

STRATIGRAFIA E CARATTERISTICHE FISICHE DEI DEPOSITI OLOCENICI DEL PORTO DI MISENO, GOLFO DI POZZUOLI (TIRRENO CENTRO-ORIENTALE)

D. Insinga ^{1*}, A. Di Meglio ², F. Molisso ¹ & M. Sacchi ^{1**}

¹ Istituto di Ricerca Geomare Sud - CNR, Via Amerigo Vespucci, 9 - 80142 - Napoli

² Technodata s.r.l., Via Cinthia, P.co S. Paolo, Is. 20 - 80126 - Napoli

*insinga@gms01.geomare.na.cnr.it; **sacchi@gms01.geomare.na.cnr.it

RIASSUNTO

L'analisi di cinque carotaggi profondi (30÷40 m) effettuati nello specchio d'acqua del Porto di Miseno (settore occidentale dei Campi Flegrei), insieme con la datazione di due livelli di torba (14C AMS) ed una serie di prove geotecniche in sito e su campioni indisturbati, ha consentito di ricostruire l'assetto stratigrafico della successione olocenica campionata al di sotto del fondo mare e di determinare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei sedimenti. Sulla base dei risultati ottenuti sono state delineate le principali fasi evolutive di questa piccola insenatura del Golfo di Pozzuoli durante gli ultimi 10.000 anni.

La successione carotata, costituita prevalentemente da sabbie di natura vulcanica, è caratterizzata da un trend generale trasgressivo localmente interrotto da due episodi di regressione forzata legati al rapido accumulo di depositi piroclastici più o meno sviluppati. Gli episodi regressivi terminano con la formazione di due livelli di torba rinvenuti all'interno dell'unità B ed al passaggio tra le unità D ed E, e le cui misure radiometriche hanno fornito un'età di 3560±40 anni e 7815±55 anni, rispettivamente. Ciò permette di correlare tali livelli con due importanti fasi di quiescenza dell'attività vulcanica dei Campi Flegrei documentate in letteratura. Il controllo geocronologico fornito dalle datazioni assolute, consente, inoltre, una stima dei tassi di sedimentazione durante l'Olocene medio-superiore, i quali sono mediamente dell'ordine di 3.5 m/ka per le unità inferiori (E-D) e di 2.2 m/ka per quelle superiori (B-A).

La successione olocenica di Porto Miseno può essere correlata con una serie di unità sismo-stratigrafiche individuate nel settore centrale ed in quello orientale della piattaforma continentale del Golfo di Pozzuoli e con la sezione affiorante lungo la scarpata d'erosione del terrazzo marino de La Starza, nel settore emerso dei Campi Flegrei, dove la successione olocenica è stata sollevata di circa 40 m sopra il livello del mare durante gli ultimi 4000 anni.

ABSTRACT

The stratigraphic study of five deep cores (30-40 m) drilled in the harbor of Miseno (western Flegrean Fields), along with radiometric age dating (14C AMS) of two peat layers and a number of geotechnical tests, allowed for the reconstruction of the stratigraphic framework and the determination of physical and mechanical properties of the Holocene succession beneath the sea floor. Based on these data we outline the evolution of the study area during the last 10.000 years.

The Holocene succession of Porto Miseno is characterized by transgressive volcanic sandy deposits which include a 1-5 m thick pyroclastic unit (Unit C). Two resting phases, which closes regressive episodes, are testified by two peat layers which have been cored within unit B (layer t₁) and at the transition between units D and E (layer t₂). Samples collected from the peat layers yielded radiometric ages of 3560±40 years B.P. and 7815±55 years B.P., respectively. This suggests a correlation between the cored peat layers and two paleosols documented on land that are associated with resting periods during the volcanic activity of Flegrean Fields. Chronostratigraphic constraints, based on these radiocarbon age determinations, allowed for the evaluation of sedimentation rates during Late Holocene, which are in the order of 3.5 m/ka for the lower units (E-D) and 2.2 m/ka for the upper part of the section (units B-A).

The Holocene deposits of Porto Miseno can be correlated with distinct seismic-stratigraphic units identified in the subsurface of the southern and central sectors of Pozzuoli Bay. They can be also correlated with the section cropping out onshore, along the erosional slope of "La Starza" terrace, where the marine Holocene sequence has been uplifted about 40 m above the sea level in the last few thousand years.

Parole chiave: Golfo di Pozzuoli, Campi Flegrei, Olocene, caratteristiche geotecniche, età radiometrica

Key words: Pozzuoli Bay, Flegrean Fields, Holocene, geotechnical properties, radiometric age.

1. INTRODUZIONE

Il settore costiero del Mar Tirreno centro-orientale è caratterizzato dalla presenza diffusa di resti archeologici e di strutture portuali di età classica greca e romana (ca 2000-3000 anni B.P.) che si rinvengono oggi per lo più sommersi o, comunque, a quote differenti rispetto a quelle della loro originaria realizzazione ed ubicazione funzionale. Ciò a testimonianza di importanti variazioni che hanno interessato il livello relativo del mare e la linea di costa della Campania (Alessio *et al.*, 1994), in

particolare nel settore dei Campi Flegrei, nel corso delle ultime decine di centinaia di anni (Dvorak & Mastrolorenzo, 1991).

