90	12,63	10,00		30,55	27,01	10,50		37,24
12,64	24,00		30,55	15,59	10,50	29,50	31,71	34,96	10,50		38,99
11,80	24,00	30,20	30,20	13,44	12,00	30,00	30,88	20,74	12,00		35,62
12,64	24,00		30,55	15,65	12,00		31,73	27,49	12,00	37,00	37,36
11,45	25,50	31,00	30,05	20,74	12,00		33,47	35,77	12,00		39,15
13,49	25,50	32,50	30,90	8,56	13,00	31,00	28,70	20,81	13,50		35,64
16,36	25,50		31,99	15,69	13,50	28,00	31,74	27,63	13,50		37,39
11,52	27,00		30,08	20,81	13,50		33,50	36,27	13,50	38,50	39,25
17,48	27,00	32,40	32,39	13,58	14,00	29,80	30,93	21,05	15,00		35,71
16,29	27,00		31,96	15,73	15,00	30,50	31,76	28,01	15,00	37,50	37,48
12,38	28,50	33,00	30,44	21,05	15,00		33,57	29,94	15,00		37,92
18,18	28,50	31,50	32,63	13,69	16,00		30,98	37,76	15,00		39,55
14,70	28,50		31,37	15,81	16,50	31,50	31,79	21,31	16,50	38,00	35,78
10,93	30,00	32,30	29,82	21,31	16,50		33,66	28,05	16,50		37,49
26,76	30,00	34,00	35,28	10,29	17,00		29,53	30,55	16,50	38,60	38,05
15,08	30,00		31,51	14,12	18,00	32,00	31,15	40,85	16,50		40,13
12,14	31,50	31,20	30,34	15,90	18,00		31,82	21,55	18,00	38,00	35,85
12,14	31,50	33,00	30,34	21,55	18,00	32,50	33,73	31,23	18,00		38,20
21,71	31,50	32,00	33,78	10,84	20,00	30,00	29,78	28,08	19,50	39,00	37,49
16,89	33,00		32,18	10,92	22,00		29,82	31,65	19,50		38,30
33,79	33,00	35,50	37,13	14,31	22,00		31,22	28,43	21,00		37,57
29,83	33,00		36,12	14,90	24,00	31,00	31,45	31,99	21,00		38,37
17,93	34,50	34,00	32,54	16,01	24,00		31,86	28,73	22,50	38,00	37,64
17,93	34,50		32,54	21,61	24,00	32,00	33,75	32,25	22,50		38,42
29,53	34,50	34,00	36,04	16,13	25,50		31,90	21,61	24,00	37,00	35,86
30,58	34,50		36,32	21,93	25,50	32,50	33,85	28,88	24,00		37,68
20,30	36,00	35,20	33,34	11,36	26,00	33,00	30,01	32,80	24,00	37,00	38,54
27,53	36,00		35,49	15,22	26,00	33,50	31,57	42,45	24,00		40,42
31,32	36,00	35,50	36,51	16,26	27,00		31,95	21,93	25,50	36,50	35,95
29,00	37,50	34,50	35,89	22,30	27,00		33,97	29,31	25,50		37,78
27,65	37,50		35,53	16,42	28,50	32,00	32,01	32,84	25,50		38,55
29,67	37,50	36,00	36,07	22,56	28,50	33,50	34,05	44,32	25,50	39,00	40,76
17,19	39,00		32,28	15,26	30,00		31,58	22,30	27,00		36,05
20,83	39	35,5	33,50	16,60	30,00	32,00	32,07	29,38	27,00	37,50	37,79
				25,38	30,00		34,88	32,86	27,00		38,55
				16,80	31,50	32,50	32,15	46,55	27,00		41,14
				26,08	31,50		35,09	22,56	28,50	36,00	36,12
				15,30	32,00	32,00	31,60	29,47	28,50		37,81
				18,50	33,00		32,74	33,49	28,50		38,69
				26,13	33,00	33,00	35,10	49,27	28,50	39,50	41,59
				19,03	34,50	32,40	32,92	25,38	30,00		36,84
				19,51	36,00		33,07	33,84	30,00	40,00	38,76
				26,50	36,00	32,00	35,21	26,08	31,50		37,02
				19,81	37,50		33,17	34,15	31,50		38,82
				26,97	37,50	33,00	35,34	26,13	33,00	42,00	37,03
				19,97	39,00	31,20	33,23	34,21	33,00		38,84
				20,07	42,00		33,26	26,50	36,00		37,12
				20,59	43,50	32,78	33,43	26,97	37,50		37,23

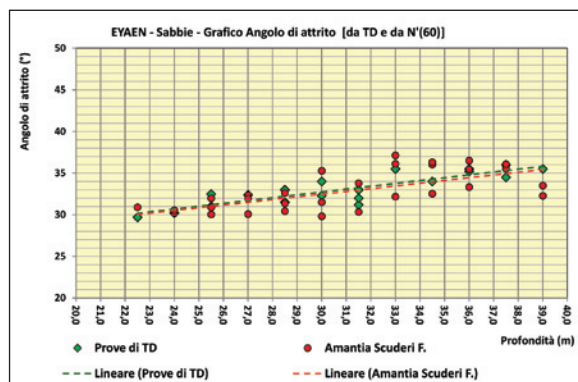


Fig. 13 – Eyaen - Sabbie – Confronto valori

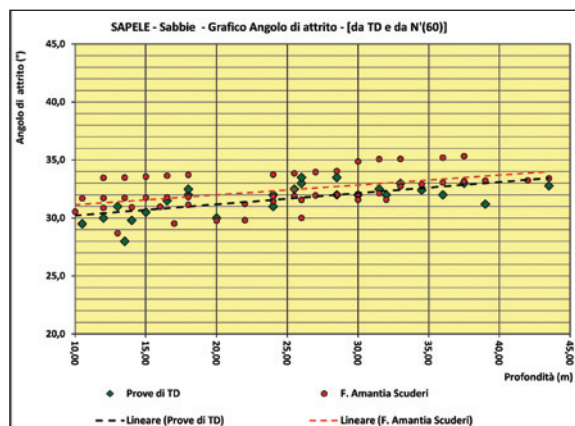


Fig. 14 – Sapele - Sabbie – Confronto valori

corrispondenza degli orizzonti incoerenti, delle variazioni dei valori sia con la profondità che con le prevalenti caratteristiche granulometriche, dati essenzialmente da orizzonti sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi.

Per tener conto di tali variazioni è stata elaborata una relazione (5) che consente di ricavare il valore dell'angolo di attrito

interno, in termini di sforzi efficaci, in funzione dei valori normalizzati $N_1(60)$ e che tiene anche conto della granulometria dei sedimenti, distinguendo quelli sabbiosi da quelli con presenza di ghiaia, mediante l'inserimento di un apposito coefficiente.

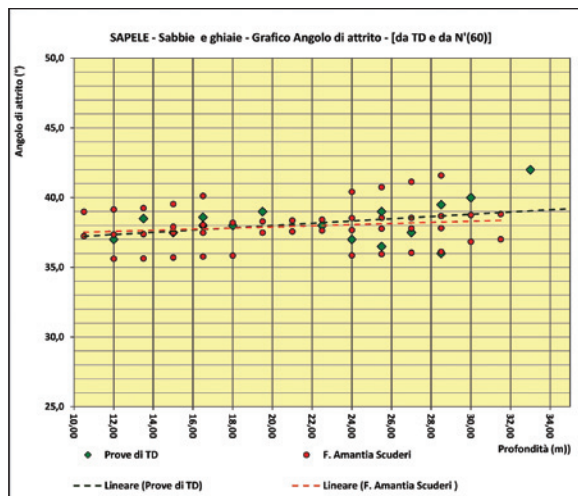


Fig. 15 – Sapele – Sabbie e ghiaie – Confronto valori

I risultati ottenuti con tale relazione sono stati confrontati con le prove di taglio diretto CD, diagrammandone la distribuzione in funzione della profondità. I risultati possono considerarsi confortanti, giacché tale distribuzione occupa dei campi ben sovrapponibili, con linee di tendenza quasi coincidenti. E' comunque da sottolineare come tutte le prove di taglio diretto CD siano state eseguite su provini rimaneggiati e ricostituiti in laboratorio; come conseguenza nelle fasi di rottura solo in pochissimi campioni si è ottenuto un valore di picco, peraltro poco marcato, mentre nella maggior parte dei casi si sono avuti percorsi sforzo-deformazione caratteristici dei materiali rimaneggiati.

Praticamente la fase finale della rottura di quasi tutti i provini ha un decorso del tutto simile a quello che caratterizza la rottura a volume costante. Pertanto i valori di resistenza al taglio nella quasi totalità dei casi possono considerarsi caratteristici della rottura a volume costante (τ_{cv}) e solo in pochi rappresentano il valore di picco (τ_p).

E' noto, infatti, che durante la fase di rottura di un terreno incoerente, come avviene nella scatola del taglio diretto, i singoli granuli si spostano dalla loro configurazione iniziale e tendono ad assumere un assetto più denso; lo sforzo di taglio massimo o di picco (τ_p) è dovuto al mutuo incastro iniziale tra le particelle ed il superamento di tali condizioni avviene con una sensibile variazione di volume (dilatazione); superato il valore di picco si ha gradualmente un decremento di resistenza al taglio sino al raggiungimento di un valore ultimo che si mantiene costante senza variazioni di volume, noto come *angolo di attrito a volume costante* (φ_{cv}).

Lungo una superficie di rottura, come nel caso della rottura globale del terreno nei problemi di capacità portante, il grado di resistenza al taglio non è uguale lungo tutta la superficie stessa, ma sussistono dei punti in cui si ha la massima concentrazione dello sforzo di taglio; se il materiale, quale ad esempio una sabbia ben addensata, presenta valori di resistenza al taglio per *piccole deformazioni* (valori di picco) marcatamente superiori a quelli corrispondenti a *grandi deformazioni* senza

variazioni di volume (valori a volume costante), all'istante della rottura la resistenza al taglio media disponibile lungo tutta la superficie deve necessariamente avere un valore intermedio. A tal proposito studi di YAMAGUCHI ET AL. (1977) hanno dimostrato che l'angolo di attrito disponibile a rottura per la valutazione della Q_{lim} risulta molto prossimo a quello a volume costante (φ_{cv}) anziché a quello di picco (φ_p).

Le considerazioni sopra esposte inducono a ritenere che i valori di angolo attrito risultanti dall'applicazione della relazione (5) siano prossimi a quelli che caratterizzano la rottura a volume costante (φ_{cv}) o, comunque compresi tra quest'ultima ed il valore di picco (φ_p). Ulteriori valutazioni e sperimentazioni in tal senso saranno oggetto di prossimi lavori.

Riferimenti bibliografici

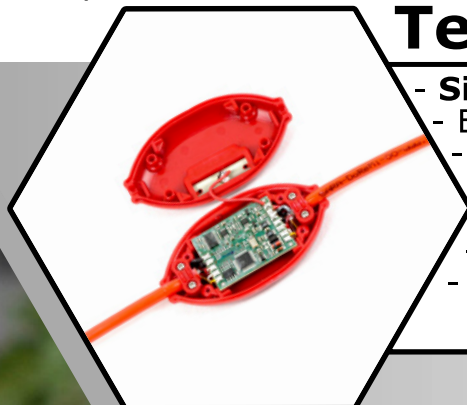
- DE MELLO V.F.B. (1971) *Standard penetration test*. In: Proceedings, 4th Panamerican conference on soil mechanics and foundation engineering, San Juan, Puerto Rico, ASCE, pp 1-86
- FEDERAL MINISTRY OF MINES, POWER & STEEL(1984) – GEOLOGICAL SURVEY DEPARTMENT – “*Geological Map Of Nigeria*”.
- GIBBS HJ, HOLTZ WG (1957) *Research on determining the density of sand by spoon penetration testing*. In: Proceedings, 4th international conference on soil mechanics and foundation engineering, LONDON, I, pp 35-39.
- HATANAKA M, UCHIDA A (1996) *Empirical correlations between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils*. Soils Found 36(4):1-10
- KISHIDA, H. 1967. *Ultimate Bearing Capacity of Piles driven Into Loose Sand*. Soils and Foundations 7(3): 20-29.
- LIAO S.S.C, WHITMAN R.V. (1986) *Overburden correction factors for SPT in sand*. J Geotech Eng ASCE 112(3):373-377
- MALCEV A.T., 1964. *Interpretation of standard spoon penetration testing*. Symp. Econ. Use Soil Testing in Site Investigation, Birmingham, 3, 11 – 16.
- MEYERHOF G.G. (1956) *Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils*. J Soil Mech Found Eng ASCE 82(SM1):1-19
- MUROMACHI, T., OGURO, I. AND MIYASHITA, T., 1974. *Penetration Testing In Japan. State of the art report*. Proc. Eur. Symp. Penetration Test., Stockholm, June 1974, 1: 193-200
- PECK, R. B., HANSON, W. E., AND THORNBURN, T. H. 1956. *Foundation engineering*, Wiley, New York.
- PECK, R. B., HANSON, W. E. & THORNBURN, T. H. (1974). *Foundation engineering*. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons, 13- 15.
- Shioi Y. e Fukui J. (1982). *Application of N-value to design of Foundations in Japan*. ESOPT-2. Amsterdam, Balkema. 1: 159-164.
- SHIOI Y. & FUKUNI J. (1982) - *Application of N-value to Design of Foundation in Japan*. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam
- SOWERS, G.B. (1971). – *Introductory Soil Mechanics and Foundations*. The Macmillan Company
- TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1948) - *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York; Chapman and Hall, London.
- TUTTLE M.L.W., CHARPENTIER, R. & BROWN-FIELD, M. E. (1999) – U.S.G.S. – *The Niger Delta Petroleum System: Niger Delta Province, Nigeria, Cameroon and Equatorial Guinea, Africa*. Denver, Colorado, USA.
- U.S. DESIGN MANUAL SOIL MECHANICS (Department of the Navy – Naval Facilities Engineering Command), NAVFAC DM-71 – May 1982
- WOLFF T.F. (1989) *Pile capacity prediction using parameter functions. In: Predicted and observed axial behavior of piles, results of a pile prediction symposium*, ASCE Geotechnical Special Publication 23, pp 96-106.

SISMOGRAFO

DOREMI® 16/24 BIT

sara[®]
electronic instruments

Telemetria digitale



- **Sismografo nel canale**
- Eccezionale Rapporto Segnale/Rumore
- **Immune al Crosstalk ed ai disturbi elettromagnetici**
- Lunga autonomia
- **Batteria inclusa nell'interfaccia**
- Non teme l'umidità

Modulare



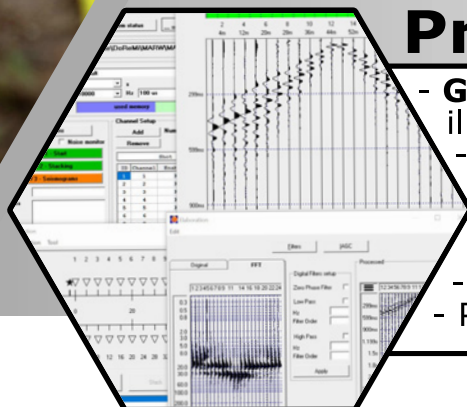
- **Configurabile da 1 a 255 canali**
- Diverse tipologie di geofoni e sensori
- **Componenti intercambiabili**
- Prolunghe e Power Booster al bisogno

Multiruolo



- Rifrazione/Tomografia
- **MARW** Riflessione 1D
- **Riflessione 2D/3D**
- ESAC/SPAC/ReMi
- **SSV**
- HVSF
- Downhole
- **MASW 1D/2D/3D**

Pratico



- **Gestione totale dell'acquisizione** con il software **DoReMi GeoExplorer**
- Roll Along, Interlace, Walk Away, Down Hole, etc.
- **Controllo rumore in situ**
- Controllo qualità dei dati
- **Analisi spettrale**
- Picking per rifrazione e molto altro

Via Angelo Morettini, 11, 06128 Perugia

E-mail: info@sara.pg.it | Web: sara.pg.it | Telefono: +39 075 505 1014, +39 075 937 0309

- SISMOGRAFI

- HVSR

- TOMOGRAFIA ELETTRICA

- GEORESISTIVIMETRI

- ENERGIZZATORI SISMICI

- IDROFONI



Seismograph
ECHO 48/2014 Seismic Unit - 24bit



Seismograph
ECHO 24/2010 Seismic Unit - 24bit



ECHO Tromo HVSR3 - 24bit



Mangusta MC 24-120E
Goelectrical Tomography Equipment



Resistivity Meter Datares-10



3D/5D - 3D Twin Borehole Geophone



P/S Wave Borehole Energy Source



Borehole Deviation Probe



Il partner definitivo per geingegneri e geoscientiati

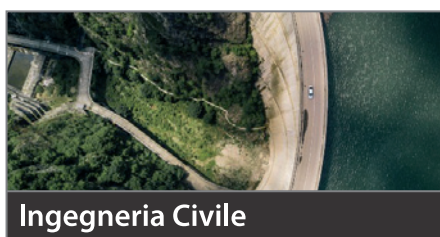
Risolvi problemi complessi, gestisci il rischio e prendi decisioni migliori durante il ciclo di vita dei progetti.

Seequent è leader nel supporto all'elaborazione di modelli in campo geologico, geoambientale e scienze della terra e offre strumenti innovativi e integrati per la collaborazione in team e lo sviluppo di progetti ingegneristici.

In più di 100 nazioni, professionisti nell'Industria, negli Istituti di ricerca e nelle Università, utilizzano le tecnologie Seequent per affrontare le attuali sfide nelle geoscienze e raggiungere ottimi risultati.

Le Soluzioni Seequent

I software Seequent combinano l'analisi, la visualizzazione 2D e 3D e la gestione dei dati in progetti ad ampia scala: costruzione di tunnel stradali e ferroviari, rilevamento e gestione delle acque sotterranee, esplorazione geotermica, mappatura di infrastrutture subacquee, valutazione delle risorse e dello stoccaggio sotterraneo di combustibile nucleare esaurito, e molto altro...



Software e tecnologie collaborative

GeoStudio	Modellazione della stabilità dei pendii, della deformazione del terreno e del trasferimento di calore e di massa nel suolo e nella roccia.
Leapfrog	Modellazione 3D di dati geologici del sottosuolo, stima delle risorse, verifica e tracciabilità del modello.
Oasis montaj	Modellazione 3D del sottosuolo terrestre e degli ambienti sottomarini, integrata mappatura GIS e gestione dei dati di geoscienze.
Seequent Central	Visualizzazione, modifica e gestione dei dati e della cronologia del progetto 3D all'interno di un ambiente Cloud. Condivisione via Web con i colleghi o con le parti interessate.

L'approvvigionamento di acqua e il funzionamento delle Terme Taurine, Civitavecchia, Italia centrale

The water supply and operating mode of the Taurine Baths, Civitavecchia, central Italy

Ugo Chiocchini | Già professore di Geologia Applicata presso l'Università degli Studi della Tuscia. E-mail: luca_chiocco@libero.it

Giovanni Savarese | Geologo. Via della Mazzetta, 7, 01100 Viterbo.

Luca Seidenari | Libero professionista guida turistica. Via Lombardia, 3, 00053 Civitavecchia, Roma.



Termini chiave: Terme Taurine, Approvvigionamento di acqua, Modalità di funzionamento, Cisterna, Pioggia

Keywords: Taurine Baths, Water supply, Operating mode, Cistern, Rainfalls

Abstract

The Taurine Baths are located 3.5 km NE of Civitavecchia on the western slope of the Tolfa Mountains, where the Tolfa Flysch and Pietraforte of upper Cretaceous-Eocene are over-thrusted on to the Tuscan Nappe, consisting locally of a Dogger-upper Triassic calcareous-dolomite succession. This structure is affected by NW-SE and N-S oriented normal faults, related to the Pliocene-Pleistocene extensional tectonics. The hydrogeological Complex of Flysch and Pietraforte, characterized by very low or zero relative permeability and insignificant groundwater circulation, is devoid of perennial springs. In addition, two springs of thermal water in the Taurine Baths with a yield of 1.33 l/sec and temperature of 40° - 55°C dried up due to the drilling of numerous wells. The Taurine Baths include two thermal buildings. The first one is smaller; consists of 15 rooms in opus incertum including 3 pools with a total volume of 118 m³, and is dated between the end of the II century and that of the I century BC, or between the last years of the Republic and the first ones of the Empire. The second one is larger, made up of 68 rooms including 3 pools with a total volume of 251 m³ and is referred to the period of the emperor Adriano. To supply the water to the thermal complex the Roman engineers, due to the lack of perennial springs, proposed to build a cylindrical cistern fed by the rainfalls, whose useful internal volume of 1644 m³ was defined on the basis of the total volume of the six pools.

Riassunto

Le Terme Taurine sono ubicate circa 3,5 km a NE di Civitavecchia, sul versante occidentale dei Monti della Tolfa, dove il Flysch della Tolfa e la Pietraforte (Cretacico superiore-Eocene) sono sovrascorsi sulla Falda Toscana, costituita localmente da una successione calcareo-dolomitica del Dogger-Triassico superiore. Questa struttura è interessata

da faglie dirette, con orientazione NO-SE e N-S, connesse alla tettonica distensiva del Pliocene-Pleistocene. Il Complesso del Flysch e della Pietraforte, caratterizzato da permeabilità relativa molto bassa o nulla e non significativa circolazione sotterranea, è privo di sorgenti perenni. Inoltre, due sorgenti di acqua termale nelle Terme Taurine con portata di 1,33 l/sec e temperatura tra 40° e 55°C si sono estinte a causa della perforazione di numerosi pozzi. Le Terme Taurine sono costituite da due edifici. Il primo, che occupa un'area di 2240 m², comprende 15 vani coprese tre piscine con volume totale di 118 m³, il cui paramento in *opus incertum* e *opus reticulatum* indica una età tra la fine del II e il I secolo a.C., ovvero tra gli ultimi anni della Repubblica e i primi dell'Impero. Il secondo edificio, sviluppato su un'area di 16.221 m², è composto da 68 vani in *opus testaceum* comprendenti tre piscine con volume totale 251 m³, ed è datato al periodo dell'imperatore Adriano. Per fornire l'acqua al complesso termale gli ingegneri romani, a causa della mancanza di sorgenti perenni, hanno proposto di costruire una cisterna cilindrica alimentata dalle piogge, il cui volume interno utile di 1644 m³ è stato definito in base al volume totale delle sei piscine.

Introduzione

Fare il bagno per la società romana era un'abitudine giornaliera che andava oltre la necessità igienica. Per un romano medio era un abito mentale, sociale e culturale profondamente radicato come forma di rigenerazione personale e l'ingresso in un bagno pubblico nel pomeriggio rappresentava una tappa irrinunciabile della routine giornaliera (Yegul 1992; Guerin-Beauvois 2003; Jankovic 2012; Rogers 2018). Anche se i filosofi come Seneca attribuivano effeminatezza al lusso dei bagni, gran parte dei romani gradiva ciò che offriva la loro cultura materiale.

Dal punto di vista sociale i bagni romani, caratterizzati dal grande richiamo delle masse popolari senza alcuna distinzione di sesso, colore, credo, stato di salute, erano il compendio degli ideali e delle istituzioni democratiche (Yegul 1992; Guerin-Beauvois 2003; Rogers 2018). Si deve ricordare, inoltre, che i bagni rappresentavano una struttura molto avanzata nella tecnologia delle costruzioni romane. Il primo uso del calcestruzzo come materiale da costruzione e le sue più innovative applicazioni nelle forme architettoniche curve, nelle volte e nei duomi sono iniziati proprio con la costruzione dei bagni (Yegul 1992; DeLaine e Johnstone 1999; Guerin-Beauvois 2003). Lo sviluppo e il successo dei bagni romani sono dovuti molto alla scoperta rivoluzionaria della tecnologia del riscaldamento alla fine del II secolo a.C., in particolare la forma di riscaldamento radiante del pavimento noto come ipocausto. Il suo sfruttamento architettonico, che ha dato luogo alla progettazione di bagni con l'uso successivo degli ambienti caratterizzati dalla gradazione della temperatura, è dovuto ai romani.

Il sito archeologico delle Terme Taurine (TT), ubicato su un'area con morfologia quasi pianeggiante (Piana dei Bagni) costituita da travertino stromatolitico dell'Olocene, comprende due edifici. Il complesso architettonico delle TT, sviluppatosi per almeno due secoli e in uso fino al quinto secolo, costituisce una delle più elaborate strutture termali regionali destinata ad attività curative e ricreative, non diversa da quella famosa di Baia nei Campi Flegrei a sud ovest del golfo di Pozzuoli (Yegul 1992; DeLaine e Johnstone 1999). Purtroppo le TT sono state sottoposte a depredazioni da parte dei Goti nel 534-538 e 551-553 d.C. e devastazioni sia ad opera dei Saraceni nel 833 d.C., sia a causa della costruzione della strada Civitavecchia-Tolfa nel 1820.

Le TT sono state oggetto di studi archeologici (Torraca 1761; Fea 1821; Annovazzi 1853; Manzi, 1869; Mengarelli 1923; Bastianelli 1933, 1939, 1942, 1961a/1985, 1962, 1988; Torelli 1973; Heinz 1986; Caruso 1991; Yegul 1992; Köhler 1999; Reggiani 2018; Zaccagnini et al. 2018; Stracci 2021) e per la composizione chimica (Torraca 1761 Alessandri 1875; Fileti 1878; Cannizzaro 1884; Camponeschi e Nolasco 1978; Università del Studi di Roma Tor Vergata 2020) e l'uso delle acque termali (Mercuriale 1571; Torracca 1761; Cannizzaro 1884; Köhler 1998, 2007). Si evidenzia in particolare il grande contributo fornito da Mengarelli e Bastianelli per i sistematici scavi archeologici che hanno riportato in luce i resti dei due edifici termali.

Per quanto riguarda l'approvvigionamento idrico delle TT, che costituisce l'elemento più rilevante per la costruzione di una struttura termale, esiste solo l'ipotesi non realistica di Bastianelli (1942), ripresa da Heinz (1986), Köhler (1998, 2007), Brunori (1990), Chellini (2002), e Stracci (2021) anche se non supportata da alcun riferimento al contesto geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area delle TT, indicando che è stata dedicata molto poca attenzione al vitale tema dell'acqua necessaria per il funzionamento delle TT.

La presente ricerca è compresa nell'attività dell'Associazione Nazionale per gli Interessi del Mezzogiorno d'Italia (ANIMI) – Società Magna Grecia in relazione al lavoro interdisciplinare per lo studio dei siti archeologici e del loro contesto ambientale, nell'ottica di migliorare le conoscenze sulla costruzione delle terme romane. Pertanto, utilizzando anche le tecniche della Geoarcheologia (Rapp e Hill 1998; Pollard 1999; Ghilardi

e Desruelles, 2009; Shahack-Gross 2017; Gilbert 2017; Gençer e Turan 2017; Cortéz Pérez et al. 2018; Shillito et al. 2019) la ricerca è stata condotta allo scopo di raggiungere i seguenti obiettivi: (1) descrivere l'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area che ospita le TT; (2) determinare l'approvvigionamento e l'immagazzinamento dell'acqua, il funzionamento delle TT, e l'uso dell'acqua termale da sorgente.

Materiali e metodi

Le operazioni della ricerca sono state sviluppate in tre fasi. Nella prima fase sono state prodotte le seguenti indagini. (1) Consultazione dei dati storici dell'archivio fotografico della Soprintendenza Archeologica, Belle Arti e Paesaggio per l'Area Metropolitana di Roma, la Provincia di Viterbo e l'Etruria Meridionale (Soprintendenza Archeologica). (2) Analisi delle stratigrafie di 3 pozzi del Dipartimento IV – Servizio 2 Tutela Acque e Risorse Idriche della Città metropolitana di Roma Capitale e di 6 pozzi forniti dallo Studio ECO GEO di Santa Marinella (Roma).

Nella seconda fase è stato eseguito il rilevamento geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area delle TT in base alla normativa della cartografia del Servizio Geologico Nazionale (1992; 1994; 1995) e dell'ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico Nazionale (2009; 2018 a; 2018 b), utilizzando gli elementi 363062 S. Liborio e 363973 Bagni di Traiano della Carta Tecnica della Regione Lazio in scala 1:5000, e la nomenclatura delle formazioni geologiche dei Fogli 353 Montalto di Castro, 354 Tarquinia, e 355 Ronciglione della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa; 2016). Il colore delle rocce delle formazioni è stato determinato mediante la Rock - Color Chart (Geological Society of America 1991).

Durante la terza fase sono state sviluppate dettagliate osservazioni sui vani delle strutture architettoniche, sulle opere murarie, sui materiali originali usati per la loro costruzione, e sulle dimensioni delle piscine dei due edifici delle TT, misurate con il Laser Digital Distance Detector BOSCH GLM 250 VF Professional. Inoltre, il diametro della sezione interna dei due tubi di piombo con forma ellissoidale della cisterna è stato determinato con un calibro digitale elettronico, misurando il diametro maggiore e quello minore, mentre per definire lo spessore della lamina dei tubi sono state seguite due misure su ambedue i loro lati curvi, i cui valori sono stati poi mediati.

Area di studio

Le TT, note anche come Bagni di Traiano, sono ubicate nel territorio comunale di Civitavecchia sul versante occidentale dei Monti della Tolfa (Lazio centro occidentale), circa 3,5 km a NE dell'area urbana della città (tavoletta II NE Tolfa del Foglio 142 Civitavecchia; coordinate WGS84 42° 06' 35,4" N - 11° 50' 10,0" E - 188 m s.l.m.). Tale area è compresa nella fascia peri-Tirrenica circa 53 km dal confine con la regione Toscana (Fig. 1).

Assetto geologico e geomorfologico

I Monti della Tolfa sono costituiti in larga misura dal Flysch

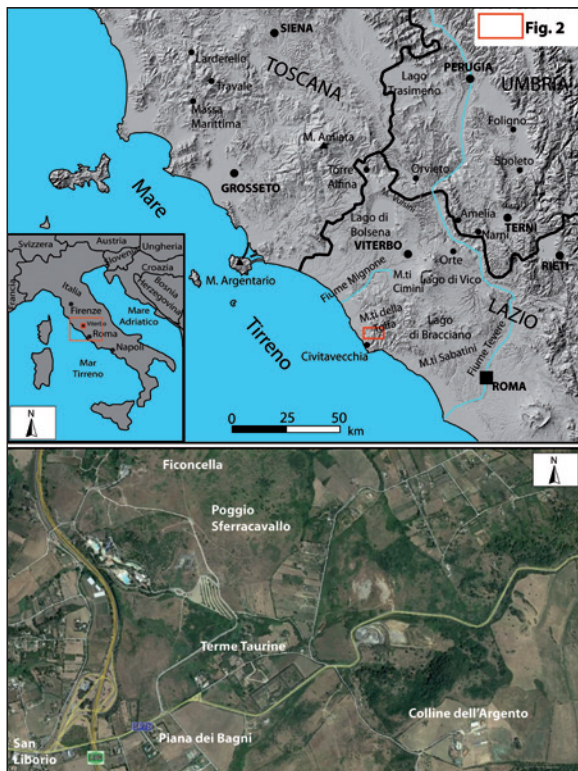


Figura 1 - Ubicazione dell'area studiata. Il rettangolo rosso indica l'ubicazione della figura 2. L'immagine da satellite in basso mostra l'area delle Terme Taurine.

Figure 1 - Location of the study area. The red rectangle indicates the location of figure 2. The satellite image below shows the Taurine Baths area.

della Tolfa del Cretacico superiore-Eocene e dalla Pietraforte del Cretacico superiore, e in parte dalle lave trachitico-dacitiche del Pliocene superiore - Pleistocene inferiore (Lauro et al. 1965; Lombardi et al. 1965 a, 1965 b, 1974; Negretti et al. 1963, 1966; Devoto e Lombardi 1977; Alberti et al. 1970; Ferrini et al. 1970; De Rita et al. 1997), subordinatamente da argille, sabbie e calcareniti di acque basse marine del Pliocene (Alberti et al. 1970; Fazzini et al. 1972; Barberi et al. 1994; Chiocchini e Potetti 1998; ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa). L'assetto stratigrafico e strutturale dei Monti della Tolfa, ricostruito mediante i pozzi Pantani, Allumiere, Bagnarello perforati dall'Enel per ricerca geotermica e dalle Terme dei Papi (Fig. 2 e 3), il modello gravimetrico (Fig. 4), e le sezioni di correlazione dei pozzi (Fig. 5), evidenziano la sovrapposizione tettonica del Flysch della Tolfa e della Pietraforte sulla Falda Toscana, che giace sul substrato quarzítico-filladico del Permiano, ed è costituita localmente dai Calcari diasprini del Dogger, sovrascorsi sulla successione prevalentemente dolomitica che comprende i Calcari e marne con Rhaetavícula contorta e il Calcare cavernoso del Triassico superiore (parte inferiore della Falda Toscana). Tale assetto stratigrafico-strutturale, dovuto alle fasi di deformazione dell'Oligocene-Miocene inferiore e del



Figura 2 - Ubicazione dei pozzi dell'Enel (Pa, Pantani; AI, Allumiere; Ba, Bagnarello) e delle Terme dei Papi (TP).

Figure 2 - Location of the wells of Enel (Pa, Pantani; AI, Allumiere; Ba, Bagnarello) and Spa of Papes (TP).

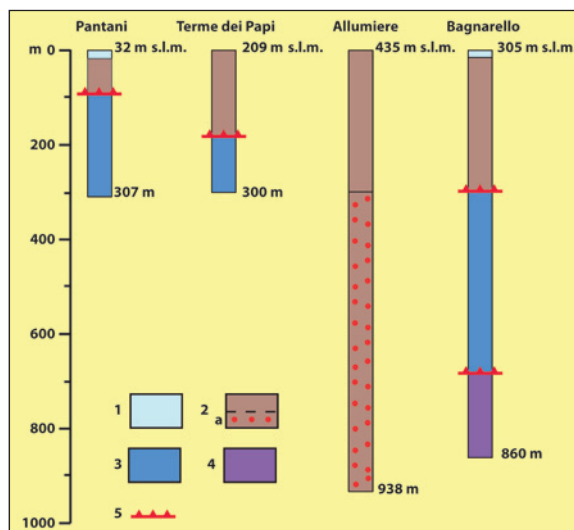


Figura 3 - Stratigrafia dei pozzi Pantani (1961), Allumiere (1962), Bagnarello (1962) dell'Enel e delle Terme dei Papi (2019). 1, travertino (Olocene); 2, Flysch della Tolfa: a, con noduli di pirite (Cretacico superiore-Eocene); 3, Falda Toscana: Calcari diasprini (Dogger); 4, Calcari e marne con Rhaetavícula contorta - Calcare cavernoso (Triassico superiore); 5, contatto di sovrapposizione tettonica.

Figure 3 - 3 Logs of the wells Pantani (1961), Allumiere (1962), Bagnarello (1962) of Enel and TP of Spa of Papes (2019). 1, travertine (Holocene); 2, Tolfa Flysch: a, with pyrite nodules (upper Cretaceous-Eocene); 3, Tuscan Nappe: Diasprino Limestone (Dogger); 4, Limestone and marl with Rhaetavícula contorta-Cavernous Limestone (upper Triassic); 5, tectonic overlapping contact.

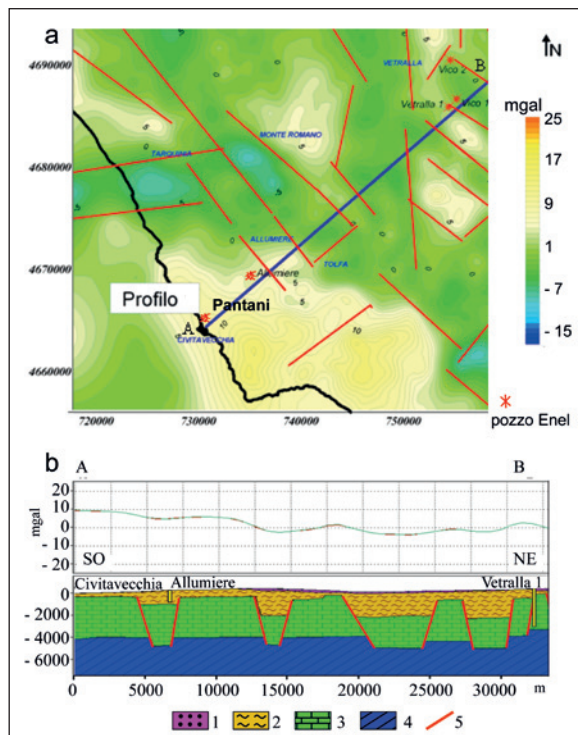


Figura 4 - Carta della gravità residuale (a) e profilo del modello gravimetrico (b) dei Monti della Tolfa. 1, unità vulcaniche (Pliocene-Pleistocene); 2, Flysch della Tolfa (Cretacico superiore-Eocene); 3, unità Mesozoico-Cenozoiche della Falda Toscana; 4 substrato quarzítico-filladico (Permiano); 5, faglia diretta. Da Chiocchini et al. (2010) modificato.

Figure 4 - Map of the residual gravity (a) and profile of the gravimetric model (b) of the Tolfa Mountains. 1, volcanic units (Pliocene-Pleistocene); 2, Tolfa Flysch (upper Cretaceous-Eocene); 3, Mesozoic-Cenozoic units of the Tuscan Nappe; 4, quartzite-phyllite substrate (Permian); 5, normal fault. From Chiocchini et al. (2010) modified.

Miocene medio-superiore (Kligfield et al. 1986; Brunet et al. 1997; Rossetti et al. 1999; ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa), successivamente è stato suddiviso in *horst* e *graben* ad opera delle fasi della tettonica estensiva del Pliocene-Pleistocene (Consiglio Nazionale delle Ricerche 1987; ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa). Si evidenzia che la Falda Toscana è stata oggetto di ricerche per lo sfruttamento dei fluidi idrotermali da parte della Società Terni, dell'Enel e dell'Agip nelle aree di Civitavecchia e Viterbo. La sezione gravimetrica della Figura 4 mostra che l'area di Civitavecchia e delle TT è compresa in un *horst*. Dal punto di vista geomorfologico i Monti della Tolfa sono costituiti da un gruppo di rilievi collinari con forma ellissoidale, orientato in direzione SO-NE, ad elevate energia del rilievo con quote fino a 510 m s.l.m. ad Allumiere e 515 m s.l.m. a Tolfa, tra la valle del Fiume Mignone a nord e il Mare Tirreno a sud (Fig. 2). Il reticolo idrografico comprende numerosi corsi d'acqua

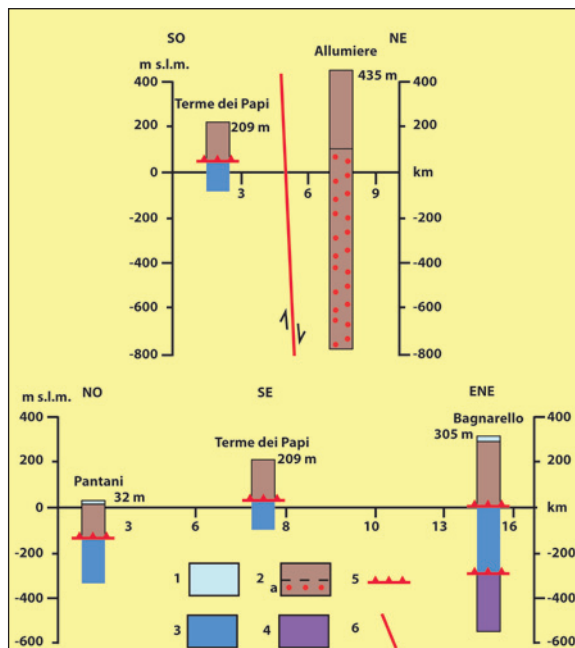


Figura 5 - Sezioni di correlazione dei pozzi dell'Enel e delle Terme dei Papi. 1, travertino (Olocene); 2, Flysch della Tolfa: a, con noduli di pirite (Cretacico superiore – Eocene); Falda Toscana: 3, Calcari diasprini (Dogger), 4, Calcari e marne con Rhaetavícula contorta-Calcare cavernoso (Triassico superiore); 5, contatto di sovrapposizione tettonica; 6, faglia diretta.

Figure 5 - Correlation sections of the wells of Enel and the Spa of Papi. 1, travertine (Holocene); 2, Tolfa Flysch: a, with pyrite nodules (upper Cretaceous-Eocene); 3, Tuscan Nappe: Diasprino Limestone (Dogger); 4, Limestone and marl with Rhaetavícula contorta-Cavernoso Limestone (upper Triassic); 5, tectonic overlapping contact; 6, normal fault.

a regime torrentizio, con valli a forma di "V" talvolta molto accentuate, disposti con andamento radiale.

Il rilevamento geologico (Fig. 6) indica che l'area in esame è costituita dal Flysch della Tolfa (FYT), cui si sovrappone una scaglia tettonica di Pietraforte (PTF), subordinatamente da travertino (f_t), detrito (a) e deposito eluvio-colluviale (b). Il Flysch della Tolfa comprende il Membro di Poggio Vivo (FYT₁) cui segue il Membro di Fosso dell'Anitrella (FYT₂) (ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa).

Il Membro di Poggio Vivo (FYT₁), che affiora nell'area occidentale tra Il Pozzolo-Poggio Sferacavallo -Autostrada A 12-Casale S. Antonio-S. Liborio, è composto da strati medi di argilliti di colore marrone chiaro 5 YR 6/4, grigio scuro 5 YR n. 3, grigio chiaro medio 5 YR n. 4 e rosso medio 5 R 4/6 con intercalazioni di strati medi e sottili di marne e calcari marnosi di colore marrone chiaro 5 YR 6/4, e di strati medi e spessi di calcari silicei di colore grigio scuro 5 YR n. 3, di calcareniti torbiditiche di colore grigio 10 YR 7/4 e marrone medio 5 YR 4/4 in strati medi e spessi (Fig. 7). Lo spessore complessivo del Membro di Poggio Vivo è di circa 600-700 m e la sua età

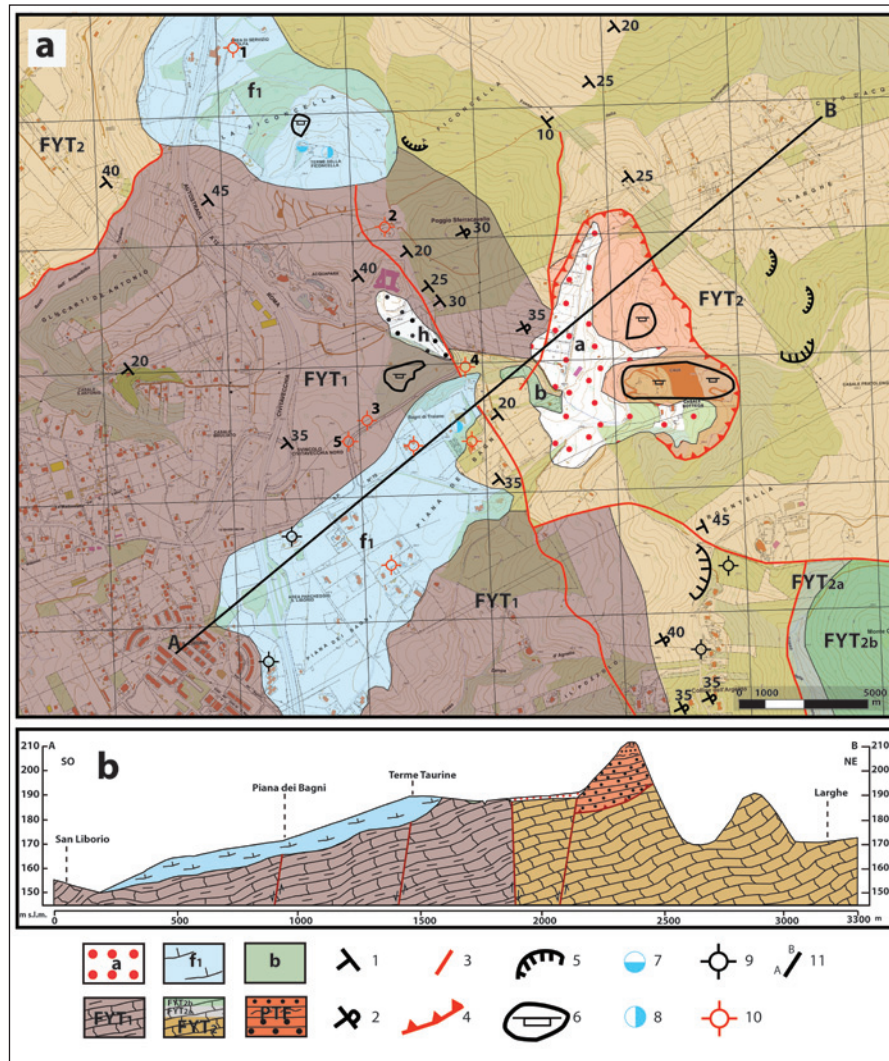


Figura 6 - Carta (a) e sezione geologica (b) dell'area delle Terme Taurine. a, detrito (Olocene); b, deposito eluvio - colluviale (Olocene); f₁, travertino stromatolitico (Olocene); FYT, Tofia Flysch: FYT₁, Poggio Vivo Member (argilliti grigie, marroni, rossastre, con intercalazioni di marne e calcari marnosi di colore marrone chiaro in strati medi, di calcari silicei di colore grigio scuro in strati sottili e medi, calcareniti torbiditiche di colore grigio e marrone chiaro in strati medi e spessi; Cretacico superiore - Paleocene); FYT₂, Fosso dell'Anitrella Member (calcari marnosi grigi e nocciola tipo pietra paesina, calcari silicei di colore grigio scuro, e calcareniti torbiditiche grigie in strati medi e spessi, marne di colore marrone chiaro, argilliti marroni e grigie; marne e calcari marnosi rossastri in strati medi nella parte superiore; Eocene); FYT_{2a}, Litofacies delle argilliti del Mignone (argilliti rosse, verdi e grigie intensamente scagliettate con intercalazioni di strati sottili di calcari marnosi); FYT_{2b}, Litofacies di Monte Fortino (calcari marnosi, calcareniti torbiditiche, marne, argilliti in strati sottili, medi e spessi); PTF, Pietraforte (arenarie medio-fini grigie, marroni per alterazione, in strati medio-spessi; a tetto con intercalazioni di argille rosse e verdi; Cretacico superiore); 1, strati dritti; 2, strati rovesciati; 3, faglia diretta; 4, contatto di sovrapposizione tettonica; 5, nicchia di distacco di paleo frana; 6, cava abbandonata; 7, sorgente termale; 8, sorgente termale estinta; 9, pozzo; 10, pozzo termale; 11, traccia della sezione geologica.