Diversi studi dimostrano che circa 2000 anni fa il livello del mare era all'incirca 0.5 m più basso di quello attuale e che poi è rapidamente risalito con tassi di circa 0.75 mm/anno tra il 50 B.C. e l'A.D.150 (Pirazzoli, 1976). Un'ulteriore complicazione per la ricostruzione degli spostamenti della linea di costa nell'area oggetto di studio durante l'Olocene è rappresentata poi dalla notevole instabilità tettonica dell'area circostante l'abita-

to di Pozzuoli, la quale è stata interessata, anche in epoca storica, da ripetute e talora drammatiche fasi di sollevamento e di subsidenza (Barberi *et al.*, 1984).

Nel settore settentrionale del Golfo di Pozzuoli compreso tra Baia e Punta Miseno si rinvencono frequentemente manufatti, resti di reperti o costruzioni di età romana (ville, piscine e banchine d'attracco) ad una profondità compresa tra i 9 ed i 7 m al di sotto del livello medio del mare (Caputo, 1989). Per l'area dell'attuale porto di Miseno (Comune di Bacoli), già base della flotta imperiale romana dal I al IV secolo d.C., è stato calcolato un innalzamento relativo del livello del mare, in gran parte imputabile a subsidenza tettonica, di circa 9 m negli ultimi 2000 anni (Dvorak & Mastrolorenzo, 1991). Tra il VII ed l'XI sec., nel periodo di massima ingressione marina, legata a fenomeni di bradisismo, si registrano massimi di subsidenza dell'ordine di 11-12 m (Cinque *et al.*, 1991).

Nel corso del 1998, l'Istituto di Ricerca "Geomare Sud" del CNR di Napoli ha svolto una serie di camp-

gne di indagini dirette ed indirette al fine di ricostruire la stratigrafia dei depositi olocenici nei golfi di Napoli e di Pozzuoli (Aiello *et al.*, 1999; 2000). In particolare, nell'area di Porto Miseno, a sud dell'abitato di Pozzuoli, sono stati effettuati cinque carotaggi profondi, di cui uno a terra e quattro nello specchio d'acqua antistante la banchina, che hanno raggiunto una profondità massima di 34 m al di sotto del l.m.m. L'esecuzione dei carotaggi è stata accompagnata da una serie di prove geotecniche sia in sito che in laboratorio e dalla determinazione dell'età radiometrica (^{14}C AMS) di due campioni di torba che hanno consentito di inquadrare la successione studiata da un punto di vista cronostratigrafico.

La granulometria mediamente grossolana dei depositi carotati e le tecniche di perforazione adottate, non hanno consentito il recupero di campioni sufficientemente indisturbati per il riconoscimento delle strutture sedimentarie minori, le quali sono state in parte obliterate nel corso delle operazioni di carotaggio. È stato possibile, tuttavia, ricostruire l'esatto spessore stratigrafico