Figure 6 - Geological map (a) and section (b) of the Taurine Baths area. a, debris (Holocene); b, eluvial-colluvial deposit (Holocene); f₁, stromatolite travertine (Holocene); FYT, Tofia Flysch: FYT₁, Poggio Vivo Member (grey, brown and reddish argillite with intercalation of light brown marl and marly limestone in medium thick beds, dark grey siliceous limestone in thin and medium beds, grey to brown turbidite calcarenite in medium and thick beds; upper Cretaceous-Paleocene); FYT₂, Fosso dell'Anitrella Member (grey and brown marly limestones of pietra paesina type, dark grey siliceous limestone, and grey turbidite calcarenite in medium and thick beds, light brown marl; brown and grey argillite; marl and reddish marly limestone in medium beds in the upper part; Eocene); FYT_{2a}, Litofacies of the Mignone argillite (red, green and grey intensely flaked argillite with intercalations of thin layers of marly limestone); FYT_{2b}, Lithofacies of Monte Fortino (marly limestone, turbidite calcarenite, marl, argillite in thin, medium and thick beds); PTF, Pietraforte (medium-fine grey sandstone, brown by alteration, in medium and thick beds; red and green clay in the upper part; upper Cretaceous); 1, bed attitude; 2, overturned beds; 3, normal fault; 4, tectonic overlapping contact; 5, main scarp of paleo-landslide; 6, abandoned quarry; 7, thermal spring; 8, dried thermal spring; 9, well; 10, thermal well; 11, trace of geological section.



Figura 7 - Strati medi di argilliti, marne e calcari silicei marroni del Membro di Poggio Vivo, con immersione verso SO, nei pressi dell'edificio delle nuove terme di Civitavecchia.

Figure 7 - Medium beds of brown argillite, marl, and siliceous limestone of the Poggio Vivo Member, dipping to the SW, near the building of the new thermal baths of Civitavecchia.



Figura 8 - Strati molto spessi di calcare marnoso di colore giallo chiaro e di argilliti di colore marrone, con immersione verso SO, del Membro del Fosso dell'Anitrella sulle Colline dell'Argento.

Figure 8 - Very thick beds of light-yellow marly limestone and brown argillite, dipping to the SW, of the Fosso dell'Anitrella Member in the Colline dell'Argento.



Figura 9 - Strati medi e spessi di travertino stromatolitico presso la sorgente Ficoncella.

Figure 9 - Medium and thick beds of stromatolite travertine at the Ficoncella spring.

è Cretacico superiore – Paleocene (ISPRA- Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa).

Il Membro del Fosso dell'Anitrella (FYT₂) è presente nella zona orientale tra Argentella, Larghe e Ficoncella, e comprende strati medi e spessi di marne e calcari marnosi di colore arancio grigio 10 YR 7/4, tipo pietra paesina, calcari silicei, calcareniti torbiditiche di colore arancio grigio 10 YR 7/4, con intercalazioni di argilliti di colore marrone medio 5 YR 4/4 (Fig. 8), marne e calcari marnosi di colore arancio rosa 10 R 7/4 nella parte alta. Lungo il Fosso delle Forcelle affiorano le argilliti scagliose di colore rosso, verde, grigio con intercalazioni di strati sottili di calcari marnosi, attribuiti alla Litofacies delle argilliti del Mignone (FYT_{2a}), cui seguono strati spessi, medi e sottili di calcari marnosi di colore arancione grigio 10 YR 7/4, calcareniti torbiditiche, marne e argilliti di colore grigio scuro 5 YR n. 3 della Litofacies di Monte Fortino (FYT_{2b}). Lo spessore complessivo del Membro del Fosso dell'Anitrella è di circa 700-800 m e la sua età è Eocene (ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa).

Le unità del Flysch della Tolfa sono correlabili con quelle dell'Unità Esterna di Fazzini et al. (1972). Infatti, il Membro di Poggio Vivo (FYT₁) corrisponde al Flysch argilloso-calcareo (fc), il Membro del Fosso dell'Anitrella (FYT₂) al Flysch calcareo (fc¹), la Litofacies delle argilliti del Mignone (FYT_{2a}) alla Formazione del Mignone (fm) e la Litofacies di Monte Fortino (FYT_{2b}) al Flysch calcareo con marne rosate (fc²).

Nella zona di Casale Bottega, dove esistono due cave abbandonate, affiorano arenarie medio-fini di colore marrone giallo medio 10 YR 5/4 in strati medio spessi. A tetto sono presenti argille verdi e rosse con intercalazioni di arenarie fini di colore marrone giallo medio 10 YR 5/4 in strati medi e di siltiti di colore rosso medio 5 R 5/4 in strati sottili. La successione, con spessore di circa 40 m, è attribuita alla Pietraforte (PTF) la cui età è Cretacico superiore (Alberti et al. 1970; Abbate e Sagri 1970; Giannini et al. 1971; Fazzini et al. 1972; ISPRA- Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa).

Il travertino (f₁) si trova nelle aree di Piana dei Bagni, Poggio Sferzacavallo, e Ficoncella, dove si osservano i migliori affioramenti anche in una cava abbandonata attribuita ad età romana (Sammuri 2020). Si tratta di una roccia carbonatica porosa di colore grigio chiaro N 7 con granulometria media e strutture laminate di tipo stromatolitico in strati medi e spessi dell'Olocene (Fig. 9), caratteristica del travertino detritico (Capezzuoli e Gandin 2004; Gandin e Capezzuoli 2008; Gandin 2013) o travertino stromatolitico (D'Argenio e Ferreri 1987; 1988; D'Argenio et al. 2013). I depositi di travertino formano due corpi con geometria lenticolare e spessore massimo 10 m. Il rapporto isotopico $\delta^{13}\text{C}$ di tre campioni della Ficoncella è compreso tra 2,0 e 5,2, il $\delta^{18}\text{O}$ tra 18,9 e 23,8 (Manfra et al. 1976). I valori isotopici del carbonio indicano che alla formazione dei travertini ha partecipato la CO₂ originata dalla de-carbonatazione delle formazioni calcaree della Falda Toscana nel sottosuolo. Inoltre, i valori del $\delta^{18}\text{O}$ suggeriscono che i travertini hanno una genesi da acque essenzialmente meteoriche.

Il detrito (a) comprende frammenti eterometrici di calcari marnosi e silicei, marne e calcareniti in matrice limoso

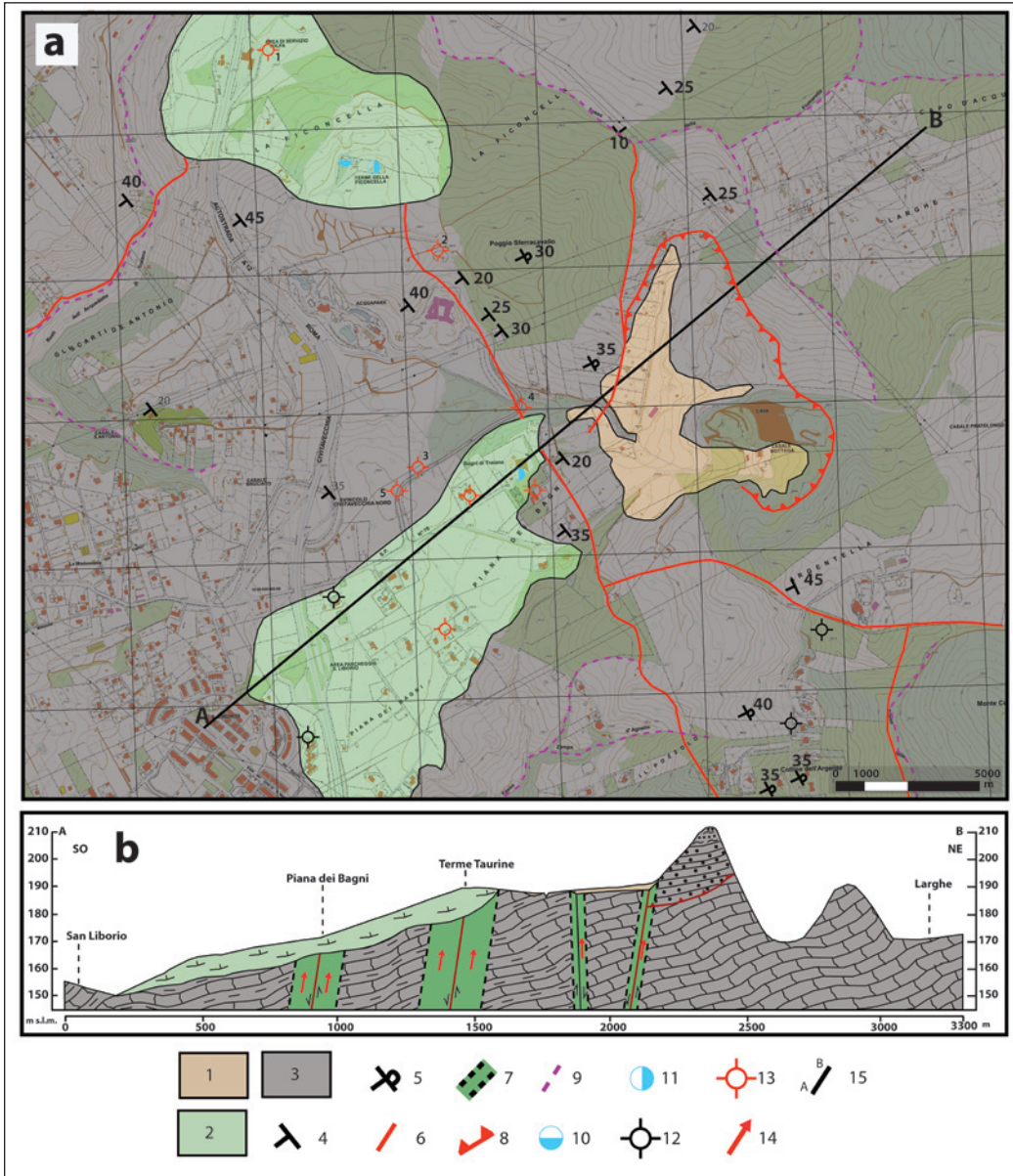


Figura 10 - Carta (a) e sezione (b) idrogeologica dell'area delle Terme Taurine. 1, Complesso detritico: depositi eterometrici sciolti (detrito) in matrice limoso argillosa, sabbie limoso argillose (deposito eluvio-colluviale) con permeabilità relativa medio bassa per porosità e coefficiente di infiltrazione 0,30 (Olocene); 2, Complesso del travertino: travertino stromatolitico con permeabilità relativa media per porosità e fratturazione, e coefficiente di infiltrazione potenziale 0,75 (Olocene); 3, Complesso del Flysch e della Pietraforte: calcari marnosi, calcari silicei, calcareniti, marne, arenarie, argilliti, con permeabilità relativa per fratturazione da molto bassa a nulla, e coefficiente di infiltrazione potenziale 0,20 (Cretacico superiore-Eocene); 4, strati dritti; 5, strati rovesciati; 6, faglia diretta; 7, fascia cataclastica con permeabilità relativa elevata; 8, contatto di sovrapposizione tettonica; 9, torrente; 10, sorgente termale; 11, sorgente termale estinta; 12, pozzo; 13, pozzo termale; 14, risalita dei fluidi termali; 15, traccia di sezione idrogeologica.

Figure 10 - Hydrogeological map (a) and section (b) of the Taurine Baths area. 1, Detrital complex: loose heterometric deposits (debris) in a silty clayey matrix, silty clayey sands (eluvial-colluvial deposit) with medium low relative permeability due to porosity and potential infiltration coefficient 0.30 (Holocene); 2, Complex of travertine: stromatolite travertine with medium low relative permeability due to porosity and fracturing, and potential infiltration coefficient 0.75 (Holocene); 3, Complex of Flysch and Pietraforte: marly limestones, siliceous limestones, calcarenites, marls, sandstones, argillites, with very low to zero relative permeability due to fracturing, and potential infiltration coefficient 0.20 (upper Cretaceous-Eocene); 4, bed attitude; 5, overturned beds; 6, normal fault; 7, cataclastic belt with high relative permeability; 8, tectonic overlapping contact; 9, torrent; 10, thermal spring; 11, dried thermal spring; 12, well; 13, thermal well; 14, flow of thermal fluids rising upwards; 15, trace of hydrogeological section.

argillosa, mentre il deposito eluvio-colluviale (b) è costituito da sabbie limoso argillose. Lo spessore di questi sedimenti, riferiti all'Olocene, è di pochi metri.

La ricostruzione dell'assetto tettonico dei due membri del Flysch della Tolfa è fortemente condizionata dalla limitata estensione dell'area in esame e dalla mancanza di affioramenti significativi per riconoscere gli elementi strutturali ed i relativi indicatori alla mesoscala. Gli strati dei due membri mostrano immersione omogenea verso SO con inclinazione variabile da 20° a 45°, talora con giacitura rovesciata, il cui significato è collegato alle pieghe a grande scala riconosciute da Fazzini et al. (1972) e ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo- Servizio Geologico d'Italia (in allestimento per la stampa). Al riguardo si evidenzia che il Membro del Fosso dell'Anitrella è costituito da un'una maggiore quantità di calcari più competenti, mentre il Membro di Poggio Vivo mostra una elevata quantità di argilliti meno competenti (Ragan 2009). Questa differenza litologica si riflette nella diversa risposta dei due membri alle sollecitazioni delle deformazioni. Infatti, alla scala dell'affioramento i due membri mostrano meso-pieghe e piani di taglio a scala decimetrica e gli strati calcarei competenti intercalati tra quelli argillosi meno competenti sono stirati, assottigliati e rotti ad intervalli irregolari formando corpi che assomigliano a budini (*boudinage*; American Geological Institute 2005), molto più evidenti nel Membro di Poggio Vivo. I due membri sono interessati da due sistemi di faglie dirette con orientazione NO-SE e N-S, il cui rigetto non è definibile per l'impossibilità di riconoscere livelli stratigrafici di riferimento, mentre la Pietraforte forma una scaglia tettonica con geometria lenticolare sovrapposta al Membro di Poggio Vivo (Fig. 6).

Dal punto di vista geomorfologico la zona delle TT (Fig. 6) è costituita da colline a quote tra 100 e 300 m s.l.m. (Colline dell'Argento, Larghe, Poggio Sferracavallo, Ficoncella), caratterizzate da alta energia del rilievo, mentre la zona di San Liborio mostra morfologia quasi pianeggiante (Piana dei Bagni; Fig. 6), debolmente inclinata verso sud a quote comprese tra 191 e 165 m s.l.m. Le incisioni del reticolo idrografico sono profonde con forma a "V" e comprendono il tratto superiore dei torrenti Fosso della Fiumaretta e Fosso Zampa d'Agnello, con decorso SO-NE, e il Fosso delle Forcelle, orientato N-S, che sboccano nel Mare Tirreno, i primi due a sud, l'altro a nord di Civitavecchia. Inoltre, sono state riconosciute nel Membro del Fosso dell'Anitrella quattro nicchie di paleo-frane sui versanti delle località Larghe e La Ficoncella.

Il rischio sismico del territorio comunale di Civitavecchia, in cui è compresa l'area delle TT, è classificato con il grado 3 caratterizzato da indice di accelerazione (a_g) $< 0,10^{[1]}$ con probabilità di essere superato pari al 10% in 50 anni (www.Regione Lazio.Protezione.civile.it). Si tratta di un rischio sismico basso che implica scuotimenti modesti.

Assetto idrogeologico

L'assottigliamento della crosta continentale e i connessi cicli magmatici, attivi nella fascia peri-Tirrenica centrale insieme alle fasi tettoniche distensive durante il Pliocene-Pleistocene

(Consiglio Nazionale delle Ricerche 1987; ISPRA- Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia in allestimento per la stampa), hanno generato in alcune aree della Toscana e del Lazio un forte flusso di calore regionale con valori di 200-300 MW/m² fino a 450 MW/m² (Calamai et al. 1976; Della Vedova et al. 1991; Barberi et al. 1994; Cataldi et al. 1999). Questa fascia è inoltre caratterizzata da notevoli emissioni di fluidi termali con abbondante CO₂, che controllano la deposizione del travertino, nelle aree geotermiche di Civitavecchia e Viterbo (Manfra et al. 1976; Duchi et al. 1985; Duchi e Minissale 1995; Minissale et al. 2002).

Nell'area delle TT si riconoscono tre complessi idrogeologici: il Complesso detritico, il Complesso del travertino e il Complesso del Flysch e della Pietraforte (Fig. 10).

Il Complesso detritico, che comprende il detrito eterometrico in matrice limoso argillosa e le sabbie limoso argillose del deposito eluvio colluviale, è caratterizzato da permeabilità relativa medio bassa per porosità con Coefficiente di Infiltrazione Potenziale (CIP) = 0,30 (Celico 1988; Civita 2005).

Il Complesso del travertino è costituito da due corpi con forma lenticolare e basso spessore, che mostrano una permeabilità relativa media per porosità e fratturazione e CIP = 0,75 (Celico 1988; Civita 2005). Questi due fattori non consentono un accumulo significativo di acqua sotterranea.

Il Complesso del Flysch e della Pietraforte, che comprende il Flysch della Tolfa e la Pietraforte, corrisponde al "Complesso dei flysch argillosi con intercalazioni litoidi" di Boni et al. (1986), alle "Rocce lapidee e sciolte con permeabilità ridottissima o nulla" di Ventriglia (1988), al "Complesso dei flysch marnoso-argillosi" di Capelli et al. (2012a) e alle "Unità Flyscoidi F1 Monti della Tolfa" di Capelli et al. (2012b). Secondo questi Autori il Complesso dei Flysch è caratterizzato da permeabilità e potenzialità acquifera bassissima. Infatti, Boni et al. (1986) hanno calcolato che l'infiltrazione efficace in questo complesso idrogeologico è minore di 100 mm/a, mentre il valore del coefficiente di conducibilità idraulica determinato specificamente per il Flysch della Tolfa nell'area di Viterbo, con condizioni litostratigrafiche e strutturali identiche a quelle dell'area delle TT, è $k = 5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-9}$ m/s (Piscopo et al. 2006) e quello della Pietraforte nella limitrofa zona di Santa Marinella è $k = 6,5 \times 10^{-7}$ m/s (Chiocchini et al. 1996). Pertanto, il Complesso del Flysch e della Pietraforte mostra una permeabilità relativa per fratturazione da molto bassa a nulla ed un altrettanto molto basso valore del CIP = 0,20 (Celico 1988; Civita 2005), tranne lungo le fasce cataclastiche delle faglie, dove la permeabilità relativa è elevata (Caine et al. 1996; Forster e Smith 1988 a, b; Lopez e Smith 1995; Grasby e Hutchinson 2001; Li et al. 2007; Underschultz et al. 2018).

Il controllo delle piccole sorgenti di acqua fredda segnalate da Camponeschi e Nolasco (1978) nei dintorni delle TT indica che esse sono estinte. Per quanto riguarda i pozzi si evidenzia che sono stati individuati quattro pozzi attivi, perforati nel Flysch della Tolfa, che hanno intercettato le acque sotterranee con portata massima di 1 l/s a profondità comprese tra 8 e 10 m dal p.c. nella zona di S. Liborio e Piana dei Bagni, e 90 m dal p.c. nella zona delle Colline dell'Argento. Questi dati suggeriscono che la circolazione delle acque sotterranee nel Complesso del Flysch e della Pietraforte non è significativa, con possibile formazione di piccoli corpi idrici sospesi solo dove tale complesso

¹ Questo indice rappresenta l'accelerazione orizzontale massima su suolo rigido e pianeggiante.

risulta molto fratturato. Di conseguenza, come già evidenziato da Alberti et al. (1970), Bertini et al. (1971), Nappi et al. (2016) e confermato da Capelli et al. (2012), le sorgenti alimentate localmente da tali corpi idrici sono molto rare, ubicate a quote differenti, con portate inferiori a 1 l/s, caratterizzate regime temporaneo, oppure attualmente estinte.

Le acque termali solfato bicarbonato alcalino terrose contenenti CO_2 e H_2S (Camponeschi e Nolasco 1978; Università degli Studi di Roma Tor Vergata 2020), allineate secondo la direttrice della faglia diretta orientata NO-SE (Fig. 10), come riconosciuto anche da Ventriglia (1988) e Capelli et al. (2012), emergevano nelle sorgenti ubicate presso La Ficoncella e le TT (ambidue comprese nella concessione mineraria denominata Terme di Traiano gestita dal Comune di Civitavecchia per 90 anni con Decreto del Ministro per l'Industria e il Commercio del 1951), e nelle due cave abbandonate di Casale Bottega. La composizione di queste acque termali è caratterizzata da elevato contenuto dei cationi calcio, magnesio, sodio e degli anioni solforico e idrocarbonico (Camponeschi e Nolasco 1978; Università degli Studi di Roma Tor Vergata 2020).