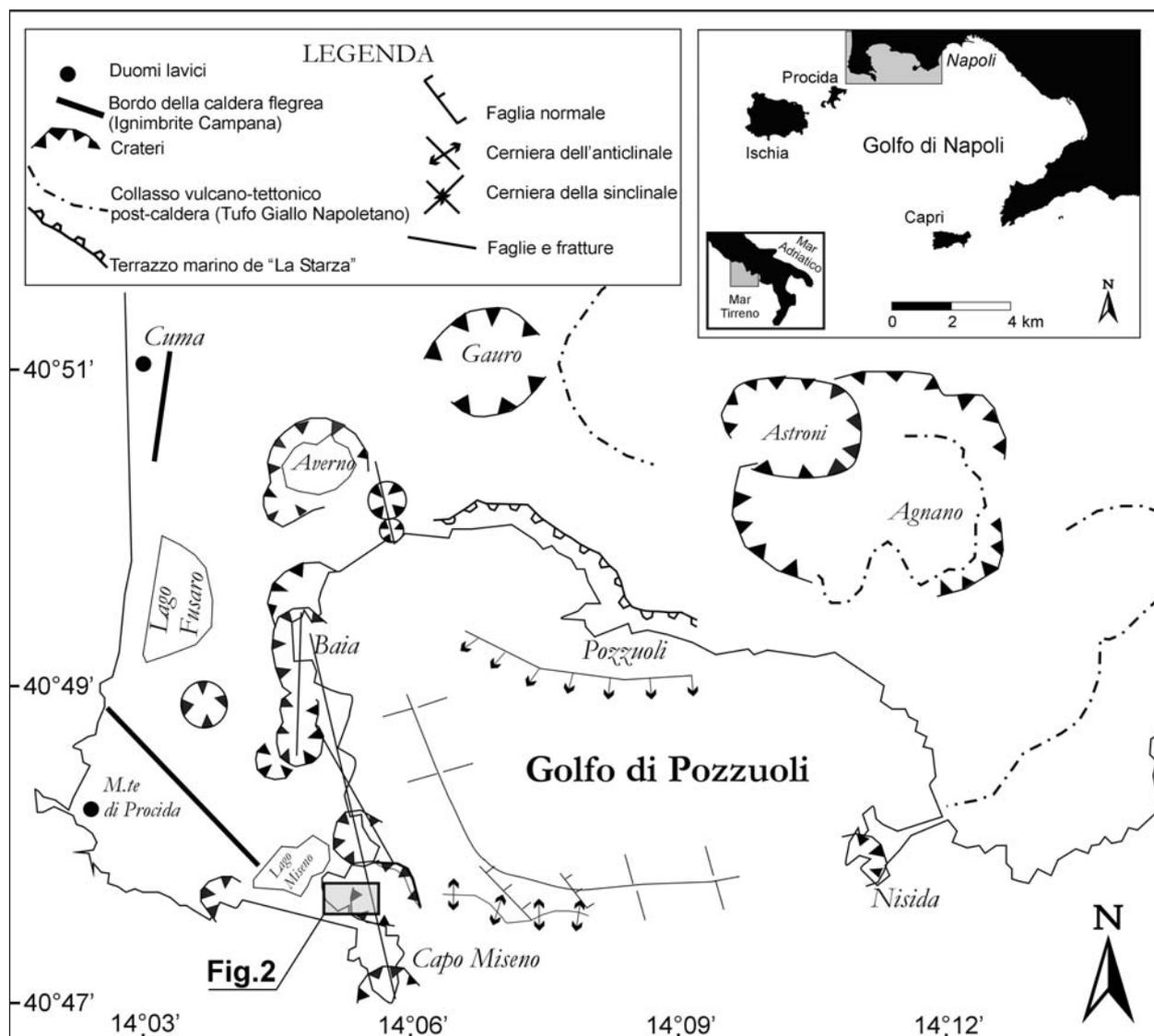


Fig. 1. Schema vulcano-tettonico dei Campi Flegrei e del Golfo di Pozzuoli con l'ubicazione del Porto di Miseno e dell'area studio (modificato da Rosi & Sbrana, 1987; Milia, 2000).

Volcano-tectonic sketch map of the Flegrean Fields and Pozzuoli Bay showing the location of Porto Miseno and the study area.

dei diversi depositi incontrati ed il recupero di segmenti di carota, anche di considerevole lunghezza, pressoché indisturbati. Ciò ha permesso non solo di ricostruire l'assetto litostratigrafico della successione campionata, ma anche di delineare le principali fasi evolutive di questa piccola insenatura nel corso degli ultimi 10.000 anni.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area di Porto Miseno ricade nel settore occidentale del distretto vulcanico dei Campi Flegrei che si sviluppa in corrispondenza di un alto morfostrutturale del basamento meso-cenozoico del margine occidentale dell'Appennino campano (Fig. 1). L'attività vulcanica dei Campi Flegrei è legata alla tettonica distensiva che ha interessato il margine tirrenico orientale durante il Quaternario e di cui la Piana Campana ed il Golfo di Napoli rappresentano alcuni tra i principali elementi morfotettonici (Ippolito *et al.*, 1973; Ortolani & Aprile, 1978; Milia, 1996; Aiello *et al.*, 1999).

Dall'inizio della sua attività (c.a. 50.000 anni B.P.), questo distretto è stato caratterizzato da una serie di manifestazioni vulcaniche e dallo sviluppo di numerosi centri eruttivi monogenici con chimismo ad affinità potassica (Di Girolamo *et al.*, 1984).

Uno degli elementi strutturali più caratteristici dell'area dei Campi Flegrei è rappresentato da una depressione ampia 12 km (Orsi *et al.*, 1996), comunemente interpretata come il risultato dell'evoluzione di un sistema calderico, all'interno della quale si è manifestata gran parte dell'attività vulcanica recente conclusasi con l'eruzione del Monte Nuovo nel 1538 A.D. (Di Vito *et al.*, 1987). L'andamento dell'originale bordo calderico è individuabile a terra in corrispondenza di una serie di scarpate discontinue alte diverse decine di metri, mentre nel settore sommerso, a sud del Golfo di Pozzuoli, coincide probabilmente con i banchi vulcanici di Miseno, Nisida e

Penta Palumbo (Colantoni *et al.*, 1972; Pescatore *et al.*, 1984; Milia, 1998)

L'attività vulcanica di tipo esplosivo nell'area di Miseno si è esplicata prevalentemente tra 12.0 e 9.5 ka B.P. (l'Epoca, Di Vito *et al.*, 1999) ed ha determinato lungo il bordo della struttura calderica, la formazione di "tuff rings" e "tuff cones" di cui Porto Miseno e Capo Miseno rappresentano alcuni relitti rispettivamente. Questi apparati di modeste dimensioni, pur essendo oggi quasi completamente distrutti a seguito di collassi vulcano-tettonici e dell'erosione marina che hanno interessato il settore costiero in esame nelle ultime migliaia di anni, conferiscono all'area i tratti caratteristici di un sistema craterico collassato. In particolare, l'originaria morfologia è ancora riconoscibile nella forma circolare dell'insenatura del Porto di Miseno.

I suddetti apparati vulcanici sono costituiti principalmente da alternanze di strati di scorie di varie dimensioni miste a pomice immerse in una matrice cineritica più o meno abbondante ed a luoghi resa coerente da un processo di diagenesi e di cementazione secondaria (zeolitizzazione). In alcune zone, lungo i versanti di questi apparati vulcanici sono visibili, infatti, graduali passaggi da facies piroclastiche giallastre litoidi a facies grigiastre notevolmente meno coerenti.

3. INDAGINI ESEGUITE E DATI RACCOLTI

La campagna di indagini è consistita in una serie di prove sia in sito che in laboratorio. Queste hanno permesso di ricostruire l'evoluzione stratigrafica dell'area, di caratterizzare da un punto di vista geotecnico i depositi campionati e di datare con il metodo del radiocarbonio due livelli di torba recuperati dai campioni di carotaggio.

In Figura 2 è indicata l'ubicazione dei cinque carotaggi realizzati, mentre in Tabella 1 sono indicati, per ciascuno di essi, le quote di boffaforo riferite al livello

medio del mare, le profondità raggiunte, il numero dei campioni indisturbati prelevati ed il numero di prove penetrometriche eseguite.

3.1. Carotaggi

I carotaggi, denominati con la sigla MGF, hanno raggiunto una profondità massima di 40 m, per una lunghezza complessiva di perforazione effettuata di circa 170 m ed una percentuale di recupero di circa 76 %.

Per il recupero dei campioni sono state utilizzate attrezzature a rotazione munite di carotiere semplice del diametro esterno di 101 mm ed adoperate, dove necessario,

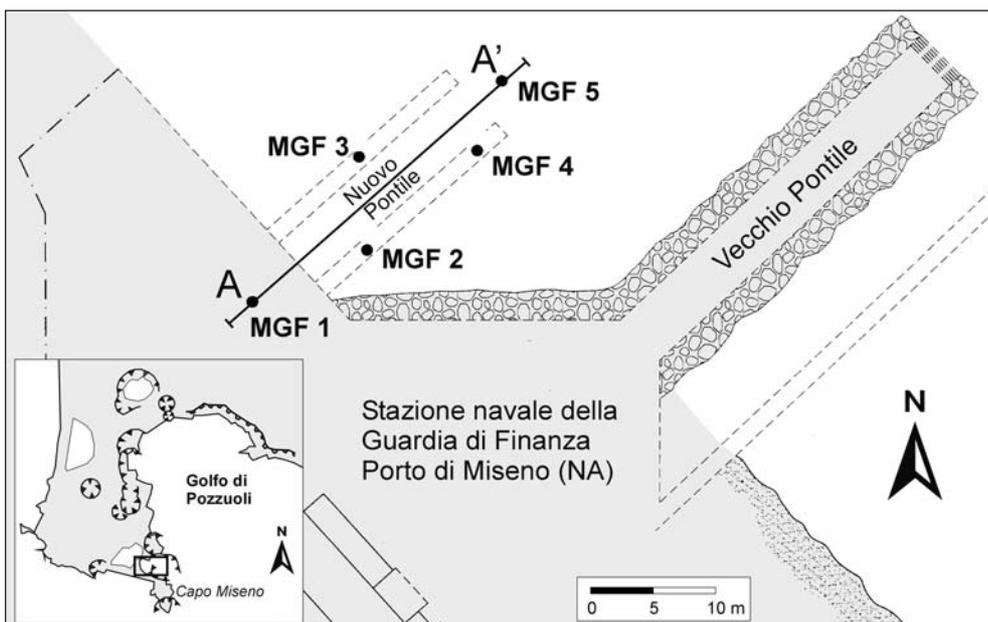


Fig. 2. Ubicazione dei cinque carotaggi effettuati in località Porto Miseno utilizzati in questo studio (MGF 1-MGF 5).

Location of five cores drilled in the Porto Miseno area (MGF 1-MGF 5) analyzed in this study.

Sondaggio (n°)	Quota/Profondità (m)	Lunghezza (m)	Numero di campioni indisturbati	Numero di Prove S.P.T.
MGF1	+0,75	34	5	7
MGF2	-1,20	34	5	7
MGF3	-1,50	30	5	6
MGF4	-2,00	32	5	7
MGF5	-2,50	40	5	7

Tab. 1 - Quadro sintetico di quote di boccaforo, profondità raggiunte, numero di campioni indisturbati e numero di prove *Standard Penetration Test* (S.P.T.) per i cinque sondaggi a carotaggio continuo effettuati nel Porto di Miseno.

Synopsis of altitude/water depth, length, number of undisturbed samples and number of Standard Penetration Tests (S.P.T.) measurements for the cores MGF drilled in Porto Miseno.

colonne di rivestimento del diametro esterno di 127 mm. Per i carotaggi effettuati in mare (MGF 2-5) si è operato da un pontone galleggiante, munito di mensola a sbalzo per facilitare le operazioni di montaggio delle aste ed il recupero del sondaggio.

Dai fori di trivellazione è stato estratto un carotaggio più o meno continuo che, sistemato in apposite cassette catalogatrici, è stato poi utilizzato per la descrizione litostratigrafica. Sono stati quindi prelevati una serie di campioni indisturbati adoperando un campionatore tipo *Shelby*, del diametro di 90 mm e della lunghezza di 70 cm, infisso a pressione previo avanzamento del rivestimento e pulitura del foro.

Nel corso delle operazioni di carotaggio sono state, inoltre, eseguite prove penetrometriche tipo *Standard Penetration Test* (S.P.T.) i cui risultati vengono riportati in Tabella 2.

3.2 Analisi granulometriche e prove geotecniche

I 25 campioni indisturbati recuperati sono stati sottoposti in seguito ad una serie di prove geotecniche di laboratorio al fine di determinare 1) le caratteristiche fisiche (umidità naturale w , peso dell'unità di volume γ , peso specifico dei granuli γ_s , porosità n , grado di saturazione S); 2) la distribuzione granulometrica mediante setacciatura (per la parte più grossolana) e sedimentazione (per la frazione più sottile); 3) le caratteristiche meccaniche quali coesione c ed angolo d'attrito interno ϕ , mediante prove di taglio diretto.