Presso La Ficoncella esistevano due sorgenti: Cannetaccio nei ruderi delle *Aquae Tauri* a quota 191 m s.l.m. con portata 1,66 l/s e temperatura di 55°C; Ficoncella a quota 184 m s.l.m. con portata 0,33 l/s e temperatura di 49,5°C (Yuhara e Ribacchi 1963). Camponeschi e Nolasco (1978) indicano per la prima sorgente una portata di 2 l/s, per la seconda di 1 l/s e temperatura 50°C, e mostrano 12 valori della temperatura per lo più di 55°-56°C tra il 1868 e il 1977. Pertanto, i valori complessivi della portata delle due sorgenti erano compresi tra 1,99 e 3 l/s, quelli della temperatura tra 50° e 56°C. Per questa sorgente Gonfiantini et al. (1968) hanno determinato la composizione isotopica della CO_2 dell'acqua e dei travertini, la cui deposizione non avviene nel punto di equilibrio isotopico.

Secondo Torracca (1761) alle TT esistevano due tipi di acque, uno caldo solfureo, l'altro tiepido, leggermente acido, di sapore gradevole, con effetto lassativo, curativo in particolare per le malattie della vescica, che si è disperso in seguito agli scavi per raccogliere l'acqua solfurea. Yuhara e Ribacchi (1963) indicano due sorgenti, una con portata 0,83 l/s e temperatura di 45°C, l'altra con portata 0,5 l/s e temperatura 40°C. Queste due sorgenti sono riconosciute anche da Camponeschi e Nolasco (1978) che indicano una portata di 0,5 l/s e temperatura 55°C per una sorgente, mentre per l'altra sorgente indicano solo la temperatura di 44°C. Questi Autori evidenziano 13 valori della temperatura, che mostrano notevoli variazioni tra il 1868 (32°C) e il 1974 (45°C), raggiungendo i valori massimi di 55°C nel 1870, 1894, 1947 e di 56°C nel 1882. Pertanto, la portata complessiva delle due sorgenti delle TT è compresa tra 0,5 e 1,33 l/s e la temperatura mostra valori tra 44° e 56°C.

Inoltre, nelle due cave abbandonate della zona di Casale Bottega, Camponeschi e Nolasco (1978) segnalano la presenza di acqua mineralizzata in buche scavate nella Pietraforte. In effetti attualmente si osservano frequenti impregnazioni solfuree, di carbonato di calcio e di ossidi ferro nel materiale scavato. Le sorgenti di acqua termale hanno formato i depositi di travertino di Piana dei Bagni e di Poggio Sferzacavallo-La Ficoncella e si sono estinte in conseguenza della perforazione sia di cinque pozzi per le nuove terme di Civitavecchia, la cui costruzione non è mai stata terminata, sia di altri pozzi che

emungono abusivamente acqua termale. Di conseguenza, questi pozzi hanno prodotto un gravissimo irreversibile danno ambientale. Attualmente esiste solo la sorgente Ficoncella, alimentata con l'acqua termale del pozzo perforato nella grotta adiacente, che eroga 2 l/s (Tufoni 2017).

La provenienza delle acque termali della zona delle TT è connessa alla circolazione delle acque sotterranee nell'area di ricarica costituita dall'acquifero carbonatico della Successione Umbro Marchigiana dell'Appennino centrale, che affiora nella zona di Amelia e Narni, nei Monti Martani, nei monti dell'Umbria nord-orientale e nei Monti Sabini, come illustrato nel modello idrogeologico concettuale della Figura 11. Le quote dell'area di ricarica, in gran parte situate mediamente a circa 1200 m s.l.m. (Froncini et al. 2012), sono coerenti con i valori del rapporto isotopico $\delta^2\text{H}/\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dell'acqua termale dell'area di Viterbo (Piscopo et al. 2006). L'alto valore del gradiente topografico tra l'area di ricarica a 1200 m s.l.m. dell'Appennino centrale e le zone di recapito di Viterbo e delle TT nei Monti della Tolfa, a quote rispettivamente di 320-240 m e 188 m s.l.m., si traduce in un elevato carico idraulico (rispettivamente 880-960 e 1009 m) che funge come forza principale per il deflusso delle acque sotterranee dall'area di ricarica alle suddette zone di recapito.

Le acque sotterranee dell'acquifero carbonatico dell'Appennino centrale formano un grande circuito che emerge lungo la gola del Fiume Nera vicino a Narni (Fig. 11) nella sorgente lineare di Stifone-Montoro a quota 75-65 m s.l.m., circa 34 km a ENE di Viterbo, con composizione solfato clorurato alcalina, rapporto isotopico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,70816 identico a quello dell'acqua termale di Viterbo (Chiocchini et al. 2010), temperatura di 15°-18°C e portata di 13,5 m³/s (Boni et al., 1986; Chiocchini et al., 1987; Froncini et al. 2012). Le acque di questo circuito si mescolano con quelle delle sabbie e ghiaie dell'acquifero superficiale (simbolo 4 in Fig. 11) sovrapposto all'acquifero carbonatico, scorrono verso la valle del F. Tevere, iniziano a riscaldarsi trasformandosi in fluidi termali, emergono prima ad Orte in una sorgente con temperatura 30°C, proseguono verso i Monti Cimini-area di Viterbo riscaldandosi ulteriormente ed alimentando l'acquifero carbonatico nel sottosuolo costituito dalla Successione Umbro Marchigiana e dalla Falda Toscana (Fig. 11), ed emergono di nuovo formando le sorgenti termali di Viterbo con temperatura attuale fino a 55°C (Chiocchini et al. 2010; Chiocchini e Manna 2015; Chiocchini e Savarese 2020). Infine, i fluidi termali continuano a defluire verso l'area delle Terme Taurine nei Monti della Tolfa, dove si riscaldano ulteriormente nell'acquifero della Falda Toscana (Fig. 11) ad opera del magma che ha alimentato il vulcanismo di questa area (Lombardi et al. 1974; De Rita et al. 1997), ed emergono ancora in superficie con temperatura di 44°-56°C, mescolandosi localmente con limitati corpi idrici sospesi del Complesso del Flysch e della Pietraforte. Pertanto, nelle aree dei Monti Cimini-Viterbo e Monti della Tolfa l'acquifero carbonatico della Falda Toscana ospita due sistemi idrotermali con acque solfato bicarbonato alcalino terrose, vapore e gas (principalmente CO_2 e H_2S), che defluiscono verso l'alto a causa dei seguenti fattori (Chiocchini et al. 2010; Chiocchini e Manna 2015):

- l'elevata pressione interna nell'acquifero carbonatico;
- la pressione di vapore e gas che consente di innalzare il

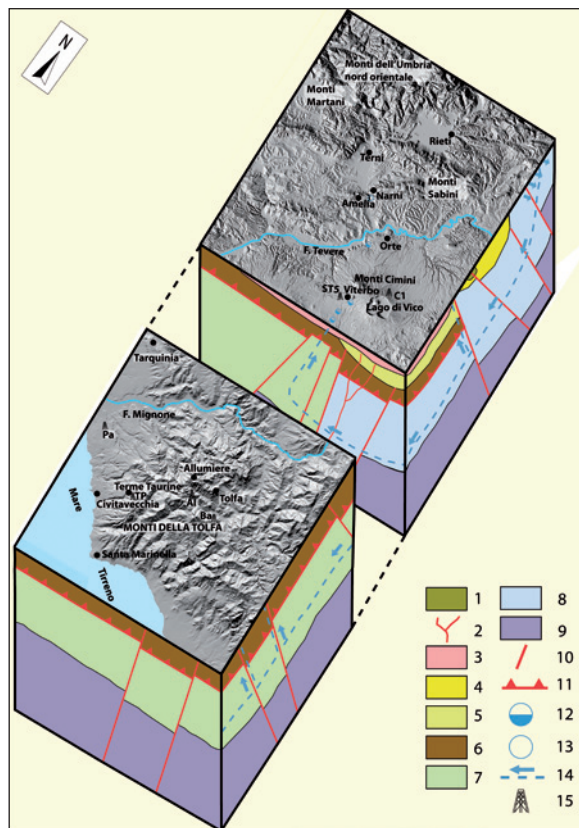


Figura 11 - Il modello concettuale 3D mostra le aree geotermiche di Viterbo (stereogramma in alto) e Civitavecchia (stereogramma in basso), l'area di ricarica dell'Appennino centrale, che comprende la zona di Amelia e Narni, i Monti Sabini, i Monti Martani e i monti dell'Umbria nord-orientale con i loro complessi idrogeologici (simboli 1 - 9) e il circuito che alimenta il sistema idrotermale (linea tratteggiata e freccia in blu). 1, sedimenti alluvionali (acquifero superficiale; Quaternario); 2, intrusioni di magma dei distretti Cimino e Vicano (Pleistocene); 3, rocce vulcaniche dei distretti Cimino e Vicano (acquifero vulcanico); 4, argille (complesso impermeabile), sabbie e ghiaie (acquifero superficiale) (Pleistocene); 5, argille (complesso impermeabile; Pliocene inferiore); 6, Flysch della Tolfa (complesso impermeabile; Cretaceo superiore-Eocene); 7, Falda Toscana (acquifero carbonatico; Triassico superiore-Paleogene); 8, Successione Umbro Marchigiana (acquifero carbonatico; Triassico superiore-Paleogene); 9, substrato quarzítico-filladico (complesso impermeabile; Permiano); 10, faglia diretta; 11, contatto di sovrapposizione tettonica; 12, sorgente di acqua termale; 13, sorgenti del fiume Nera; 14, circuito delle acque sotterranee; 15, pozzo: ST5, Società Terni; Pa, Pantani, Al, Allumiere, Ba, Bagnaccio, Enel; TP, Terme dei Papi.

Figure 11 - The 3D conceptual hydrogeological model shows the geothermal areas of Viterbo (stereogram above) and Civitavecchia (stereogram below), the recharge area of the central Apennines, which includes the zone of Amelia and Narni, the Sabini Mountains, the Martani Mountains, and the mountains of north-eastern Umbria with their hydrogeological complexes (symbols 1 - 9) and the circuit that feeds the hydrothermal system (dotted line and arrow in blue). 1, alluvial sediments (superficial aquifer; Quaternary); 2, magma intrusions of the Cimino and Vico districts (volcanic aquifer); 3, volcanic rocks of the Cimino and Vico districts (Pleistocene); 4, clays (impervious complex), sands and gravels (superficial aquifer) (Pleistocene); 5, clays (impervious complex; lower Pliocene); 6, Tolfa Flysch (impervious complex; upper Cretaceous-Eocene); 7, Tuscan Nappe (carbonate aquifer; upper Triassic-Paleogene); 8, Umbro-Marche Succession (carbonate aquifer; upper Triassic-Paleogene); 9, quartzite phyllite substrate (impervious complex; Permian); 10, normal fault; 11, tectonic overlapping contact; 12, spring of thermal water; 13, springs of the Nera River; 14, groundwater circuit; 15, well: ST5, Terni Company; Pa, Pantani, Al, Allumiere, Ba, Bagnaccio, Enel; TP, Spa of Papes.

livello idrostatico dei fluidi e di alleggerire il loro carico, con conseguente riduzione progressiva della densità dell'acqua;

- la temperatura del tetto dell'acquifero carbonatico, ubicato a 400 m di profondità nelle aree dei Monti Cimino-Viterbo e Monti della Tolfa, mostra un valore di 50°C, e, nella prima area, di 100°C, 150°C, 200°C, rispettivamente, a 1000, 2000 e 3000 m di profondità (Chiocchini et al. 2010); tali valori causano l'espansione termica dell'acqua, il cui ruolo è fondamentale per la dinamica dei sistemi idrotermali.

La maggior parte del vapore condensa nel sottosuolo e il liquido risultante si espande lateralmente o evapora (Chiodini et al. 2005). Il pennacchio di fluidi termali, composti da acqua riscaldata e dilatata con bassa densità, dal vapore e dai gas, risale e penetra nelle fratture e, soprattutto, nelle fasce cataclastiche permeabili dei sistemi di faglie dirette orientate NO-SE e N-S (Fig. 10 b e 11). Questo schema di deflusso concorda con quanto riportato da Caine et al. (1996), Forster e Smith (1988a; 1988b), Lopez e Smith (1995), Li et al. (2007), Underschlutz et al. (2018), i quali evidenziano che le fratture e le faglie sono fattori primari per il deflusso delle acque sotterranee e che l'elevata permeabilità lungo le zone fagliate è cruciale per lo sviluppo dei sistemi idrotermali. Inoltre, secondo Li et al. (2007) e Grabsby e Hutchinson (2001) le faglie influenzano la profondità di circolazione e la conseguente temperatura; quindi, le sorgenti

sono spesso allineate lungo le faglie, come si osserva anche nel caso delle sorgenti termali delle TT e della Ficoncella.

Risultati

Dati storici dell'archivio fotografico della Soprintendenza Archeologica

Prima di esaminare i dati dell'archivio fotografico della Soprintendenza Archeologica è necessario ricordare brevemente la storia degli scavi eseguiti alle TT. Le prime ricerche furono svolte dal medico G. Torracca nel 1777 e riprese nel 1821 da L. M. Manzi in occasione dei lavori eseguiti nel 1820 per la costruzione della strada Civitavecchia-Tolfa. La limitata estensione di queste indagini non fornì indicazioni apprezzabili sulla struttura delle TT. Le prime indagini mirate alla scoperta delle strutture si sono sviluppate nel 1912 - 1913 con interventi di restauro della Soprintendenza ai Monumenti, molto limitati perché l'acqua termale, non potendo più defluire attraverso i condotti ostruiti, aveva allagato quasi tutti i vani. Successivamente, grazie all'Associazione Archeologica Centumcellae, furono eseguiti i seguenti scavi: nel 1922 dall'ingegnere R. Mengarelli, che ha messo in luce i resti delle terme di età repubblicana; per le terme di età imperiale ad opera di un comitato presieduto dal Podestà nel 1927 - 1928, 1933 e negli anni successivi fino all'inizio della Seconda Guerra Mondiale

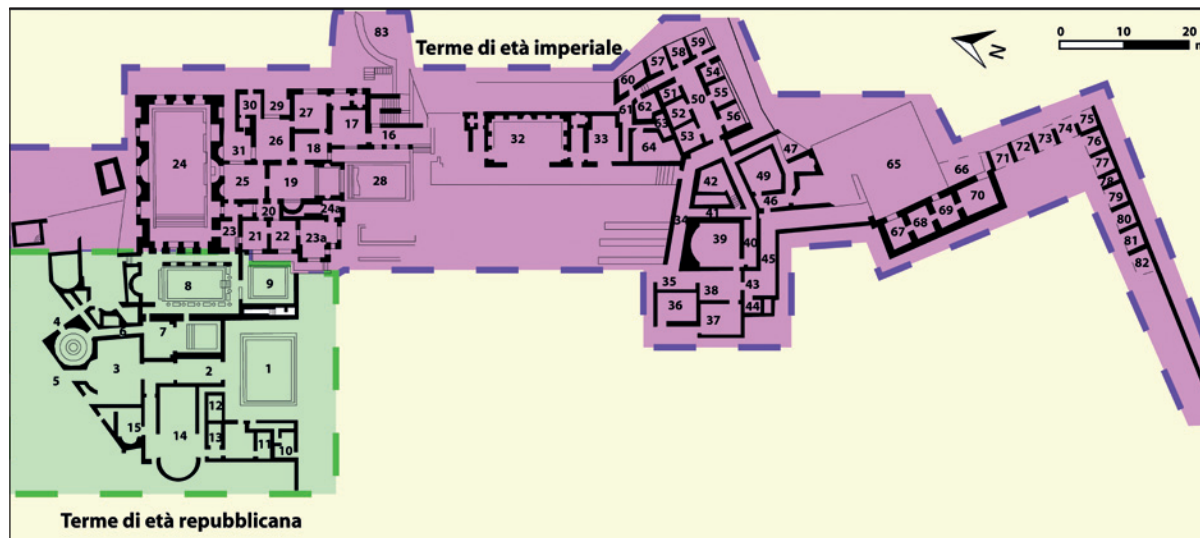


Figura 12 - La mappa delle Terme Taurine con gli edifici di età repubblicana e imperiale in base al rilievo elaborato dall'Ufficio Urbanistica del Comune di Civitavecchia nel 1990. **Terme di età repubblicana.** 1, Peristylum; 2, corridoio centrale; 3, ingresso; 4, laconicum; 5, corridoio laterale; 6, corridoio; 7, Apodyterium con vasca usata come tepidarium; 8, calidarium; 9, frigidarium; 10-13, cubicula diurna; 14-15, exedrae. **Terme di età imperiale.** 16, corridoio dell'entrata; 17, ingresso; 18 e 20, vani di transito; 19, tepidarium; 21 e 22, apodyterium con praefurnium alla base; 23, vano di accesso ai calidarium 8 e 24; 23a, heliocaminus; 24a, ambiente di servizio; 24, calidarium; 25-27, sale riscaldate; 28, frigidarium; 29, praefurnium; 30-31, vano di incerta attribuzione; 32, biblioteca; 33, sala di lettura; 34, criptoportico; 35-38, vani per la sosta; 39, exedra; 40, praefurnium; 41, corridoio; 42, vano coperto per la raccolta di acqua piovana; 43, vano di incerta attribuzione; 44, praefurnium; 45, corridoio; 46, corridoio di accesso alla latrina; 47, latrina; 48, corridoio per salire al criptoportico; 49, cortile; 50, corridoio per accedere ad hospitalia; 51-59, hospitalia; 60-61-62-64, ambienti di incerta attribuzione; 63, latrina con alcune postazioni; 65, grande sala di soggiorno; 66, spazio non ispezionabile; 67-82, sostruzioni, 83, cisterna per il rifornimento di acqua.

Figure 12 - The map of the Taurine Baths with the republican and imperial buildings based on the survey developed by the Ufficio Urbanistica of the Municipality of Civitavecchia in 1990. **Baths of republican age.** 1, peristylum; 2, central corridor; 3, entrance; 4, laconicum; 5, lateral corridor; 6, corridor; 7, apodyterium with a pool used as tepidarium; 8, calidarium; 9, frigidarium; 10-13, cubicula diurna; 14-15, exedrae. **Baths of imperial age.** 16, entrance corridor; 17, entrance; 18 and 20, transit rooms; 19, tepidarium; 21 and 22, apodyterium with praefurnium at the base; 23, access room to the calidarium 8 and 24; 23a, heliocaminus; 24, calidarium; 24a, service room; 25-27, heated rooms; 28, frigidarium; 29, praefurnium; 30-31, room of uncertain attribution; 32, library; 33, reading room; 34, cryptoporticus; 35-38, rooms for resting; 39, exedra; 40 praefurnium; 41, corridor; 42, covered compartment for collecting rainwater; 43, room of incertain attribution; 44, praefurnium; 45, corridor; 46, access corridor to latrina; 47, latrina; 48, corridor to go up to the cryptoporticus; 49, courtyard; 50, corridor to access hospitalia; 51-59, hospitalia; 60-61-62-64, rooms of uncertain attribution; 63, latrina with some stations; 65, large living room; 66, non-inspectable space; 67-82, substructure, 83, cistern for water supply.

con la direzione di R. Mengarelli e S. Bastianelli. Gli scavi e i lavori di restauro, consolidamento e ricostruzione delle TT sono ripresi tra il 1954 e il 1960 ad opera della Soprintendenza Archeologica.

L'archivio della Soprintendenza Archeologica comprende 9 schede con foto in bianco e nero e diciotto schede con fotogrammi piccoli, che mostrano alcune fasi degli scavi del 1922. Inoltre, altri fotogrammi piccoli mostrano i lavori di restauro, consolidamento e ricostruzione di molte opere murarie: quattro schede del 1954 per alcune arcate crollate delle terme di età imperiale; una scheda del 1955, una scheda del 1979, due schede del 1980, dieci schede del 1981, quattro schede del 1982, una scheda del 1984, una del 1985, quindici schede senza data. Si evidenzia che nessuna foto illustra lo stato degli scavi relativi alla struttura semicircolare attribuita dagli Autori (Bastianelli 1961a/1985; Kholer 1986; Heinz 1999, 2000) al *castellum aquae* che raccoglieva l'acqua utilizzata per il funzionamento delle TT.

I due edifici delle Terme Taurine

I due edifici termali sono ubicati nella zona quasi pianeggiante

di Piana dei Bagni costituita dal travertino stromatolitico. Le caratteristiche geologiche e geomorfologiche di tale zona, al confine con il versante meridionale delle Colline dell'Argento in cui affiora il Membro del Fosso dell'Anitrella (Fig. 6), e l'ottimo terreno di fondazione costituito dal travertino stromatolitico sono particolarmente favorevoli ad ospitare l'insediamento dei due edifici, le cui strutture architettoniche sono riportate nella mappa della Figura 12, frutto del rilevamento eseguito nel 1990 dall'Ufficio Urbanistica del Comune di Civitavecchia sulla base di una mappa elaborata da Bastianelli (1961a/1985). Il primo edificio, che occupa un'area di circa 2240 m², è più piccolo e composto dai seguenti 15 vani (1 - 15; Fig. 12): il *peristylum* (vano per passeggiare all'ombra; 1), un ambiente che funziona come *apodyterium* (spogliatoio) provvisto di una vasca utilizzata come *tepidarium* (7), il *laconicum* (camera con



Figura 13 - Le frecce evidenziano due pilastri corti (*suspensurae*) che sostenevano il pavimento per il funzionamento del sistema ipocausto con aria calda nel *laconicum* (3 in figura 12).