I risultati delle prove geotecniche di laboratorio sono riportati schematicamente nelle Tabelle 3 e 4.

4. STRATIGRAFIA DEI DEPOSITI OLOCENICI DI PORTO MISENO

L'analisi delle colonne stratigrafiche dei carotaggi di Porto Miseno consente il riconoscimento di cinque unità litostratigrafiche principali, ben definibili e correlabili a cui si intercalano due orizzonti di torba più o meno continui (Fig. 3). Queste unità sono rappresentate, dal basso verso l'alto da:

- Unità E - Sabbie grossolane ghiaiose
- Unità D - Sabbie limose pozzolaniche
- Unità C - Pomice eterometriche in matrice pozzolanica
- Unità B - Sabbie medio-grosse incoerenti
- Unità A - Sabbie fini limose

4.1. Unità E - Sabbie grossolane ghiaiose

La parte basale della successione è caratterizzata da sabbie piuttosto grossolane, a tratti ghiaiose, con ciottoli lapidei poligenici, di colore grigio, ed abbondanti

Sondaggio (n°)	Profondità (m)	Prove S.P.T. (N_{spt})
MGF1	4,6	16
MGF1	8,0	33
MGF1	14,0	31
MGF1	18,4	25
MGF1	20,5	66
MGF1	25,6	R
MGF1	34,0	70
MGF2	4,0	70
MGF2	8,0	60
MGF2	11,5	24
MGF2	15,5	7
MGF2	20,0	R
MGF2	26,5	7
MGF2	34,0	31
MGF3	4,0	20
MGF3	8,0	43
MGF3	12,0	51
MGF3	16,0	30
MGF3	25,0	R
MGF3	27,5	R
MGF4	4,0	16
MGF4	8,0	21
MGF4	11,5	24
MGF4	16,0	59
MGF4	20,1	43
MGF4	26,6	37
MGF4	30,0	R
MGF5	4,0	13
MGF5	8,0	23
MGF5	11,5	41
MGF5	16,0	55
MGF5	20,0	55
MGF5	27,5	26
MGF5	35,0	R

Tab. 2. Riepilogo dei risultati delle prove *Standard Penetration Test* (S.P.T.) eseguite nel corso delle operazioni di carotaggio nel Porto di Miseno.

Summary of Standard Penetration Tests (S.P.T.) measurements carried out during drilling operations at Porto Miseno.

pomici (grafico E in Fig. 4). La presenza di intercalazioni di sottili livelli limosi ha favorito la formazione di un "tappo" di chiusura del tubo campionario, consentendo il recupero dei depositi in fase di carotaggio.

Il grado di arrotondamento ed appiattimento dei clasti suggeriscono un ambiente deposizionale di spiaggia prossimale o di battigia.

4.2. Unità D - Sabbie limose pozzolaniche

Questi sedimenti sono rappresentati da sabbie di

colore grigio scuro in matrice limosa di natura vulcanica. La parte alta di questo livello è caratterizzata dalla presenza di materiale organico e da frammenti di gusci di bivalvi e gasteropodi. La parte inferiore, invece, è generalmente più povera in frazione limosa come evidenziato dal grafico D in Figura 4. Lo spessore carotato può raggiungere i 13 m come accade nei sondaggi MGF 2 e MGF 3. La presenza di una frazione limosa, generalmente sempre apprezzabile, suggerisce condizioni di sedimentazione in ambiente protetto di spiaggia som-

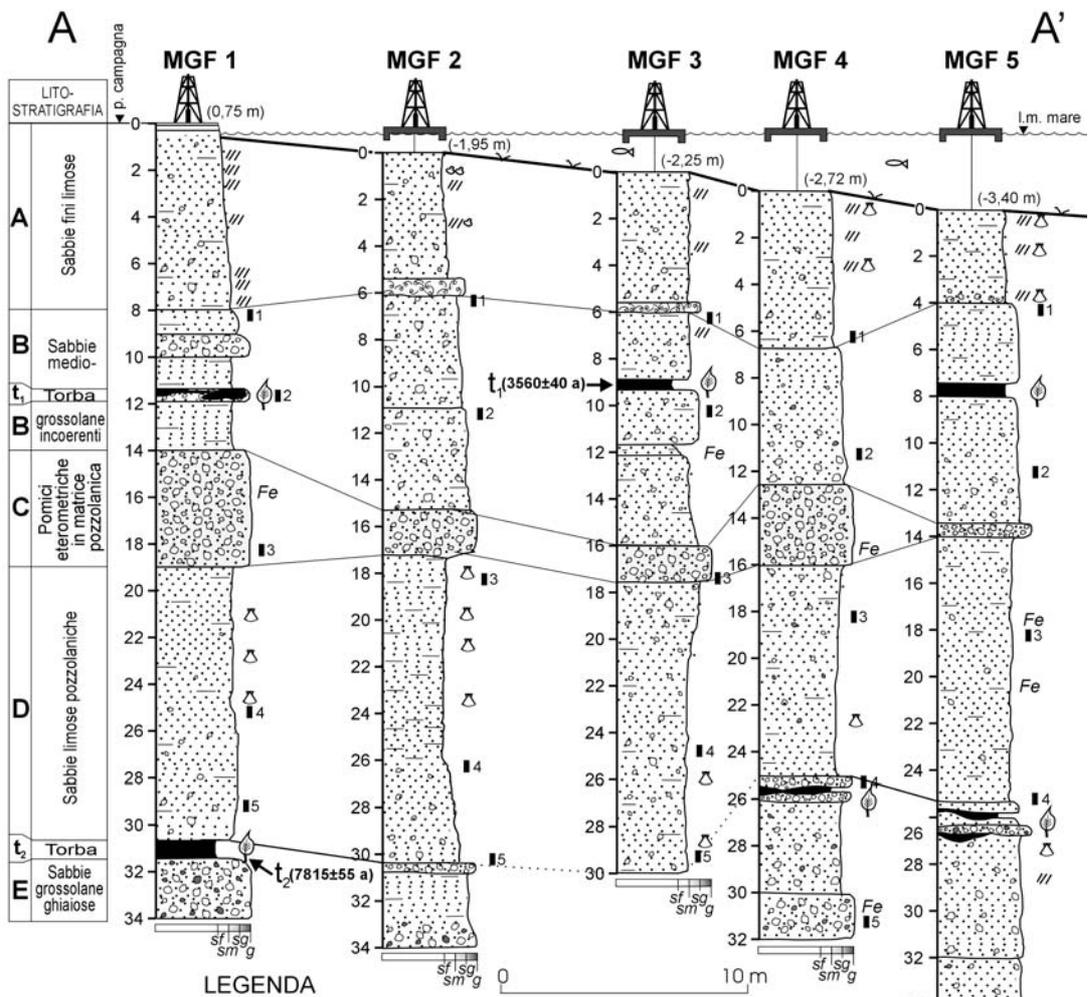
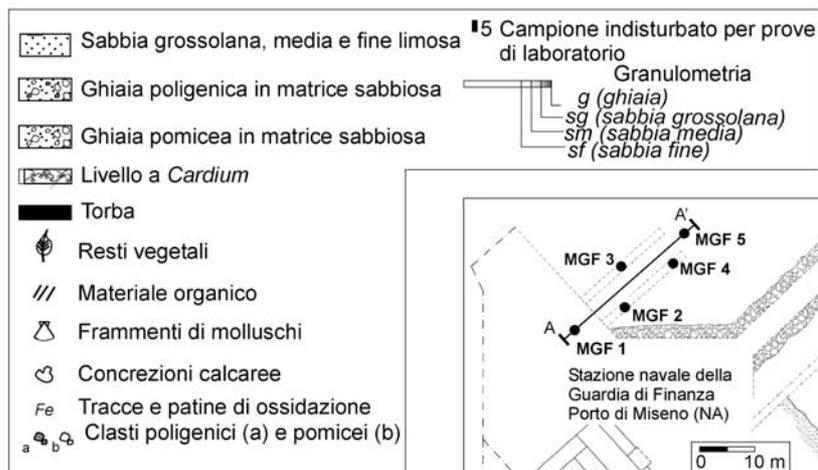


Fig. 3 - Correlazione litostratigrafica tra i carotaggi MGF del Porto di Miseno. Le età assolute degli orizzonti di torba t_1 e t_2 sono state determinate datati con il metodo del radiocarbonio.

Lithostratigraphic correlation among MGF cores, Porto Miseno. Peat horizons t_1 and t_2 have been dated by ^{14}C .



mersa. I depositi si presentano generalmente coerenti, oltre che resistenti alla perforazione.

4.3. Unità C - Pomici eterometriche in matrice pozzolanica

Quest'unità raggiunge uno spessore massimo di 5

m nel carotaggio MGF 1, e si rinviene a profondità comprese tra i 14 ed i 19 m. Le pomici, immerse in una matrice sabbioso-limosa di natura vulcanica, hanno dimensioni variabili (5 cm max.) (grafico C in Fig. 4) e presentano, talvolta, patine di ossidazione probabilmente legate a processi di alterazione in ambiente subaereo