Figure 13 - The arrows highlight the two short pillars (*suspensurae*) which supported the floor for the functioning of the hypocaust system with hot air in the *laconicum* (4 in figure 12).

forma circolare per sudare^[2], riscaldata mediante i *tubuli*^[3] e/o le *tegulae mammatae* collegati al sistema ipocausto, *hypocaust* o *balneae pensiles*^[4]; 4; Fig. 13), il *calidarium* (sala per il bagno con acqua calda; 8), che comprende dieci vaschette e sette colonne di travertino stromatolitico sui lati della vasca, il *frigidarium* (sala per il bagno con acqua fredda; 9), i *cubicula diurna* (camere per riposare dopo il bagno; 10-13), le *exedrae* (strutture architettoniche semicircolari; 14-15). La tessitura del paramento dei vani, in cui sono evidenti gli interventi di consolidamento e restauro eseguiti sulle murature (De Cesaris 2005), mostra che i conci squadrati in piccolo apparato di calcare marnoso e siliceo, raramente di arenaria Pietraforte (dimensioni medie 7 x 8 cm), sono organizzati in file con andamento ondulado e inclinazione media di 45°. Bastianelli (1942, 1961a/1985) e Yegul (1992) interpretano questo paramento come *opus quasi reticulatum*, mentre Köhler (1999) lo attribuisce all'*opus reticulatum*. Al riguardo si evidenzia che la lavorazione di queste rocce con metodi manuali, come quelli usati dalle maestranze

romane, è molto difficile perché tali rocce non si rompono in modo regolare come il tufo, che, essendo facilmente lavorabile, è stato usato molto frequentemente per l'*opus reticulatum*. Un riferimento particolare merita il *laconicum* (4), che mostra due diversi tipi di paramento e alcune trasformazioni (Bastianelli 1961a/1985; Köhler 1999), e le dimensioni delle due piscine *calidarium* (8) e *frigidarium* (9) necessarie per definire il volume di acqua necessaria per il loro funzionamento. Nel *laconicum* (4) sono presenti tre anelli concentrici con una vasca rotonda al centro. Il paramento dell'*opus incertum* è composto da conci di calcare marnoso e siliceo cuneiformi o ovoidali in piccolo apparato organizzati in corsi omogenei con struttura embriciata, esattamente come Vitruvio descrive nel *De Architectura* (II, VIII, 1-2) la tecnica di costruzione dell'*opus incertum*, mentre nella parte superiore è presente l'*opus reticulatum* con conci squadrati (dimensioni medie 7 x 8 cm) degli stessi litotipi in file ondulate. Si può ritenere che inizialmente esistesse la vasca rotonda con accesso dal corridoio (6, Fig. 12) e che successivamente siano stati costruiti alcuni pilastri corti (*suspensurae*) per il sistema ipocausto, di cui si osservano alcuni resti (Köhler 1999) (Fig. 13). Il *calidarium*, lungo 10,18 m, largo 5,43 m e profondo 1,05^[5] m, ha un volume di 58,04 m³, al quale si deve aggiungere il volume di 3,5 m³ relativo alle dieci vaschette sui lati della vasca per un totale di 61,54 m³. Il *frigidarium* è lungo 6,58 m, largo 5,50 m, profondo 1,05 m, e ha un volume di 37,99 m³. La vasca del *tepidarium* è lunga 4,50 m, larga 3,98 m, profonda 1,05 m e ha un volume di 18,80 m³. Il secondo edificio, sviluppato su un'area di circa 16.221 m² è più grande e comprende 68 vani (16 - 66; Fig. 12), il cui paramento è rappresentato dall'*opus testaceum* e la malta è di colore bianco N 9 o grigio chiaro N 7, reagisce in situ con HCl diluito e comprende inerti calcarei. Anche in questo edificio sono evidenti i diversi lavori di restauro, consolidamento e ricostruzione di molte opere murarie (De Cesaris 2005), in particolare per le arcate in conseguenza del crollo di quelle originali, documentato in alcune foto dell'archivio della Soprintendenza Archeologica. Nella zona a contatto con il primo edificio sono presenti le seguenti strutture (Fig. 12): l'ingresso (17), il *tepidarium*, di cui è conservata una parte della volta a botte alta 7,679 m, comprende una piccola piscina (19), due *apodyterium* con sistema di riscaldamento ipocausto (21-22; Fig. 14), l'*heliocaminus* (camera speciale per il bagno di sole, con esposizione a sud o sudovest, che riceveva la luce solare tramite grandi finestre; 23a), il grande *calidarium* (24), che mostra una parte della volta a botte alta 11,570 m più il muro della copertura con spessore di 0,80 m (altezza complessiva 12,370 m), il *frigidarium* (28), i *prae-furnium* (21, 22, 29, 40, 44)^[6],

2 Le metodologie del sudore sono collegate al bagno terapeutico. Secondo Aulo Cornelio Celso (*De Medicina*, II, 17), medico Romano del I secolo a.C., il sudore può essere provocato con il metodo del caldo secco (*siccus calor*) dovuto al calore della sabbia, al forno asciutto e al *laconicum*, oppure con il metodo del bagno nell'acqua calda del *calidarium*.

3 I *tubuli* sono tubi in terracotta inseriti nel muro e fissati con morsetti di metallo e malta. Le *tegulae mammatae* sono grandi mattoni quadrati, con protrusioni ai quattro angoli, attaccati ai muri mediante morsetti o perni cilindrici in terracotta. Lo spazio creato tra i mattoni e il muro è in comunicazione con l'ipocausto. Vitruvio (VII, IV, 1-2).

4 Si tratta del sistema di riscaldamento delle terme Romane, abbastanza diffuso alla fine del I secolo d.C., quando è stato descritto da Vitruvio (V, X, 2-3). L'uso dei muri, oltre ai pavimenti, ha creato un sistema di riscaldamento più efficiente e un migliore uso dei gas dell'ipocausto. I più antichi esempi di ipocausto sono quelli dei Bagni Stabiani di Pompei (tardo II secolo a.C.) e i Bagni Greci di Olimpia (100 a.C.) (Yegul 1992).

5 La profondità è stata determinata considerando che l'acqua copriva un bagnante seduto fino alle spalle.

6 La fornace di un bagno Romano è composta da un arco in mattoni a diretto contatto con lo spazio vuoto sotto il pavimento del vano da riscaldare. Il termine *prae-furnium* indica solo l'arco di alimentazione (*fornix*), oppure l'area con una o più fornaci per scaldare l'acqua destinata al *calidarium* e a produrre il vapore per l'ipocausto. Le fornaci non avevano grate di metallo, la loro temperatura non era molto elevata, il fuoco era acceso direttamente sul pavimento sotto l'arco, e il carburante era costituito da legno (Yegul 1992).



Figura 14 - Parte del pavimento del sistema ipocausto dell'*apodyterium* (22 in figura 12) che mostra in (a) i tubuli con forma geometrica parallelepipedica rettangolare costituiti da laterizio e in (b) un particolare di questi ultimi.

Figure 14 - Part of the floor of the hypocaust system of the *apodyterium* (22 in figure 12) which shows in (a) the tubuli with a rectangular shape made up of brick, and in (b) a detail of the latter.

la cisterna cilindrica per la raccolta dell'acqua piovana necessaria per il funzionamento delle TT (83). Seguono, in successione, la biblioteca con due latrine laterali (32), la sala di lettura (33), il *cryptoporticus* (utilizzato per passeggiate al coperto; 34), le camere per la sosta (35-38), l'*exedra* (39), un corridoio (45), le latrine (47 e 63 con alcune postazioni), gli *hospitalia* (9 camere per gli ospiti; 51-59), una grande sala di soggiorno (65), le sostruzioni (67-82) con arcate e pilastri a sostegno dello sbancamento della collina, costituita dal Membro di Poggio Vivo, eseguito mediante due tagli ortogonali.

Particolare attenzione meritano le seguenti strutture (Fig. 12): i *praefurnium* (21, 22, 29, 40, 44), in cui si osserva l'arco di alimentazione, il *calidarium* (24), lungo 19,64 m, largo 8,98 m e profondo 1,02 m, con un volume di 179,9 m³, il *frigidarium* (28), lungo 9,60 m, largo 5,50 m e profondo 1,05 m, con un volume di 55,44 m³, la piccola vasca del *tepidarium* lunga 4,60 m, larga 3,55 m e profonda 0,95 m con un volume di 15,5 m³, e il muro semicircolare restaurato (83) (Fig. 15) con spessore 0,76 m e diametro interno di 14,40 m, nella cui parte inferiore sono presenti due contrafforti con geometria cuneiforme lunghi 1,02 m, larghi 1,21 m e alti 0,58 m (Fig. 15). Uno di questi contrafforti contiene alla base due tubi (*fistulae*) di piombo a sinistra (Fig. 16 a) e a destra (Fig. 3 e 16 b), le cui sezioni hanno forma ellissoidale con dimensioni simili e saldatura rivolta in alto per facilitare eventuali riparazioni in caso di perdite. Nel



Figura 15 - La struttura semicircolare restaurata (83 in figura 12) con i due contrafforti cuneiformi. La base del contrafforte a destra contiene i due tubi di piombo illustrati nella figura 16.

Figure 15 - The restored semi-circular structure (83 in figure 12) with the two cuneiform buttresses. The base of the buttress on the right holds the two lead pipes shown in figure 16.



Figura 16 - I tubi di piombo con sezione ellissoidale a sinistra (a) e a destra (b) della base del contrafforte.

Figure 16 - The lead pipes with ellipsoidal section to the left (a) and to the right (b) of the base of the buttress.

tubo di sinistra il diametro maggiore interno è lungo 8,45 cm, quello minore è 5,56 cm e lo spessore della lamina di piombo è 0,804 cm. Nel tubo di destra il diametro maggiore interno è lungo 8,5 cm, quello minore è 5,54 cm e lo spessore della lamina di piombo è 0,806 cm. La struttura semicircolare corrisponde a quella circolare completa riportata nella mappa di Manzi (1869) (Fig. 17), in cui si osserva chiaramente che essa è stata

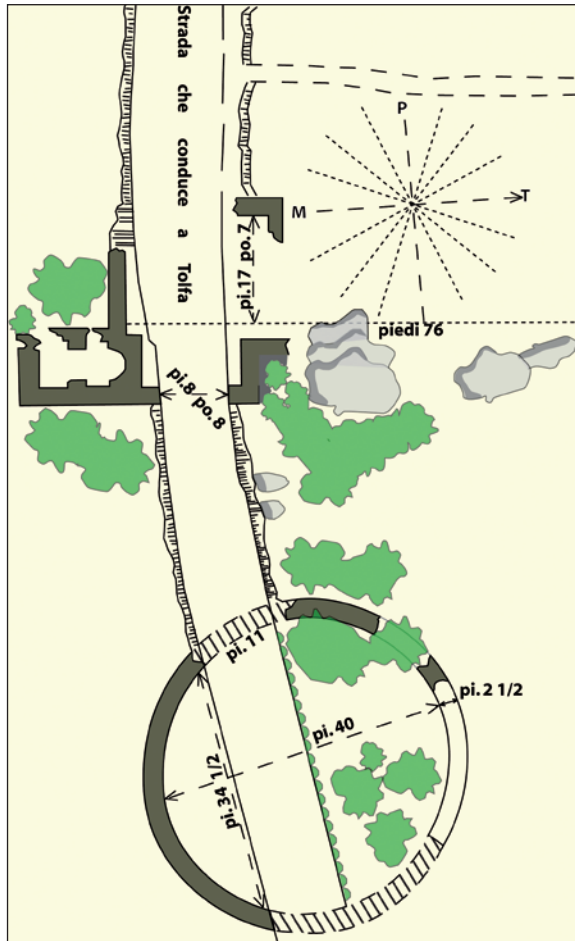


Figura 17 - L'estratto della mappa delle TT di Manzoni (1869) evidenzia il tracciato della vecchia strada provinciale, cioè la strada Civitavecchia-Tolfa, che interseca la struttura circolare della cisterna adibita alla raccolta dell'acqua piovana. Da Manzoni (1869) modificato.

Figure 17 - The map excerpt of the Taurine Baths from Manzoni (1869) highlights the layout of the old provincial road, i.e., the Civitavecchia-Tolfa Road, that intersects the circular structure of the cistern used for the collection of rainfalls. From Manzoni (1869) modified.

tagliata dal tracciato della strada Civitavecchia-Tolfa. Questa struttura circolare suggerisce che si tratta della base di una cisterna con forma cilindrica, ubicata ad una quota superiore di 1,50 m rispetto a quella dei due edifici delle TT, in cui esiste una rete di canalizzazione delle acque reflue, derivanti dalla manutenzione delle piscine del *calidarium*, *tepidarium*, e *frigidarium*, delle latrine e delle acque piovane.

Per la datazione del primo edificio si fa riferimento alle tecniche di costruzione per mezzo dell'*opus incertum* e dell'*opus reticulatum* in piccolo apparato. La prima tecnica è descritta da Lugli (1957), la cui opera, tuttora la più completa e precisa per lo studio archeologico e architettonico dell'epoca romana (Adamas 2011; Inglese e Paris 2020), conferma le idee di Blake

(1947) e distingue tre "maniere". Nel primo tipo le rocce con differente forma e volume sono messe in opera in maniera caotica con abbondante malta, quindi non sono in contatto, e la superficie esterna non è livellata. Nel secondo tipo si verifica un migliore livellamento della superficie esterna, minore quantità di malta, migliore qualità delle rocce, che, con forme poliedriche arrotondate, sono in contatto. Il terzo tipo è caratterizzato da una accurata scelta delle rocce, che giacciono secondo la loro litologia. La differenza cronologica tra questi tipi è considerata dall'Autore una modalità per distinguerli, perché essa dipende dalla disponibilità del materiale lapideo, dal tipo di struttura che si deve costruire e dalla abilità degli operai. Tali "maniere" sono riferite a tre periodi: (1) tra la fine del terzo secolo e 100 a.C. per la prima e la seconda "maniera"; (2) dal 100 a.C. al 55 a.C. per la seconda e la terza "maniera"; (3) dal 55 a.C. al tardo impero (pseudo - incerto; misto con mattoni). Successivamente Adams (2011), seguendo le idee di Blake (1947) e Lugli (1957), ritiene che: (1) il passaggio della tecnica in piccolo apparato dell'*opus incertum* all'*opus quasi reticulatum* e all'*opus reticulatum* avviene nell'ultimo quarto del II secolo a.C., (2) l'*opus incertum* raggiunge il massimo sviluppo tra il II e il I secolo a.C., e (3) è una forma particolare di *opus caementicium* tale da diventare un paramento funzionale e gradevole di un muro in calcestruzzo. Questo tipo di muratura è stata utilizzata in moltissime strutture edilizie (Lugli 1957; Adam, 2011) e in alcuni ponti dell'Italia centrale (Lazio e Marche; Galliazzo 1995), Italia meridionale (Campania; Chiocchini et al. 2021), e della Francia (Pontaujard, Montbrison-sur-Lez Villeperdrix and Pont-de-Barret, Drôme sur le Roubion; Barrool et al. Eds. 2011).

Per la tecnica dell'*opus reticulatum* Lugli (1957) distingue due "maniere": *opus quasi reticulatum* (100 - 55 a.C.) e *opus reticulatum* a parete piena (55 a.C. - 69 d.C.). Pertanto, tenendo presente che il passaggio dall'*opus incertum* all'*opus quasi reticulatum* e all'*opus reticulatum* avviene nell'ultimo quarto del II secolo a.C. (Lugli 1957; Adam 2011), la datazione della costruzione del primo edificio può essere attribuita al periodo compreso tra la parte terminale del II secolo e quella del I secolo a.C. (tarda età repubblicana). Bastianelli (1961a/1985) specifica questa datazione come "l'età sillana (circa 80 a.C.)", ripresa anche da Heinz (1986) e Yegul (1992), mentre secondo Broise e Jolivet (1991) la datazione sarebbe il secondo quarto del I secolo a.C., e secondo Köhler (1999) e Chellini (2002) tra gli ultimi anni della Repubblica ed i primi dell'Impero. Inoltre, nel primo edificio sono presenti interventi di restauro e trasformazione eseguiti durante il lungo periodo di circa due secoli tra la sua costruzione e quella del secondo edificio.

Per la datazione del periodo di costruzione del secondo edificio si deve tenere presente innanzitutto che la nuova maniera di rivestire le pareti con materiale laterizio (*opus testaceum*) cotto in fornace e ben stagionato comincia con Augusto e si afferma con l'imperatore Tiberio (Lugli 1954). Inoltre, Bastianelli (1962) ha utilizzato i bolli di 146 mattoni, specificando che le indicazioni più frequenti nei bolli sono: EX PR (AEDIS) seguito dal nome del proprietario del terreno dal quale era estratta l'argilla; EX FIG (LINIS) con il nome del proprietario della fabbrica (figlina); OP (US) DOL (IARE) oppure O.D. con il nome del servo addetto alla confezione dei mattoni; le date consolari e il nome dei consoli abbreviato seguito da CO (N)

S (*ILIBUS*). L'Autore evidenzia che i bolli sono rari fino al regno degli imperatori Flavi (Vespasiano, 69 – 79 d.C.; Tito 79 – 81 d.C.; Domiziano, 82 – 96 d.C.). Dei 146 bolli esaminati, 2 risalgono al 59 d.C. del regno dell'imperatore Nerone (57 – 68 d.C.), 24 bolli del regno dell'imperatore Traiano (98 – 117 d.C.) sono attribuiti ai lavori sopra ricordati di restauro e trasformazione nel primo edificio, mentre i 116 bolli provenienti dal secondo edificio comprendono il periodo di 13 anni tra il 123 e il 136 d.C. del regno dell'imperatore Adriano (117 – 138 d.C.). Pertanto, la costruzione del secondo edificio risale al regno dell'imperatore Adriano.

I molti interventi di restauro, consolidamento e ricostruzione hanno avuto effetti positivi sulla statica delle strutture architettoniche sopravvissute alle devastazioni passate e ai danni ambientali recenti. Attualmente sono particolarmente rilevanti le due fessure verticali beanti nella muratura orientale del *calidarium* del secondo edificio (vano 24; Fig. 12) e sull'arco del vano 7 (Fig. 12) del primo edificio.

Modalità di funzionamento delle TT

L'approvvigionamento e l'immagazzinamento dell'acqua

Secondo Bastianelli (1943), seguito da Heinz (1986), Köhler (1998), e Chellini (2002), l'acqua necessaria alle TT derivava da piccole sorgenti nelle colline ad est del TT ed era raccolta, nei pressi di Casale dell'Argento (oggi Casale Bottega; Fig. 18), in una ampia "conserva", il cui ritrovamento è stato confermato da Brunori (1990), costituita da quattro gallerie intercomunicanti ciascuna lunga 18 m, larga 4 m e di altezza imprecisata a causa dell'interramento. Da questa "conserva" l'acqua fluiva in un acquedotto comprendente un cunicolo, prima sotterraneo, poi appoggiato su un muro di sostegno, di cui un tratto lungo 70 m correva lungo la vecchia strada provinciale per Allumiere e Tolfa, come illustrato nella mappa di Figura 18. Infine, l'acqua era raccolta nel *castellum aquae* e distribuita nelle varie parti delle TT mediante *fistulae plumbee*. Questa ipotesi non è attendibile per i motivi appresso specificati.

- Bastianelli (1942) definisce le sorgenti come "piccole" e non specifica il loro numero, l'ubicazione precisa e la portata complessiva. Al riguardo è necessario tenere presente che nei Monti della Tolfa le sorgenti alimentate localmente dai piccoli corpi idrici sospesi del Complesso del Flysch e della Pietraforte sono molto poche, con portate inferiori a 1 L/s e regime temporaneo. Pertanto, queste "piccole" sorgenti, che sono attualmente estinte, non potevano essere utilizzate per il funzionamento delle TT.
- Le curve di livello della mappa di Bastianelli (1942) (Fig. 18) non corrispondono alla reale topografia della zona e la quota 141 m s.l.m. di Casale dell'Argento è errata perché è 250 m s.l.m. Inoltre, la "conserva" è ubicata a quota 211 s.l.m. sul margine destro di un impluvio che non esiste.
- L'Autore non fornisce la descrizione della struttura dell'acquedotto e la sua datazione.
- Non si osserva alcun rudere dell'acquedotto lungo tutto il tracciato riportato nella mappa della Figura 18. Questa mancanza è inspiegabile: infatti nel segmento superiore lungo il versante non sono visibili resti di manufatti antichi, e nel segmento inferiore, dove i numerosi resti dei due edifici delle TT sono sopravvissuti alle devastazioni dei Saraceni nel 833 d.C. e successivamente sono

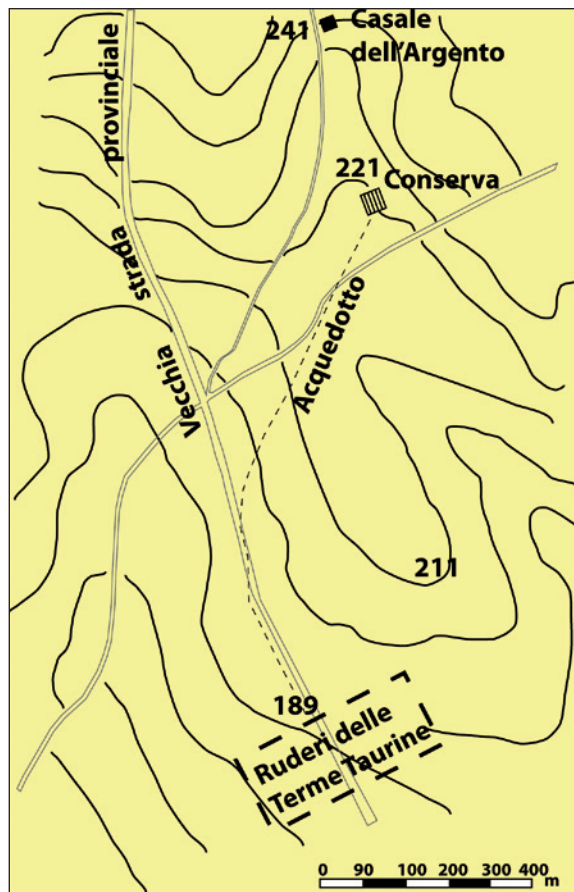


Figura 18 - La mappa di Bastianelli (1943) mostra l'acquedotto che portava l'acqua alle TT. Da Bastianelli (1943) modificato.

Figure 18 - The Bastianelli's (1943) map shows the aqueduct that brought water to the Taurine Baths. From Bastianelli (1943) modified.

stati oggetto di interventi di consolidamento, restauro e ricostruzione, non vi è traccia dell'acquedotto.

- L'Autore non descrive in quale parte del *castellum aquae* si inseriva l'acquedotto. Pertanto, pur volendo ammettere l'esistenza di un acquedotto, privo di resti, che raccoglieva le acque di "piccole" sorgenti temporanee attualmente estinte, non è possibile dimostrare in alcun modo che questo acquedotto fosse a servizio delle TT.
- Il serbatoio per la raccolta di acqua non può essere attribuito ad un *castellum aquae* perché questa struttura idraulica, descritta da Vitruvio (VIII, VI, 7), era utilizzata negli acquedotti come serbatoio di accumulo per la ripartizione a tre tipi di utenze. Questo argomento è illustrato da Frontino nel capitolo 79 del suo libro *De Aquaeductu urbis Romae*, che scrisse dopo aver assunto nel 97 d.C. la importantissima carica per il controllo dell'approvvigionamento idrico e per la gestione degli acquedotti di Roma (*curator aquarum*). Le tre utenze sono le seguenti: (1) i bagni pubblici a nome dell'imperatore con 824,5 l/s;

(2) l'uso pubblico, come zone ufficiali e militari, teatri, fontane e bagni con 1858,1 l/s; (3) i privati, le case e le industrie con 2125,7 l/s. Roma aveva 247 *castella*. Questi dati sono ripresi da Yegul (1992), Pace (2010), e Lombardi et al. (2016).

Inoltre, si deve escludere che i due edifici delle TT potessero essere riforniti dall'acquedotto che l'imperatore Traiano aveva fatto costruire per fornire l'acqua al porto di *Centumcellae*, perché il suo tracciato, sviluppato alla quota di 75 m s.l.m. circa 1,7 km a NO delle TT sul versante sinistro del Fosso Fiumarella, è 113 m più basso rispetto alla quota di 188 m s.l.m. delle TT. Pertanto, il rifornimento di acqua del primo edificio di età tardo repubblicana è stato risolto dagli ingegneri romani per mezzo di una cisterna cilindrica per la raccolta di acqua piovana. Questa antica tecnologia era utilizzata per l'acqua potabile di molte città antiche, in particolare quando mancavano gli acquedotti prima della fine del sesto secolo a.C. (Tolle-Kanstenbein 1993), e nelle isole vulcaniche prive di sorgenti, come Santorini, in Grecia, Ventotene in Italia, e Delo e Naxos delle Isole Cicladi in Grecia, che avevano molte cisterne. Inoltre, circa il rifornimento di acqua per le terme, Vitruvio (VIII, VI, 14) specifica che la soluzione più comune è costituita, oltre ai serbatoi di acqua piovana sui tetti degli edifici a servizio dei bollitori e delle piscine, dalle cisterne situate fuori delle terme, talvolta composte da alcune camere. Infatti, le cisterne sono state utilizzate nei grandi complessi termali, come per i Bagni Stabiani di Pompei, i Bagni di Nettuno e i Bagni dei Nuotatori di Ostia, per i Bagni di Licinio di Dougga in Tunisia, per la piccola città *Castellum Tidditanorum* (città di Tiddis) in Algeria con tre cisterne e per i Bagni dei Legionari della fortezza di Lambaesis con una cisterna lunga 50 m in Algeria (Yegul 1992). Il volume interno della cisterna a servizio delle TT è stato definito in funzione del volume di acqua necessario per riempire le piscine del *calidarium* (61,5 m³), del *frigidarium* (38 m³) e del *tepidarium* (18,8 m³), in totale 118,3 m³ di acqua. La costruzione del secondo edificio delle TT con due ulteriori piscine per il *calidarium* (179,9 m³), il *frigidarium* (55,4 m³), e la piccola vasca del *tepidarium* imperiale (15,5 m³), in totale 250,8 m³ di acqua, ha necessariamente richiesto di aumentare il precedente volume interno della cisterna cilindrica, la cui forma e struttura sono uguali a quelle della cisterna, costruita nel II – III secolo d.C. con l'identico diametro della base di 14 m, a servizio di un *fundus* nel suburbio sudorientale di Roma (Chiocchini 2019). Di conseguenza, la cisterna cilindrica delle TT comprendeva i seguenti elementi strutturali e idraulici, come illustrato dai numeri 1 - 11 della Figura 19: i muri in calcestruzzo (*opus caementicium*) (1) con spessore 0,76 m per contrastare la pressione interna dovuta al carico idraulico dell'acqua, ed impermeabilizzati con malta idraulica (*opus signinum*) (2); la copertura, con il foro al centro (3), la cui superficie superiore è impermeabilizzata con malta idraulica e leggermente inclinata verso il foro allo scopo di agevolare la raccolta e il deflusso delle precipitazioni; la base (4) con il corridoio interno (4ⁱ), il corridoio esterno (4ⁱⁱ), il compartimento centrale (4ⁱⁱⁱ), ed i contrafforti (4^{iv}) per rinforzarla; le cassette di distribuzione (5) e i tubi di piombo (*fistulae*) (6) per il trasporto dell'acqua verso le varie strutture delle TT; il vestibolo di accesso (7) con l'arco (7ⁱ) e la saracinesca (8) per lo scarico dell'acqua durante i necessari lavori di manutenzione; lo sfioratore (9) per il

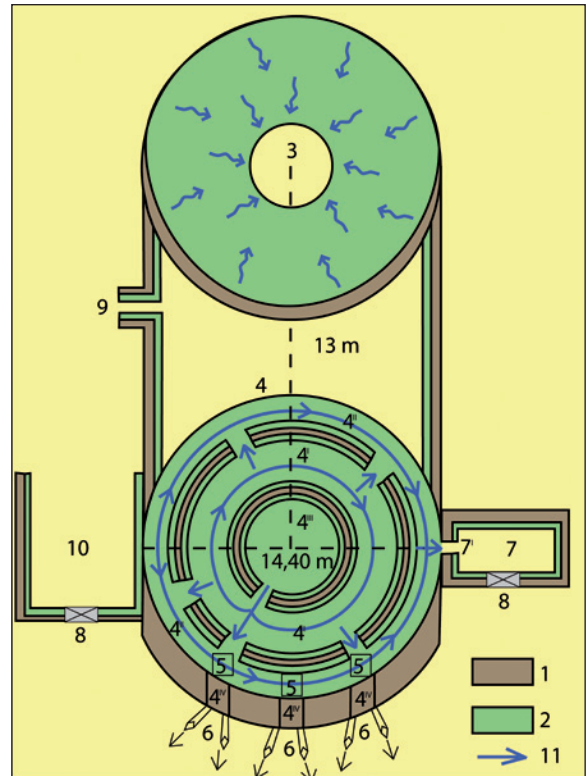


Figura 19 - Ricostruzione schematica della cisterna per la raccolta dell'acqua piovana. 1, muri in calcestruzzo (*opus caementicium*); 2, malta idraulica (*opus signinum*); 3, copertura con il foro; 4, base con il corridoio interno (4ⁱ), corridoio esterno (4ⁱⁱ), compartimento centrale (4ⁱⁱⁱ), contrafforti (4^{iv}), cassette di distribuzione (5) e tubi di piombo (*fistulae*) (6); 7, vestibolo di accesso con l'arco (7ⁱ); (8) saracinesca; 9, sfioratore per il deflusso dell'acqua verso l'esterno; (10) serbatoio di raccolta di questa acqua; 11, circolazione dell'acqua.

Figure 19 - Schematic reconstruction of the cistern for the collection of rainfalls. 1, concrete walls (*opus caementicium*); 2, hydraulic mortar (*opus signinum*); 3, cover with the hole; 4, base with the inner corridor (4ⁱ), outer corridor (4ⁱⁱ), central compartment (4ⁱⁱⁱ), buttresses (4^{iv}), distribution boxes (5), and lead pipes (*fistulae*) (6); 7, access vestibule with the arch (7ⁱ); (8) sluice gate; (9) opening in the upper part of the cistern for the downflow of water to the outside; (10) tank for collecting this water; 11, circulation of the water.

deflusso dell'acqua in eccesso verso l'esterno; (10) il serbatoio di raccolta di questa acqua. La forma circolare delle cisterne agevolava il lento deflusso dell'acqua (11) dal compartimento centrale (4ⁱⁱⁱ) verso i due corridoi concentrici (4ⁱ) e (4ⁱⁱ) e il vestibolo di accesso (7) che aveva la funzione di trattenere l'acqua mediante la chiusura della saracinesca (8), consentendo la deposizione delle particelle in sospensione, come la *piscina limaria* negli acquedotti. La posizione della base della cisterna a quota superiore di 1,5 m rispetto a quella dei due edifici garantiva il regolare deflusso dell'acqua verso di essi. Per valutare l'altezza della cisterna è necessario considerare i seguenti elementi: (1) il volume totale di acqua necessario per

le piscine dei due edifici (369 m³) e per il ricambio periodico dovuto a motivi igienici e alla manutenzione; (2) l'altezza massima dei due edifici registrata nel *calidarium* di età imperiale (12,370 m) come limite massimo approssimativo. Pertanto, essendo noto il diametro interno della copertura e della base (14,40 m) della cisterna ed ipotizzando un'altezza di 13 m, il volume interno della cisterna è:

$$7,20 \times 7,20 \times 3,14 = 162,77 \times 13 = 2116 \text{ m}^3$$

valore che, al netto del volume dei muri che separano i due corridoi concentrici, stimato in 309 m³, diventa 1807 m³. Questo volume non poteva essere utilizzato interamente, perché l'acqua accumulata nella cisterna non doveva arrivare a contatto con la copertura. Pertanto, uno sfioratore collocato a circa 1 m dalla copertura consentiva che la colonna di acqua poteva avere uno spessore massimo teorico di 12 m, che in pratica non poteva essere raggiunta a causa del suo continuo consumo per le attività delle TT, facendo defluire l'acqua in eccesso automaticamente all'esterno in un serbatoio esterno, utilizzabile per la pulizia delle terme. Sottraendo il volume della cisterna tra la copertura e lo sfioratore (163 m³), il volume interno utile per il rifornimento di acqua è di 1644 m³.

La portata e la pressione limite dei tubi

La dimensione delle sezioni dei due tubi di piombo alla base della cisterna fornisce utili indicazioni sulla loro funzionalità, con particolare riferimento alla portata e alla pressione limite di rottura in relazione alla colonna d'acqua nella cisterna. A tale scopo si deve tenere presente che i tubi erano prodotti piegando le lamine di piombo intorno ad un'asta di legno con forma cilindrica. Queste lamine erano preparate spandendo su una lastra di marmo liscia una quantità di piombo corrispondente al peso del tubo, in modo da ottenere una lamina rettangolare con spessore costante, la cui larghezza era adeguata al tubo da produrre. I bordi della lamina erano sovrapposti e saldati con stagno o con una lega di piombo e stagno per tutta la lunghezza del tubo, oppure mediante battitura dei bordi sovrapposti. Durante le operazioni di posa in opera del tubo la fascia della saldatura era posizionata in alto allo scopo di facilitare eventuali interventi di riparazione in caso di perdite di acqua (Pace 2010). Inoltre, le sezioni dei tubi erano considerate circolari, perché il calice (*calix*)⁷ era circolare, anche se in realtà erano ellissoidali o con la forma di "olivella", come la definiva Lanciani (1881). Jacono (1934) ha superato questa incongruenza proponendo che il diametro "d" della sezione circolare, messa a confronto con la sezione reale ellissoidale, è rappresentato con la seguente formula:

$$d = \frac{\left(L - \frac{3}{4}s\right) + t}{2} \quad (1)$$

in cui "L" è il diametro longitudinale passante per la cuspid, "t" è il diametro trasversale perpendicolare a "L" (Fig. 20), "s"

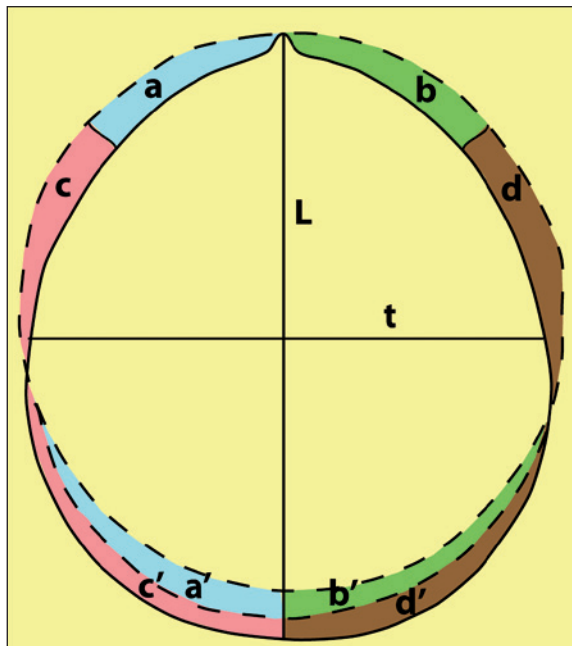


Figura 20 - Confronto tra la sezione reale di un tubo di piombo (linea continua) e la sezione circolare (linea tratteggiata). Le aree a - a', b - b', c - c', d - d' sono uguali a meno di infinitesimi. Da Jacono (1934) modificato.

Figure 20 - Comparison between the real section of a lead pipe (solid line) and the circular section (dashed line). The areas a - a', b - b', c - c', d - d' are equal to less than infinitesimals. From Jacono (1934) modified.

è lo spessore della lamina di piombo, i cui $\frac{3}{4}$ rappresentano la cuspid della sezione reale del tubo dovuta al piombo della saldatura. La formula esprime la media aritmetica del diametro longitudinale "L" passante per la cuspid e del diametro trasversale "t". Nella Figura 20 si nota che l'area della sezione circolare con il diametro calcolato mediante la formula (1) e l'area della sezione reale ellissoidale sono uguali a meno di infinitesimi. È altresì opportuno evidenziare che la lunghezza dei tubi di piombo era in genere di 10 piedi (2,96 m), come suggerito da Vitruvio (VIII, 6, 4).

Per quanto riguarda le dimensioni dei tubi (spessore della lamina di piombo e diametro interno), si osserva che esiste una notevole differenza tra Vitruvio e Frontino. Infatti, secondo Vitruvio (VIII, VI, 4) e Plinio (*Naturalis Historia*, XXXI, 33) la suddivisione dei tubi in base alle misure⁸ è determinata dalla larghezza della lamina di piombo prima di essere piegata in tondo; di conseguenza, se il diametro interno dei tubi è misurato con questo sistema, lo spessore risulta di 6 mm per tutti i tubi (Pace 2010). Frontino, invece, fa riferimento all'unità di misura di base o modulo⁹ (*modulus*) denominata *quinaria*

⁷ Il calice, che serviva per inserire le tubazioni del prelievo di acqua nel *castellum aquae*, era un tubo di bronzo con forma circa tronco conica, lunghezza minima di 22 cm e con un tratto caratterizzato da diametro interno uniforme che doveva rimanere costante ed uguale per 50 piedi (14,82 m) nel tubo di piombo applicato al calice (Pace 2010). 1 piede (pes) = 29,64 cm.

⁸ In dita. 1 dito (*digitum*) = 1,85 cm.

⁹ I moduli, da quello più piccolo, sono i seguenti: *Quinaria*, *Senaria*, *Octonaria*, *Denaria*, *Duodenaria*, *Quinum denum*, *Vicenaria*, *Tricenaria*,

(capitolo 26 del testo: *quinariae modulus et certus et maxime receptus est*) di origine incerta, il cui nome deriva dal diametro della sezione di un tubo di cinque quadranti, cioè $5/4$ di dito ($5/4 \times 1,85 = 2,3125$ cm). Pertanto, utilizzando questo sistema di misura si individuano 16 moduli con i relativi diametri interni dei tubi (per la *quinaria* 0,8188 cm; Pace 2010), che assumono valori molto differenti in base alle indicazioni dei due autori. Pace (2010), riprendendo il parere di Di Fenizio (1916) circa le conclusioni errate di alcuni tecnici che hanno seguito le indicazioni di Vitruvio, per definire il diametro interno dei tubi ribadisce la necessità di usare il metodo di Frontino, secondo cui i moduli applicati ai muri dei *castellum aquae* mediante il calice devono essere disposti a livello preciso (*ad libram*) e sulla medesima linea orizzontale (*ad lineam*). Da questa configurazione consegue che la minima altezza di carico idraulico deve corrispondere al raggio del modulo più grande (*Centenun vicenum*), e, secondo Di Fenizio (1916), il valore minimo ammissibile per l'altezza di carico idraulico risulta di 0,115 m, al quale corrisponde per la *quinaria* il valore minimo ammissibile di 0,47 l/s in 24 ore. Secondo Pace (2010) si devono aggiungere 5 mm affinché tutti i moduli assorbano tutta l'acqua di loro competenza, di modo che l'altezza di carico idraulico diventa 0,12 m e la *quinaria* assume il valore di 41,5 m³ in 24 ore, ovvero 0,480 l/s.

In base a quanto sopra illustrato, è possibile ora calcolare il diametro interno della sezione circolare ragguagliata dei due tubi di piombo della cisterna mediante la formula (1). Per il tubo di sinistra si ha:

$$d_s = \frac{84,5 - 6,03 + 55,6}{2} = 67,035 \text{ mm} = 6,7 \text{ cm}$$

e per il tubo di destra:

$$d_d = \frac{85 - 6,045 + 55,4}{2} = 67,277 \text{ mm} = 6,7 \text{ cm}$$

Utilizzando le dimensioni e le portate dei venticinque moduli di Frontino, questi valori sono molto prossimi al modulo *Quinum denum* (3,75 dita = 6,93 cm) cui corrispondono i seguenti dati (Pace 2010): (1) il peso di 180 libbre^[10] (58,626 kg) per una lunghezza modulare di 10 piedi^[11] (2,964 m) (Vitruvio VIII, 6, 4); (2) 9 *quinariae* con portata $Q_{qd} = 4,32$ l/s; (3) pressione limite di rottura pari a 29,11 kg/cm² calcolata con il diametro di Frontino (capitoli 39-63). Pertanto, poiché il diametro dei due tubi di piombo (6,7 cm) è inferiore di 0,23 cm rispetto a quello del *Quinum denum* (6,93 cm), la loro portata (Q_s e Q_d) risulta più bassa solo del 0,0034% rispetto alla portata di 9 *quinariae* ($Q_{qd} = 4,32$ l/sec), valore che può essere assunto per i due tubi. Inoltre, è possibile determinare la pressione massima che i due tubi di piombo potevano sopportare, utilizzando la relazione che esprime la pressione massima in metri di altezza di una colonna d'acqua:

$$H = 2 \times \sigma_0 \times S / 10^3 \times D \quad (2)$$

in cui $\sigma_0 = 1,25 \times 10^6$ kg/m² è il carico di rottura del piombo fuso (Pace 2010), S è lo spessore del tubo in metri, e D è il diametro interno del tubo in metri.

Per il tubo di sinistra, con $S = 0,804 \times 10^{-2}$ m e $D = 6,7 \times 10^{-2}$ m, si ottiene:

$H_s = 2 \times 1,25 \times 10^6 \times 0,804 \times 10^{-2} / 10^3 \times 0,0670 = 300 \text{ m} = 30 \text{ kg/cm}^2$; per il tubo di destra, con $S = 0,806 \times 10^{-2}$ m e $D = 6,7 \times 10^{-2}$ m, si ottiene:

$H_d = 2 \times 1,25 \times 10^6 \times 0,806 \times 10^{-2} / 10^3 \times 0,0670 = 300,7 \text{ m} = 30,7 \text{ kg/cm}^2$.

Pertanto, i dati sopra illustrati indicano quanto appresso riportato. (1) La portata dei due tubi, dedotta dal loro diametro interno di 6,7 cm, è $Q_s = Q_d = 4,32$ l/s. (2) La pressione massima sopportabile dei due tubi è di 300 m di colonna d'acqua pari a 30 kg/cm². Questo valore, molto superiore alla pressione esercitata da una colonna d'acqua con altezza teorica massima di 12 m nella cisterna, indica che i due tubi potevano erogare l'acqua in sicurezza. Inoltre, il dislivello di 1,5 m tra il piano campagna della cisterna e quello delle TT consentiva il deflusso dell'acqua, che era regolato alla base della cisterna da cassette di distribuzione e valvole di bronzo; queste ultime erano inserite anche nella parte terminale delle tubazioni che alimentavano i due *calidarium*, i due *frigidarium*, e la piccola vasca del *tepidarium* imperiale. A tale scopo sei tubi di piombo, con una portata di 4,32 l/sec (0,00432 m³/s) ciascuno, potevano erogare $4,32 \times 6 = 25,9$ l/s (0,0259 m³/s). La necessità del ricambio periodico dell'acqua, sia per motivi igienici sia per la manutenzione, suggerisce che probabilmente le 5 piscine e la vasca piccola non erano utilizzate contemporaneamente in età imperiale.

Il riscaldamento dell'acqua

Vitruvio (V, X, 1) descrive le raccomandazioni per il rifornimento di acqua dei bagni caldi e delle relative piscine: "Sopra il *praeurnium* si collocano tre bollitori: uno per l'acqua calda, uno per quella tiepida, uno per quella fredda, disposti in modo che, per ogni quantità di acqua che passa dal *tepidarium* al *calidarium*, altrettanta ne viene immessa dall'acqua fredda e da quella tiepida. Una fornace in comune deve riscaldare le piccole camere che contengono le *testudines alveolorum*". Questi sono recipienti metallici semicilindrici aperti da un lato e chiusi dall'altro, costruiti per riscaldare l'acqua e mantenerla calda nelle piscine. Pertanto, sono operativi due distinti sistemi di acqua calda alimentati da un'unica fornace: uno composto dalla combinazione di tre serbatoi che forniscono acqua calda e tiepida per le fontane e le piscine; l'altro con le *testudines alveolorum* che servono per agevolare il riscaldamento dell'acqua nelle piscine e mantenerle calde. Due esempi del primo sistema sono la coppia stufa-bollitore ben conservata nella Villa Rustica di Boscoreale e la stazione di riscaldamento per il bagno pubblico con ipocausto e posti separati per gli uomini e le donne nei Bagni Stabiani di Pompei del II secolo a.C. (Yegul 1992). È ragionevole ritenere che i due sistemi di acqua calda alimentati da un'unica fornace fossero attivi anche nelle TT.

Circa l'entità del calore dei bagni romani, non esistono elementi per conoscere le loro temperature, a parte qualche considerazione qualitativa come quella di Seneca (*Litterae*, LXXXVI, 10) che si lamenta perché "oggi non esiste differenza

Quadragenaria, Quinquagenaria, Sexagenaria, Septuagenaria, Octogenaria, Nonagenaria, Centenaria, Centenun vicenum.

10 1 libbra = 325,7 grammi.

11 Per il valore di 1 piede vedere nota 7.

tra un bagno infuocato e un bagno che è caldo". È peraltro evidente che il calore in alcuni bagni o in alcune loro parti poteva essere maggiore di quello richiesto dal buon senso per l'uso del calore e lo stesso Seneca (*Litterae*, LXXXVI, 10) evidenzia che non esiste alcuno standard per l'entità del calore.

Il combustibile per produrre l'acqua e l'aria calda era costituito dalla legna, che non doveva produrre troppo fumo. A tale scopo era sconsigliato l'uso dell'ulivo i cui fumi grassi sporcavano gli ipocausti e rovinavano le decorazioni degli ambienti. Per accendere il fuoco si usava la pece e la paglia (Pasquinucci 1987). Il gestore delle terme (*conductor balnei*) doveva rifornirsi di legna sufficiente con un certo numero di giorni di anticipo e non poteva rivenderla in base alla *Lex metalli Vipascensis* della città di Vipasca (*Lusitania*, attuale Portogallo).