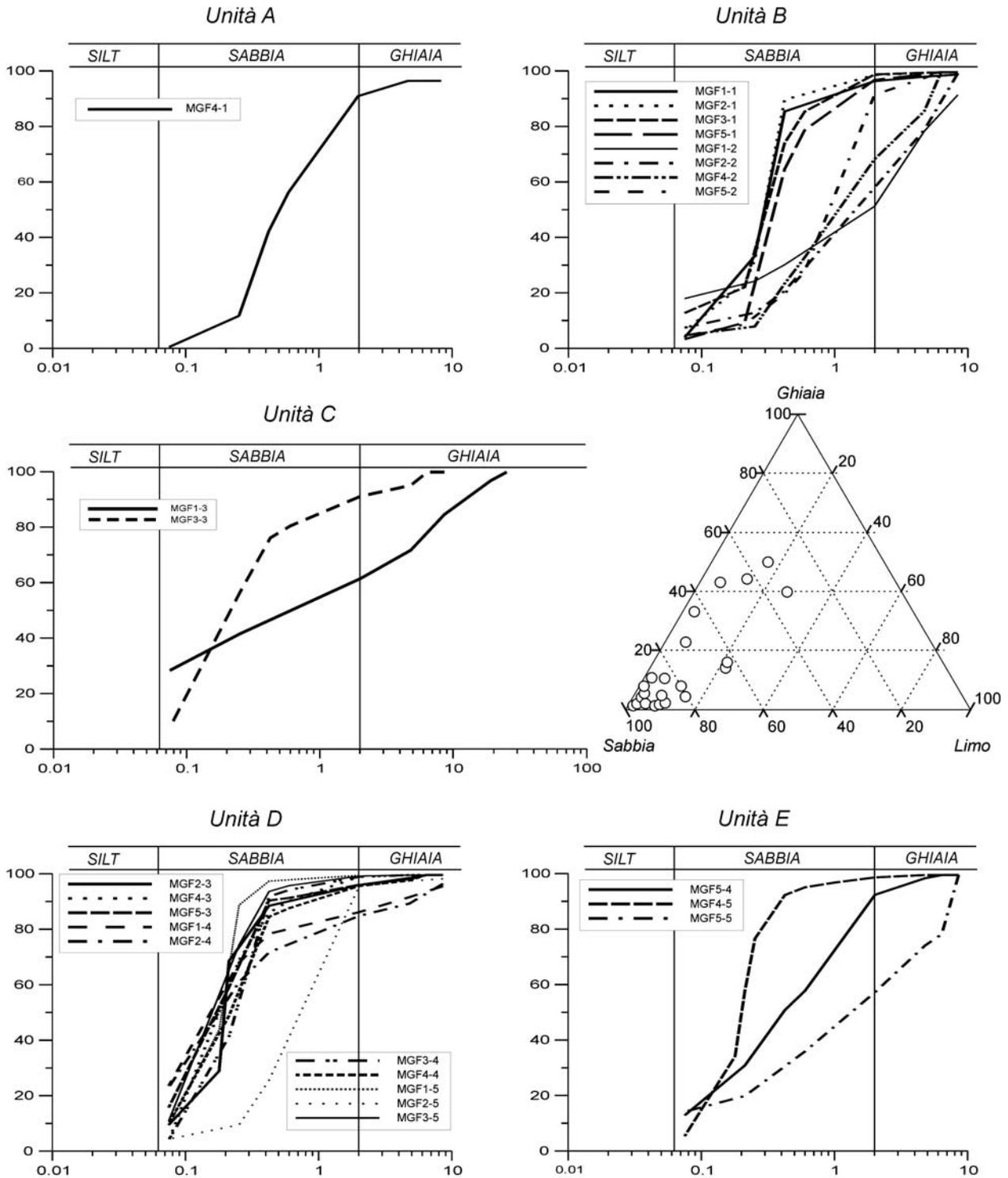


Fig. 4 - Curve granulometriche (di frequenza cumulativa) dei campioni prelevati dai carotaggi effettuati nel Porto di Miseno (MGF 1-MGF 5).

Granulometric curves (cumulative frequencies) of core samples drilled at Porto Miseno (MGF 1-MGF 5).

o vadoso. La presenza, in tale livello, di granuli (ciottoli) con elevato grado di arrotondamento, suggerisce per questi depositi un ambiente di sedimentazione di spiaggia sommersa prossimale o di battigia.

4.4. Unità B - Sabbie medio-grossolane incoerenti

Questi depositi clastici grossolani sono poveri in matrice (grafico B in Fig. 4) e piuttosto incoerenti. Essi costituiscono un'unità di spessore variabile da un minimo di 6 m ad un massimo di 10 m (sondaggio MGF 5). Inclusi in tale livello si ritrovano, spesso, clasti pomice di dimensioni variabili. Si tratta dei depositi basali di un breve ciclo marino trasgressivo-regressivo che si sviluppa con una classica successione gradata passando da sabbie medio-grossolane a sabbie medie, debolmente limose, progressivamente più fini procedendo verso l'alto.

4.5. Unità A - Sabbie fini limose

Rappresentano i depositi stratigraficamente più recenti che da fondo mare raggiungono una profondità media di 6 m (7.50 m nel carotaggio MGF 1 eseguito a terra). Queste sabbie di natura vulcanica sono caratterizzate da una notevole presenza di resti di origine vegetale e da piccoli frammenti di gusci di molluschi. Talora si ritrovano gusci di lamellibranchi (*Cardium* sp.) ben conservati ed organizzati in veri e propri orizzonti alla base dell'unità (sondaggi MGF 2, MGF 3, MGF 5). Queste caratteristiche suggeriscono un ambiente deposizionale di bassa energia di tipo spiaggia sommersa di ambiente protetto.

4.6. Torbe

Gli orizzonti di torba rinvenuti durante le operazioni di carotaggio si ritrovano, rispettivamente, all'interno dell'unità B (orizzonte t_1), a profondità comprese tra 8 e 12 m, ed al passaggio tra le unità E e D (orizzonte t_2), a profondità comprese tra 26 e 31.5 m (Fig.3). L'orizzonte t_2 è stato raggiunto nel sondaggio MGF 1 ad una profondità di 31.5 m (campione n° 6444) mentre l'orizzonte t_1 è stato carotato nel sondaggio MGF 3 ad una profondità di 9.50 m (campione n° 6445).