L'uso della sorgente di acqua termale

Bastianelli (1943; 1961a/1985) sostiene che la sorgente di acqua termale era ubicata presso la nicchia del *calidarium* di tarda età repubblicana e che, "per varie ragioni", non si poteva usare per il funzionamento delle TT, mentre secondo Heinz (1986) l'acqua termale alimentava il *calidarium*. Al riguardo si osserva che la portata della sorgente, prima della sua estinzione dovuta alla perforazione dei 5 pozzi per la costruzione del nuovo impianto termale di Civitavecchia, erogava tra 0,5 e 1,33 L/s, e che verosimilmente questa portata avrebbe potuto essere di poco superiore quando furono costruiti i due edifici delle TT. Tuttavia, l'acqua termale non poteva essere utilizzata nei tubi di piombo, perché essa, essendo ricca di ioni calcio e idrogeno carbonato, deposita molto velocemente il carbonato di calcio, provocando la graduale occlusione dei tubi. Pertanto, si deve escludere che il *calidarium* di età repubblicana ed imperiale fossero alimentato dall'acqua termale della sorgente, utilizzata solo a scopi curativi, richiamati da Vitruvio (VIII, III, 4), che dedica l'Ottavo Libro alle proprietà dell'acqua nel mondo antico¹², ed evidenziati anche da Yegul (1992), Fagan (2001), Guérin-Beauvois (2003) e Rogers (2018).

Il personale

Infine, ma non da ultimo, si deve tenere presente che uno stabilimento per i bagni come quello delle TT, necessitava di molto personale di servizio. Un primo gruppo era destinato sia a trasportare ed immagazzinare il combustibile costituito da legno, sia a rendere operativi e tenere in ordine i recipienti per riscaldare l'acqua. Un secondo gruppo era incaricato di pulire e lucidare gli attrezzi e i dispositivi metallici e a tenerli liberi da ruggine e corrosione. Un terzo gruppo era addetto alle pulizie delle stanze e delle piscine e a lucidare i marmi. Un quarto gruppo, composto da tecnici esperti (*fornacator*), doveva

curare la gestione del riscaldamento dell'acqua mediante le fornaci e la manutenzione di tutto il sistema idraulico. Inoltre, il personale comprendeva un responsabile della conduzione giornaliera (*conductor balnei*), un sorvegliante dell'operatività quotidiana (*balneator*) e un addetto al guardaroba (*capsarius*).

Discussione

L'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area delle TT, i dati dell'archivio fotografico della Soprintendenza Archeologica, il riesame delle strutture architettoniche dei due edifici, e la definizione delle modalità di funzionamento delle TT suggeriscono di focalizzare l'attenzione sugli argomenti di seguito riportati.

Idoneità del sito per la costruzione delle Terme Taurine

Ai fini della progettazione e realizzazione delle TT, la scelta del sito risulta idonea sia a causa delle condizioni geologiche e geomorfologiche molto favorevoli, sia per la disponibilità immediata del materiale lapideo (calcari marnosi e silicei, travertino, argilla, sabbia) necessario per produrre il calcestruzzo, la malta, i laterizi,¹³ ed i paramenti. Purtroppo, alla bellezza architettonica delle TT perfettamente inquadrata nell'ambiente dell'amenissimo sito collinare in cui sono state costruite dai Romani, si contrappone la loro pesantissima compromissione, prima ad opera dei barbari, successivamente a causa della costruzione sia della strada Civitavecchia-Tolfa nel 1820, il cui tracciato ha intercettato la parte mediana del sito (in particolare la cisterna), sia del nuovo impianto termale di Civitavecchia circa 450 m a NO delle TT, il cui edificio non è stato completato ed è abbandonato. Infatti, i cinque pozzi perforati per la captazione di acqua termale nel sottosuolo hanno causato l'estinzione delle sorgenti termali storiche delle TT e della Ficoncella, producendo un danno ambientale irreversibile.

Riesame delle strutture architettoniche dei due edifici e loro datazione

Le osservazioni qualitative eseguite sulle murature e le piscine dei due edifici indicano che gli elementi architettonici sono quelli riconosciuti da Bastianelli (1961a/1985), successivamente confermati da Heinz (1986) e Köhler (1998; 1999), tranne la struttura idraulica necessaria al rifornimento dell'acqua. L'uso dei paramenti in *opus incertum* e *opus reticulatum* ha consentito di datare il primo edificio al periodo tra la fine del II secolo e quella del I secolo a.C., cioè la tarda età repubblicana specificata come "l'età Sillana (circa 80 a.C.)" da Bastianelli (1961a/1985), ovvero tra gli ultimi anni della Repubblica e i primi dell'Impero, mentre la costruzione del secondo edificio in *opus testaceum* è avvenuta durante il regno dell'imperatore Adriano in base ai bolli dei laterizi esaminati da Bastianelli (1961a/1985). Sarebbe molto utile riconoscere le strutture architettoniche originali, quelle restaurate, consolidate e

12 "Tutte le sorgenti calde hanno proprietà medicinali perché la loro acqua si scompone, si depura e acquista nuove proprietà con diverse possibilità di impiego mediante i processi di riscaldamento. Infatti, le sorgenti solfuree curano le malattie nervose perché riscaldano e bruciano gli umori dannosi e li eliminano dal corpo. Quelle alluminose, invece, quando il corpo è colpito da paralisi o da qualche altra malattia che rende invalide le membra, hanno la funzione di rivitalizzare la parte malata penetrando con il loro benefico calore attraverso i pori aperti e a poco a poco le restituiscono la salute".

13 Circa 6 km a nord di Civitavecchia i sedimenti argillosi del Pliocene inferiore sono stati utilizzati nei secoli passati per la produzione di laterizi.

ricostruite, utilizzando le tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la relativa rappresentazione con il metodo fotogrammetrico per i Beni Culturali (Girelli 2007; Gencer e Turan 2017).

Funzionamento delle Terme Taurine

A causa della mancanza di sorgenti perenni, sono state utilizzate le piogge raccolte dentro una cisterna cilindrica con volume interno utile di 1644 m³ per fornire l'acqua necessaria al funzionamento delle TT. Questa quantità di acqua, il volume totale di quella delle sei piscine (369 m³), e la necessità di ricambiare periodicamente l'acqua, sia per motivi igienici sia per la manutenzione, suggeriscono che in età imperiale le sei piscine non erano utilizzate contemporaneamente. Inoltre, la quantità molto limitata di acqua termale della sorgente era usata per le proprietà curative, tenendo presente che il rapido deposito di carbonato di calcio avrebbe prodotto la graduale occlusione dei tubi.

Stato di conservazione delle TT

Nonostante le devastazioni, le depredazioni e lo stato di abbandono avvenuti in oltre 2000 anni, gli interventi di restauro, consolidamento e ricostruzione di molti elementi architettonici e strutturali hanno prodotto uno stato di conservazione tale da rendere ancora l'idea della magnificenza originaria delle TT.

Conclusioni

Il complesso architettonico delle TT, ubicato sul versante occidentale dei Monti della Tolfa, costituisce una delle più elaborate strutture termali regionali, che comprende da due edifici. Il primo, sviluppato su un'area di 2240 m², è composto da 15 vani, incluse tre piscine con volume totale di 118 m³, con paramento in *opus incertum* e *opus reticulatum* che indicano una età tra la fine del II e quella del I secolo a.C., ovvero tra gli ultimi anni della Repubblica o i primi dell'Impero. Il secondo edificio, che occupa un'area di 16.221 m², è composto da 68 vani comprese tre piscine con volume totale 251 m³ e paramento in *opus testaceum*, ed è datato al periodo dell'imperatore Adriano. Di conseguenza, il volume totale di acqua necessario per il funzionamento delle sei piscine dei due edifici è di 369 m³. La discussione di tutti i dati delle TT indica che la nostra ricerca, eseguita anche mediante le tecniche della Geoarcheologia, ha consentito di raggiungere i seguenti obiettivi: (1) descrivere per la prima volta l'assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area che ospita le TT; (2) determinare l'approvvigionamento dell'acqua, il funzionamento delle TT, e l'uso dell'acqua termale da sorgente. Infatti, lo sfavorevole assetto idrogeologico del versante occidentale dei Monti della Tolfa, costituito dal Complesso del Flysch e della Pietraforte con permeabilità relativa molto bassa o nulla e quindi privo di sorgenti perenni, ha suggerito agli ingegneri romani di costruire una cisterna cilindrica per raccogliere le piogge e fornire l'acqua alle TT. Il volume interno utile della cisterna a servizio delle TT, definito in funzione del volume totale di 369 m³ delle sei piscine, è di 1644 m³.

I suddetti obiettivi, essenziali per la costruzione di qualsiasi struttura termale, ma praticamente ignorati o male interpretati dagli studi precedenti sulle TT, contribuiscono a migliorare

le conoscenze sulle modalità di funzionamento degli impianti termali costruiti dai Romani, ed indicano di utilizzare maggiormente le tecniche della Geoarcheologia nelle ricerche sui siti archeologici.

Allo scopo di migliorare la salvaguardia, la manutenzione, e la conservazione delle TT si propongono alla Soprintendenza Archeologica i seguenti suggerimenti.

- Aggiornare la stratigrafia dei due edifici delle TT mediante uno studio per riconoscere le strutture architettoniche originali, quelle restaurate, consolidate e ricostruite.
- Una ricerca finalizzata a definire i tipi di marmi e la composizione dei laterizi e per stabilire la provenienza dei siti minerari di questi materiali.
- Controlli periodici delle condizioni dei materiali, della vegetazione infestante, delle variazioni termiche e idrologiche, dell'azione del dilavamento, degli incendi, delle efflorescenze saline, dell'aggressione chimica ad opera degli agenti inquinanti, del peso dei muri portanti e delle parti accessorie, dell'eventuale cedimento delle fondazioni. A tale riguardo l'analisi ponderale è utile per valutare i pesi dei muri portanti e delle parti accessorie. Questa indagine, eseguita mediante il carotaggio e la determinazione dei loro volumi, pesi specifici e baricentri, è particolarmente significativa per il controllo della loro statica.

Ringraziamenti

La ricerca è stata supportata dall'Associazione Nazionale per gli Interessi del Mezzogiorno d'Italia (ANIMI). Gli Autori sono grati alla Soprintendente Margherita Eichberg e alla funzionaria Rossella Zaccagnini della Soprintendenza Archeologica per l'accesso alle TT e alla relativa documentazione fotografica; a Bruno Luci della stessa Soprintendenza per il supporto durante i rilievi presso le TT; alle Terme dei Papi per aver consentito di utilizzare i dati stratigrafici del pozzo perforato nella loro proprietà al confine con le TT e le analisi dell'acqua termale intercettata dal pozzo; a Dario Tufoni dello Studio di Geologia Ambientale ECO GEO per le stratigrafie dei pozzi, le indicazioni sulla concessione mineraria delle Terme Taurine e le proficue discussioni sull'idrogeologia dell'area oggetto della presente ricerca.

ORCID:

Ugo Chiocchini <http://orcid.org/0000-0003-4106-3350>

Contributo degli Autori

Ugo Chiocchini ha progettato e supervisionato la ricerca, eseguendo il rilevamento geologico, geomorfologico, idrogeologico, il controllo degli elementi architettonici e dei loro materiali, e acquisendo i dati storici presso la Soprintendenza Archeologica; Giovanni Savarese ha eseguito la elaborazione dei dati idrogeologici e la composizione grafica delle figure; Luca Seidenari ha collaborato al controllo degli elementi architettonici e dei loro materiali ed ha eseguito la ricerca bibliografica. Tutti gli Autori hanno collaborato alla revisione del manoscritto.

Riferimenti bibliografici

- ABBATE E, SAGRI M (1970) *The eugeosynclinal sequences*. Sedimentary Geology 4: 251 – 340.
- ADAMS JP (2011) *L'arte di costruire presso i romani - Materiali e tecniche*. X edizione. Longanesi 369 p.
- ALBERTI A, BERTINI M, DEL BONO G, NAPPI G, SALVATI L (1970) *Note illustrative del Foglio 136 Toscana e Foglio 142 Civitavecchia scala 1: 100.000 della Carta Geologica d'Italia*. Servizio Geologico d'Italia. Poligrafica & Cartevalori, Ercolano (Napoli) 141 p.
- ALESSANDRI T (1875) *Sull'acqua termo-minerale di Civitavecchia*. Roma, Botta.
- American Geological Institute (2005) *Glossary of Geology*. Eds. Neuendorf KKE, Mehl JP Jr, Jackson JA Fifth Edition 779 p.
- ANNOVAZZI V (1853) *Storia di Civitavecchia dalle sue origini fino all'anno 1848*, 96 - 107. Roma, Tipografia Ferretti. MDCCCLIII.
- BALDI P, DECANDIA FA, LAZZAROTTO A, CALAMAI A (1974) *Studio geologico del substrato della copertura vulcanica nella zona dei laghi di Bolsena, Vico e Bracciano*. Mem Soc Geol It 13: 575 – 606.
- BARBERI F, BUONASORTE G, CIONI R, FIORELLI A, FORESI L, IACCARINO S, LAURENZI MA, SBRANA A, VERNIA L, VILLA IM (1994) *Plio-Pleistocene geological evolution of the geothermal area of Tuscany and Latium*. Mem Descr Carta Geol d'It XLIX: 77 - 134.
- BARRUOL G, FICHES J-L, GARMY P Eds. (2011). *Ponte Routiers en Gaule Romaine*. Revue Archeologique de Narbonnaise. Supplement 41, Montpellier 685 p.
- BASTIANELLI S (1933) *Notizie degli Scavi di Antichità comunicate alla Reale Accademia Nazionale dei Lincei*. 1933, Regione VII. VIII. Civitavecchia - Scavi eseguiti nelle "Terme Taurine" o "Trajane": 398 – 421.
- BASTIANELLI S (1939) *Gli antichi avanzi esistenti nel territorio di Civitavecchia*. Studi Etruschi XIII: 385- 402.
- BASTIANELLI S (1942) *I. Civitavecchia - Nuove esplorazioni eseguite nelle Terme Taurine*. Atti Reale Accademia d'Italia (1942) XX. Serie Settima. Notizie degli Scavi di Antichità. A cura di Roberto Paribeni, Vol III, Fascicolo 3°: 235 – 252.
- BASTIANELLI S (1961a/1985) *Le Terme Taurine. Bollettino di Informazioni*. Associazione Archeologica "Centumcellae". Anno II. Pagine di Storia e di Archeologia: 24 – 37. Ristampa del 1985.
- BASTIANELLI S (1961b) *Terme Taurine. Il calidarium di età repubblicana*. Bollettino di Informazioni. Associazione Archeologica "Centumcellae". Anno II: 3 – 37.
- BASTIANELLI S (1962) *I mattoni bollati rinvenuti negli scavi delle Terme Taurine*. Bollettino di Informazioni. Associazione Archeologica "Centumcellae". Anno III: 3 – 13.
- BASTIANELLI S (1988) *Appunti di Campagna 1913 – 1949*. Roma.
- BERTINI M, D'AMICO C, DERIU M, TAGLIAVINI S, VERNIA L (1971) *Note illustrative del Foglio 143 Bracciano scala 1: 100.000 della Carta Geologica d'Italia*. Servizio Geologico d'Italia. Nuova Tecnica Grafica 77 p.
- BLAKE ME (1947) *Ancient Roman construction from the prehistoric period to Augustus*. Carnegie Institution of Washington. Publication 570 421 p.
- BOCCALETTI M, DECANDIA FA, GASPERI G, GELMINI R, LAZZAROTTO A, ZANZUCCHI G (1987) *Carta strutturale dell'Appennino Settentrionale*. Pubbl. 429, Note illustrative. CNR Progetto Finalizzato Geodinamica, Tipografia Senese.
- BONI C, BONO P, CAPELLI G (1986) *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem Soc Geol It 35: 991 – 1012.
- BROISE H, JOLIVET V (1991) *Le bain en Etrurie à l'époque hellénistique*. In: Actes de la Table Ronde organisée per l'Ecole française de Rome (Rome 11-12 novembre 1988): 79 - 95.
- BRUNET, C, MONIÈ P, JOLIVET L (1997) *Geodynamic evolution of the Alpine Corsica based on ⁴⁰Ar/³⁹Ar data (abstract)*. Terra Nova EUG 9: 93.
- BRUNORI E (1990) *Laccedotto di Traiano*. In: *Caere e il suo territorio da Aggila a Centumcellae*. A cura di A Maffei e F Nastasi, Libreria dello Stato – Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato: 215 – 219.
- CAINE JS, EVANS JP, FORSTER GB (1996) *Fault zone architecture and permeability structure*. Geology 24 11: 1025 – 1028.
- CALAMAI A, CATALDI R, LOCARDI E, PRATURLON A (1976) *Distribuzione delle anomalie geotermiche nella fascia preappenninica tosco-laziale*. Simp. Intern. Sobre Energia Geotermica en America Latina, Città del Guatemala 16/23 ottobre 1976: 189 - 229.
- CAMPONESCHI B, NOLASCO F (1978) *Le risorse naturali della regione Lazio. Monti della Tolfa e Monti Ceriti*. Regione Lazio 3 175 p.
- CANNIZZARO S (1884) *Acque termo-minerali di Civitavecchia: analisi chimiche del prof. Stanislao Cannizzaro*. Notizie storiche, considerazioni terapeutiche e resoconto clinico del dr. Tito Piermarini. Civitavecchia, Strambi.
- CAPELLI G, MASTRORILLO L, MAZZA R, PETITTA M, BALDONI F, BANZATO F, CASONE D, DI SALVO C, LA VIGNA, TAVIANI S, TEOLI P (2012a) *Carta Idrogeologica del Territorio della Regione Lazio*. S.E.L.C.A.
- CAPELLI G, MASTRORILLO L, MAZZA R, PETITTA M (2012b) *Carta delle Unità Idrogeologiche della Regione Lazio (scala 1: 250.000)*. S.E.L.C.A.
- CAPEZZUOLI E, GANDIN A (2004) *I "travertini" in Italia: proposta di una nuova nomenclatura basata sui caratteri generici*. Il Quaternario 17 (2/1): 273 - 284.
- CARUSO I (1991) *Civitavecchia e il suo territorio*. Regione Lazio Assessorato alla Cultura. Edizioni Quasar 83 p.
- CATALDI R, MONGELLI F, SQUARCI P, TAFFI L, ZITO G, CALORE G (1999) *Geothermal ranking of Italian territory*. Geothermics 24: 115 - 129.
- CELICO P (1988) *Prospezioni idrogeologiche*. Vol. II. Liguori Editore, Napoli. 536 p.
- CHELLINI R (2002) *Acque Sorgive Salutari e Sacre in Etruria (Italiae Regio VII)*. Ricerche Archeologiche e di Topografia Antica. BAR International Series 1067: 89 – 93.
- CHIOCCINI U (2019) *The Roman cistern of road Cristoforo Colombo, Rome, Italy: operating mode and connection to the old Appian Way*. Archaeological and Anthropological Sciences 11: 321 – 336.
- CHIOCCINI U, CASTALDI F, BARBIERI M, EUILLI V (2010) *A stratigraphic and geophysical approach to studying the deep-circulating groundwater and thermal springs, and their recharge areas, in the Cimini Mountains-Viterbo area, central Italy*. Hydrogeology Journal 18: 1319 - 1341.
- CHIOCCINI U, CIPRIANI N, GISOTTI G, MACIOCE A, MANNA F, BOLASCO A, LUCARINI C, PATRIZI GM (1996) *Aree costiere a rischio ambientale: l'esempio di Santa Marinella, provincia di Roma*. Geologia Tecnica

- & Ambientale 1: 35 – 50.
- CHIOCCINI U, SAVARESE G (2020) *Modello idrogeologico concettuale, sorgenti termali e sfruttamento sostenibile del sistema idrotermale di Viterbo*. Mem Descr Carta Geologica d'It CVII: 69 – 100.
 - CHIOCCINI U, DE PIANO M, GAETA M, PAGLIUCA E, POLZONE N, SARMIENTO F (2021) *Geoarchaeological Study of the Pietra Dell'Oglia Bridge at the Service of the Old Appian Way, Campania, Southern Italy*. Archaeological Discovery 9: 223 – 258.
 - CHIOCCINI U, POTETTI M (1998) *Caratteri sedimentologici e stratigrafici delle calcareniti di Tarquinia (provincia di Viterbo)*. Boll. Serv. Geol. d'It., CXVII: 33 – 52.
 - CIVITA M (2005) *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana 794 p.
 - CIVITELLI G, CORDA L (1993) *The Allocthonous Succession. Sabatini Volcanic Complex*. Edited by M Di Filippo. Quaderni de La Ricerca Scientifica 114, Progetto Finalizzato Geodinamica – Monografie Finali Vol 11: 19 – 28.
 - Consiglio Nazionale delle Ricerche (1987) *Progetto Finalizzato Geodinamica*. Neotectonic Map of Italy. Vol 4 Quaderni della Ricerca Scientifica. L.A.C., Firenze.
 - CORTÉZ PÉREZ J, DE SANJOSE BLASCO JJ, ATKINSON DJ, DEL RIO PÉREZ LM (2018) *Assesment of the Structural Integrity of the Roman Bridge of Alcantara (Spain) using the TLS and GPR*. Remote Sensing 10 387. DOI: 103390/rs 10030387.
 - D'ARGENIO B, FERRERI V (1987) *A brief outline of sedimentary models for Pleistocene travertine accumulation in southern Italy*. Rend Soc Geol It 9: 167 – 170.
 - D'ARGENIO B, FERRERI V (1988) *Ambienti di deposizione e litofacies dei travertini quaternari dell'Italia centro-meridionale*. Mem Soc Geol It 41: 861 – 868.
 - D'ARGENIO B, FERRERI V, ANZALONE E (2013) *Travertines of central and southern Italy*. Rend Online Soc Geol It 27: 4 - 9, (<https://doi.org/10.3301/ROL.2013.16>).
 - DE CESARIS F (2005) *Aspetti problematici negli interventi di consolidamento in siti archeologici: terme Taurine a Civitavecchia, catacombe ebraiche a villa Torlonia (Roma)*. Atti del Convegno Conservare il passato: metodi ed esperienze di protezione e restauro nei siti archeologici. Chieti-Pescara, 25-26 settembre 2003. Gangemi Editore.
 - DELAINE J, JOHNSTON DE (1999) *Roman baths and bathing*. Proceedings of the First International Conference on Roman Baths Held at Bath, England, 30 March-4April, 1992. 2 pts. Journal of Roman Archaeology Suppl 37. Portsmouth, RI: Journal of Roman Archaeology.
 - DELLA VEDOVA B, MONGELLI F, PELLIS G, SQUARCI P, TAFFI L, ZITO G (1991) *Heat flow map of Italy*. Int Inst for Geothermal Research – CNR, Pisa.
 - DE RITA D, BERTAGNIN A, FACCENNA C, LANDI P, ROSA C, ZARLENGA F, DI FILIPPO M, CARBONI MG (1997) *Evoluzione geopetrografica-strutturale dell'area tolfetana*. Boll Soc Geol It 116: 143 – 175.
 - DEVOTO G, LOMBARDI G (1977) *Le formazioni sedimentarie ed eruttive del settore Tolfetano-Cerite (Lazio nord-occidentale)*. Quad. Acc. Naz. Lincei 227 (2): 1 – 35.
 - DI FENIZIO C (1916) *Sulla portata degli antichi acquedotti romani e determinazione della quinararia*. Tipografia del Genio Civile.
 - DUCHI V, MINISALE A (1995) *Distribuzione delle manifestazioni gassose nel settore peri-tirrenico toscano-laziale e loro interazione con gli acquiferi superficiali*. Boll Soc Geol It 114: 337 – 351.
 - DUCHI V, MINISALE A, ROMANI L (1985) *Studio geochimico su acque e gas dell'area geotermica Lago di Vico-M. Cimini (Viterbo)*. Atti Soc Tosc Sc Nat Mem Serie A XCII 35: 237 – 254.
 - FAGAN G G (2001) *The Genesis of the Roman Public Baths: Recent approaches and Future Directions*. American Journal of Archaeology 105 3: 403 – 426.
 - FAZZINI P, GELMINI R, MANTOVANI P, PELLEGRINI M (1972) *Geologia dei Monti della Tolfa (Lazio Settentrionale; provincia di Viterbo e Roma)*. Mem Soc Geol It 11 1: 65 – 144.
 - FEA C (1821) *Varietà di scoperte antiquarie nelle antiche Terme Tauriane a Cento Celle, ora di Civitavecchia; nel Tempio di Venere, e Roma, nei Fori di Diocleziano, e di Augusto ecc*. Ragionamento letto nell'Accademia Archeologica il di 11 gennaio 1821 16 p.
 - FERRINI V, LOMBARDI G, MORBIDELLI L, NEGRETTO GC (1970) *Studio geopetrografico del complesso vulcanico tolfetano-cerite (Lazio)*. VI. Le manifestazioni ipoabissali. Istituto di Petrografia Università di Roma.
 - FILETTI M (1878) *Analisi di alcune acque termo-minerali di Civitavecchia*. Roma, Stamperia Reale 21 p.
 - FORSTER C, SMITH L (1988 a) *Groundwater flow systems in mountainous terrain 1: numerical modeling technique*. Water Resour Res 24: 999 – 1010.
 - FORSTER C, SMITH L (1988 b) *Groundwater flow systems in mountainous terrain 2: controlling factors*. Water Resour Res 24: 1011 – 1023.
 - GALLIAZZO V (1995). *I ponti romani*. Volume I 761 p. Volume II 447 p. Canova, Treviso.
 - GAMURRINI GE, COZZA A, PASQUI A, MENGARELLI R (1972) *Formae Italiae - Serie II, Documenti, Vol 1*. Carta archeologica d'Italia (1881-1891). Materiali per l'Etruria e la Sabina 115. Unione Accademica Nazionale – Istituto di Topografia Antica dell'Università di Roma. Leo Olski Editore. Firenze MCMLXXII.
 - GANDIN A (2013) *Classificazione genetica, caratteri petrologici distintivi e valori isotopici correlati di calcari incrostanti depositi da acque scorrenti (Travertini-Calcareous Tufa-Speleotemi)*. Rend Online Soc Geol It 27: 10 - 30. (<https://doi.org/10.3301/ROL.2013.17>).
 - GENÇER U, TURAN H (2017) *The masonry techniques of a historical bridge in Hypokremos (İçmeler)*. <https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2017.1.6>, 187 – 207.
 - GHILARDI M, DESRUELLES S (2009) *Geoarchaeology: where human, earth sciences meet with technology*. SAPIENS 2/2: Special Issue, 1 – 9.
 - GIANNINI E, LAZZAROTTO A, SIGNORINI R (1971) *Lineamenti di stratigrafia e di tettonica*. In: La Toscana Meridionale. Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, XXVII, Fascicolo Speciale: 33 – 112.
 - GILBERT AS (Ed.) (2017) *Encyclopedia of Geoarchaeology*. Springer 1046 p.
 - GIRELLI VA (2007) *Tecniche digitali per il rilievo, la rappresentazione e la modellazione 3D nel campo dei Beni Culturali*. In: Ricerche di Geomatica, Roma, SIFET Edizioni: 79 – 88.
 - GONFIANTINI R, PANICHI C, TONGIORGI E (1968) *Isotopic disequilibrium*

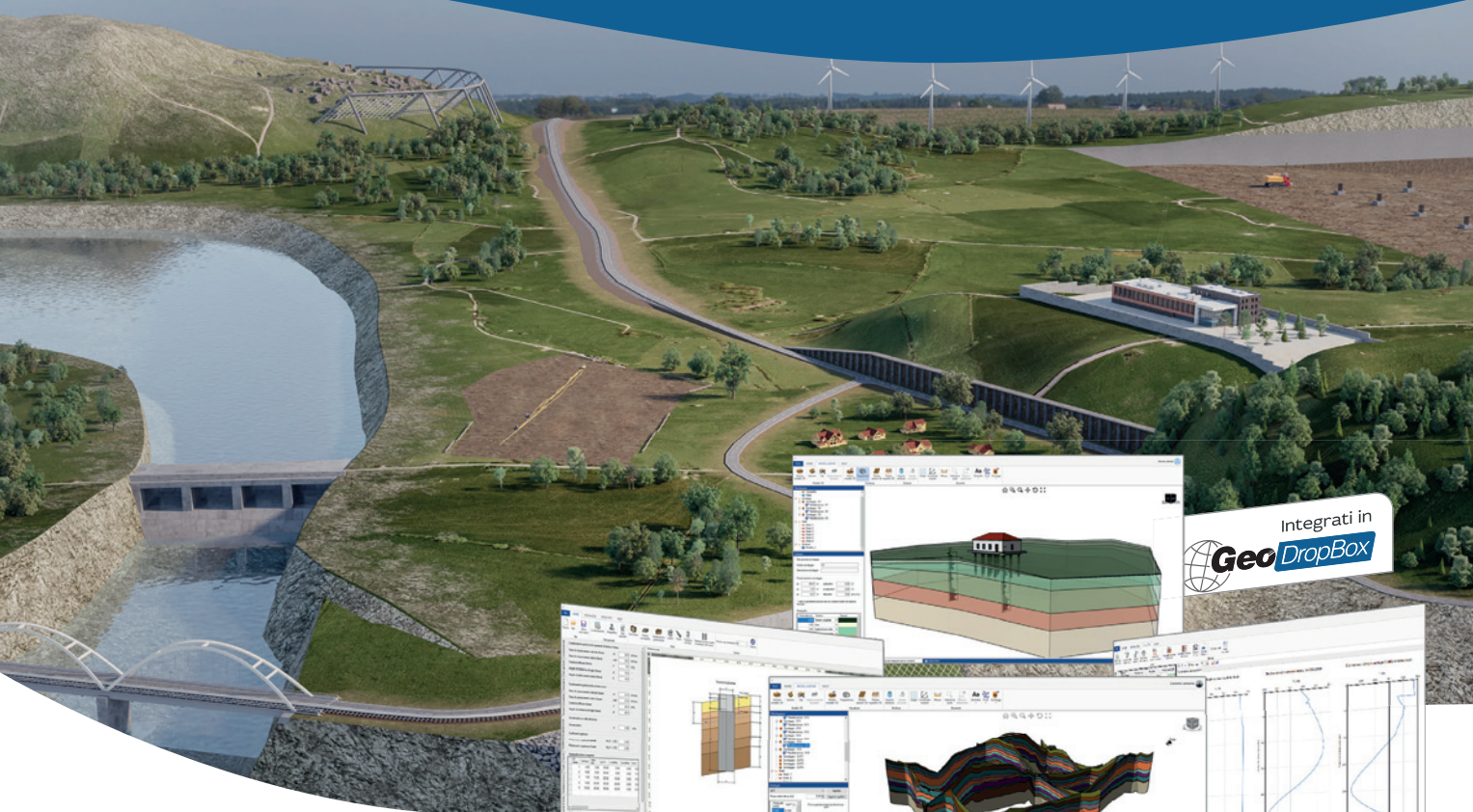
- in travertine deposition. Earth and Planetary Science Letters 5: 55 – 58.
- GRASBY SE, HUTCHINSON L (2001) Controls on the distribution of thermal springs in the southern Canadian Cordillera. Can Journ Sci 38: 427 – 440.
 - GUERIN-BEAUVOIS M (2003) *Thermalism romain et stations thermals en Italie aux deux premier siècles de notre ère: quelques éléments de synthèse*. Via Latina 168: 2 – 14.
 - HEINZ W (1986) *Die Terme Taurine von Civitavecchia – ein Römischer Heitbad*. Antike Welt Zeitschrift für Archaeologie und Kulturgeschichte 4: 22 – 43.
 - IMBRIALE P (2014) *I travertini quaternari della Campania: caratteri sedimentologici, geochimici e ipotesi genetica*. Università degli Studi di Napoli “Federico II”. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra-XXV Ciclo 240 p.
 - INGLESE C, PARIS L a cura di (2020). *Arte e tecnica dei ponti romani in pietra*. Sapienza Università Editrice 213 p.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico Nazionale (2009) Carta Geologica d'Italia – 1: 50.000. Progetto CARG: Modifiche e Integrazioni al Quaderno N. 1/1992. Quaderni Serie III 12 54 p.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia (2016) Carta Geologica d'Italia in scala 1: 50.000. Foglio 355 Ronciglione. D.R.E.Am Italia.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico Nazionale (2018 a) Carta Geomorfologica d'Italia – 1: 50.000. Modifiche e Integrazioni al Quaderno N. 4/1994. Quaderni Serie III 13 95 p.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico Nazionale (2018 b) Carta Idrogeologica d'Italia – 1: 50.000. Modifiche e Integrazioni al Quaderno N. 5/1994. Quaderni Serie III 14 73 p.
 - ISPRA-Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia. Carta Geologica d'Italia in scala 1: 50.000. Foglio 344 Toscana, Foglio 353 Montalto di Castro, Foglio 354 Tarquinia. In allestimento per la stampa.
 - JACONO L (1934) *La misura delle antiche fistule plumbee*. Estratto dalla Rivista di Studi Pompeiani, anno I (1934-1935), fasc. II, Napoli.
 - JANKOVIC MA (2012) *The social role of Roman baths in the province of Moesia*. The Archaeology of water supply. M Zuchowska Ed. European Association of Archaeologists. Annual Meeting: 27 - 39. Archaeopress.
 - KLIGFIELD R, HUNZIKER J, DALLMEYER RD, SCHAMEL S (1986) *Dating of deformation phases using ⁴⁰Ar/³⁹Ar techniques: results from the Northern Apennines*. Journ Struct Geol 8: 781 – 798.
 - KÖHLER J (1998) *Zur wasserbewirtschaftung der Terme Taurine bei Civitavecchia*. In: GCM Janen Ed. Proceedings of the Tenth International Congress on the History of Water Management and Hydraulic Engineering in the Mediterranean Region, Syracuse, May 16–22 1998: 185 – 194.
 - KÖHLER J (1999) *Die Terme Taurine bei Civitavecchia*. Mitteilungen Des Deutschen Archaeologischen Institut Römische Abteilung 106: 365 – 376.
 - KÖHLER J (2007) *Termalismo antico e tardoantico a Civitavecchia*. Bains curatifs et bains hygieniques en Italie de l'antiquité au Moyen Age. Collection de l'Ecole Française de Rome, 383.
 - LANCIANI R (1881) *I commentari di Frontino intorno le acque e gli acquedotti*. Roma.
 - LAURO C, NEGRETTO GC, MORBIDELLI L, LOMBARDI G (1965) *I. Studio geopetrografico del complesso vulcanico tolfaiano-cerite*. Lineamenti geotutturali della Tuscia Romana centro-occidentale, con particolare riguardo alle regioni tolfaiane, cerite e manziate, e notizie bibliografiche. Istituto di Petrografia dell'Università di Roma 53 p.
 - LI M, LI GM, YANG L, DANG XY, ZHAO CH, HOU GC, ZHANG MS (2007) *Numerical modeling of geothermal groundwater flow in karst aquifer system in eastern Weibei, Shaanxi Province, China*. China Series D Earth Sciences 50: 36 – 41.
 - LOMBARDI G, MORBIDELLI L, NEGRETTO GC (1965 a) *Lineamenti geopetrografici e strutturali degli affioramenti vulcanici del settore tolfaiano (Lazio)*. Rend Soc Min Ital 21: 151-156.
 - LOMBARDI G, MORBIDELLI L, NEGRETTO GC (1965 b) *Gli affioramenti eruttivi della Tolfaccia (Monti della Tolfa)*. Rend Soc Min Ital 21: 157 - 164.
 - LOMBARDI G, MORBIDELLI L, NEGRETTO GC (1974) *Età delle vulcaniti acide dei complessi Tolfetano, Cerite e Manziate (Lazio Nord-occidentale)*. Per di Min 43: 181-204.
 - LOMBARDI L, SANTUCCI E, LEONI B (2016) *La distribuzione dell'acqua nella città di Roma: tecnologia e castellum aquae*. Atti del Convegno Nazionale “Tecnica di Idraulica Antica”. A cura di Fiore A, Gisotti G, Lena G, Masciocco L, Roma 18 novembre 2016. Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 3/2017: 28 – 32.
 - LOPEZ DL, SMITH L (1995) *Fluid flow in fault: analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow*. Water Resour Res 31: 1489 – 1503.
 - LUGLI G (1957) *La tecnica edilizia romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*. Volume I 743 p., Volume II Tavole. Giovanni Bardi Editore, Roma.
 - MANFRA L, MASI U, TURI B (1976) *La composizione isotopica dei travertini del Lazio*. Geologica Romana XV: 127 – 174.
 - MANZI LM (1869) *Delle Terme Taurine presso Civitavecchia e della loro restaurazione*. Cap. I°. Notizie circa l'antichità delle Terme Taurine: 1 - 28. Roma.
 - MENGARELLI R (1923) *Notizie degli Scavi di Antichità comunicate alla Regia Accademia Nazionale dei Lincei*. Regione VII (Etruria). VI. Civitavecchia - Scavi eseguiti nel 1922 nelle “Terme Taurine” o “Traiane”: 321 – 348.
 - MERCURIALE G (1571) *Variorum lectionum libri quattuor*. In quibus complurimum, maximeque medicinae scriptorum infinita paene loca vel corrupta restituntur, vel obscura declarantur, Venetiis.
 - MINISALE A, KERRICH DM, MAGRO G, MURELL MT, PALADINI M, RIHS S, STURCHIO NC, TASSI F, VASELLI O (2002) *Geochemistry of Quaternary travertins in the region north of Roma (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatic implications*. Earth Planet Sci 203: 709 - 728.
 - NAPPI G, MATTIOLI M, VALENTINI L, CHIOCCINI U, MADONNA S (2016) *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000*. Foglio 355 Ronciglione. ISPRA – Servizio Geologico d'Italia. D.R.E.Am. Italia 177 p.
 - NEGRETTO GC, LOMBARDI G, MORBIDELLI L (1966) *Studio geopetrografico del complesso Tolfetano-Cerite*. IV. Le manifestazioni vulcaniche acide del settore Cerite. Istituto di Petrografia dell'Università di Roma.

- NEGRETTI GC, MORBIDELLI L (1963) *Studio geopetrografico del complesso Tolfetano-Cerite*. III. Le manifestazioni vulcaniche acide del settore civitavecchiese-tolfetano. Istituto di Petrografia dell'Università di Roma.
- PACE P (2010) *Acquedotti di Roma e il De Aquaeductu di Frontino*. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Edizioni BetMultimedia, terza edizione 326 p.
- PASQUINUCCI M A CURA DI (1987) *Terme romane e vita quotidiana*. Comune di Rosignano Marittimo. Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Scienze Storiche del Mondo Antico. Cop. Industrie Grafiche, Modena 135 p.
- PISCOPO V, BARBIERI M, MONETTI V, PAGANO G, PISTONI S, RUGGI E, STANZIONE D (2006) *Hydrogeology of thermal waters in Viterbo area, central Italy*. Hydrogeology Journal 14: 1508 – 1521.
- POLLARD AM (1999) *Geoarchaeology: an introduction*. In: AM Pollard Ed. Geoarchaeology: exploration, environments, resources. Geological Society London 165: 7 – 14.
- RAGAN DM (2009) *Structural Geology. An Introduction to Geometrical Techniques*. Fourth Edition. Cambridge University Press 602 p.
- RAPP JR GR, HILL CL (1998) *Geoarchaeology: The Earth-Science approach to archaeological interpretation*. Yale University Press, New Haven.
- REGGIANI AM (2018) *La villa pulcherrima di Traiano a Centumcellae*. Veleta 35: 129 – 149. <https://doi.org/10.1387/veleia.19438>.
- ROGERS D K (2018) *Water culture in Roman bath*. Brill Research Perspectives in Ancient History 1-1: 1-118.
- ROSSETTI F, FACCENNA C, JOLIVET L, FUNICIELLO R, TECCE F, BRUNET C (1999) *Syn-versus post-orogenic extension: the case study of Giglio Island (Northern Tyrrhenian Sea, Italy)*. Tectonophysics 304: 71 – 93.
- SAMMURI P (2020) *L'Alabastro di Civitavecchia*. Mem Descr Carta Geol d'It 106: 15 – 22.
- Servizio Geologico d'Italia (1969) Carta Geologica d'Italia in scala 1: 100.000. Foglio 142 Civitavecchia. Poligrafica & Cartevalori, Ercolano (Napoli)
- Servizio Geologico Nazionale (1992) Carta Geologica d'Italia – 1: 50.000. Guida al Rilevamento. Quaderni Serie III 1, 203 p.
- Servizio Geologico Nazionale (1994) Carta Geomorfologica d'Italia – 1: 50.000. Guida al Rilevamento. Quaderni Serie III 4 42 p.
- Servizio Geologico Nazionale (1995) Carta Idrogeologica d'Italia – 1: 50.000. Guida al Rilevamento. Quaderni Serie III 5 33 p.
- SHAHACK-GROSS R (2017) *Archaeological formation theory and geoarchaeology: State-of-the-art in 2016*. Journal of Archaeological Science 79: 36 – 43.
- SHILLITO L-M, BLONG J, SAWYER A, MACKAY H (2019) *Introduction. Geoarchaeology from landscapes to material culture*. Papers from the 7th Developing International Geoarchaeology Conference. Geoarchaeology 34: 377–379.
- STRACCI G (2021) *Nosse iuvat Tauri dictas de nomine thermas*. The controversial question of the Taurine Baths. Academia Letters. Article 841. <https://doi.org/10.20935/AL841>.
- STROPPIANA L (1970) *Le antiche Terme Taurine nell'ambito del futuro complesso termale di Civitavecchia*. Pagine di Storia della Medicina 14 3: 17 – 25.
- TOLLE-KANSTENBEIN R (1993) *Archeologia dell'acqua*. Longanesi & C 276 p.
- TORELLI M (1973) *Civitavecchia (Centumcellae)*. *Enciclopedia dell'Arte Antica Classica e Orientale*. Supplemento 1970: 233 – 235.
- VENTRIGLIA U (1988) *Idrogeologia della provincia di Roma*. Volume I Regione Tolfetana. Provincia di Roma.
- VILLA LM, GIULIANI O, DE GRANDIS G, CIONI R (1989) *Datazioni K-Ar dei vulcani di Tolfa e Manziana*. Boll. GNV 1989/2: 1025 – 1026.
- YEGUL F (1992) *Baths and Bathing in Classical Antiquity*. The Architectural History Foundation, New York. The MIT Press Cambridge, Massachusetts, and London, England 501 p.
- YUHARA H, RIBACCHI R (1963) *Osservazioni preliminari su alcune sorgenti termominerali del Lazio*. Industria Mineraria 14: 261 – 265.
- ZACCAGNINI R, DAVID D, STASOLLA FR (2018) *Nuove ricerche nel territorio di Civitavecchia*. Un Progetto per Aquae Tauri. Scienze dell'Antichità 24 1: 149 – 174. Edizioni Quasar.

GEOSTRU IL PARTNER GIUSTO PER LA TUA PROFESSIONE

Produciamo software di successo a livello mondiale.

Leggi la nostra storia su: geostru.eu/it/storiageostru



GEOSTRU TI OFFRE I SOFTWARE PIÙ POTENTI ED AFFIDABILI PER LA TUA PROFESSIONE.

Produciamo software di successo a livello mondiale per numerosi settori professionali. I nostri software sono caratterizzati da un costo molto competitivo e da una qualità garantita da oltre 36.000 installazioni in più di 135 paesi nel mondo. I prodotti GEOSTRU sono caratterizzati da un'estrema facilità d'uso: ogni software risolve uno specifico problema, riducendo i dati di input a quelli strettamente necessari. Inoltre tutti i software sono integrati fra loro con la possibilità di esportare dati da/e per ogni applicazione della suite anche in formato AGS4.

Tutti i prodotti sono pienamente compatibili con Normativa Italiana (NTC) e gli Eurocodici.

**Un partner IT che risponde
ad ogni tua esigenza professionale.**



Per i lettori
in esclusiva un
codice di sconto!

Leggi il QR code

GM3D

SOFTWARE

Ingegneria - Geologia e Geotecnica - Meccanica delle rocce - Prove in situ - Idrologia e Idraulica Topografia - Energia - Geofisica - Ufficio

SERVIZI GRATUITI PER I NOSTRI CLIENTI
alla pagina: geoapp.geostru.eu

Corsi certificati in collaborazione con GoMeeting.
Visita il sito www.gomeeting.eu

NUOVI SOFTWARE E SERVIZI

- Nuove versioni Geostru 2022
- Risposta sismica locale 2D
- GFAS (Geotechnical and F.E.M. Analysis System)
- GeoDropbox 2022
- GeoApp 2022 (<https://geoapp.geostru.eu>)
- GeoStru 365
- Well Foundation (Progettazione e calcolo pozzi strutturali)
- GM3D (Modellazione Geologica/Geotecnica, 3D, BIM)
- RPD (Road Pavement Design)
- DeepFound (Analisi platee Pilate)

Software, risorse,
info, servizi e offerte
sul nostro sito:
www.geostru.eu/it