I campioni prelevati sono stati sottoposti ad analisi per la determinazione dell'età assoluta con il metodo del radiocarbonio. Per il campione n° 6444 (t_1) è stata ottenuta un'età di 3565 ± 40 anni B.P., mentre il campione n° 6445 (t_2) ha fornito un'età di 7815 ± 55 anni B.P. (Fig. 3). Le età misurate degli orizzonti torbosi t_1 e t_2 ben si correlano con le età, riportate in letteratura, di due paleosuoli che testimoniano fasi di quiescenza dell'attività vulcanica nel settore occidentale dei Campi Flegrei durante gli ultimi 10.000 anni (Rosi & Sbrana, 1987; D'Antonio *et al.*, 1999).

5. CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DEI DEPOSITI OLOCENICI DI PORTO MISENO

I risultati ottenuti dalle prove di laboratorio e dalle indagini geotecniche in sito, riportati sinteticamente nelle Tabelle 3 e 4 e con i valori medi per ogni unità riconosciuta in Tabella 5, hanno fornito dati utili per la caratterizzazione delle proprietà fisiche generali e meccaniche della successione olocenica investigata, rappre-

sentando inoltre un ulteriore criterio utile per la correlazione stratigrafica.

In particolare, l'analisi delle curve granulometriche illustrate in Figura 4, ha consentito di suddividere la successione di Porto Miseno in cinque unità litostratigrafiche principali e di evidenziarne i caratteri tessiturali ed i parametri statistici principali.

5.1. Unità E - Sabbie grossolane ghiaiose

Si tratta di sabbie grossolane caratterizzate da una frazione ghiaiosa piuttosto abbondante (circa il 42%) e dalla presenza di sottili livelli più limosi intercalati che hanno facilitato le operazioni di campionamento.

I depositi risultano ben addensati, con valori di N_{SPT} molto variabili e compresi tra 27 e 70. Tale dispersione è probabilmente legata alle dimensioni medie dei clasti ed alla distribuzione piuttosto eterogenea delle varie classi granulometriche. I pesi dell'unità di volume γ risultano compresi tra 17.65 e 18.63 kN/m³, la porosità n presenta valori medi intorno a 39%, la coesione è nulla, mentre i valori dell'angolo di attrito interno ϕ sono mediamente di 35°.

5.2. Unità D - Sabbie limose pozzolaniche

Tale livello è costituito da sabbie fini pozzolaniche con una frazione di limo variabile che in alcuni casi raggiunge il 23%. Si tratta di depositi apparentemente molto compatti come testimoniato dai risultati delle prove SPT eseguite, che hanno registrato valori NSPT compresi tra minimi di 34 e massimi fino al rifiuto. Le Tabelle 3 e 4 mostrano valori di peso dell'unità di volume γ mediamente compresi tra 15.7 e 17.65 kN/m³, un valore medio di 6 kPa per la coesione c , porosità n intorno al 50% ed angoli di attrito interno ϕ tra 35° e 40°.

5.3. Unità C - Pomice eterometriche in matrice pozzolanica

Tale orizzonte è rappresentato, da un punto di vista granulometrico, da una ghiaia con sabbia limosa. La porosità n di questi depositi è molto elevata (circa il 60%), ed i pesi dell'unità di volume γ si aggirano intorno ai 16.67 kN/m³.

Lo stato di addensamento è risultato fortemente variabile con valori di N_{SPT} compresi tra 8 e 30, mentre la prova di taglio diretto ha registrato angoli di attrito ϕ di 36° e valori di coesione c intorno a 6 kPa.

5.4. Unità B - Sabbie medio-grossolane incoerenti

I risultati delle prove di laboratorio indicano che per tali sabbie la frazione ghiaiosa è talora predominante. Questi depositi sono dotati di un certo grado di addensamento con valori di N_{SPT} mediamente compresi tra 20 e 40, tipici di sabbie da mediamente addensate a dense. I valori del peso di volume γ registrati dalle prove eseguite risultano in media pari a 15.7 kN/m³ con valori minimi e massimi di 14.70 e 18.63 kN/m³ registrati, rispettivamente, in corrispondenza di orizzonti costituiti da pomice e litici. La coesione c misurata presenta un valore medio di 4 kPa, mentre l'angolo di attrito interno ϕ oscilla tra i 33° ed i 38°.

5.5. Unità A - Sabbie fini limose

La frazione limosa nelle sabbie fini è più o meno abbondante ed i filamenti vegetali, presenti in quantità considerevoli, conferiscono al complesso una certa

compressibilità.

Le prove SPT eseguite hanno fatto registrare valori del numero di colpi N_{SPT} compresi tra 12 e 20, caratteristici di terreni da scarsamente a mediamente addensati.

Dal punto di vista delle proprietà fisiche generali e meccaniche, l'unico campione analizzato in laboratorio ha evidenziato pesi dell'unità di volume γ prossimi a 14.71 kN/m^3 , valori di coesione c nulli ed angoli di attrito ϕ pari a 35° .

6. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'analisi di 5 sondaggi a rotazione con carotaggio continuo (MGF 1 - MGF 5), insieme con la determinazione dell'età radiometrica (^{14}C AMS) di due livelli di torba rinvenuti nella successione campionata, ha consentito di ricostruire nel dettaglio l'assetto stratigrafico della successione tardo-quadernaria della baia di

Miseno, nel Golfo di Pozzuoli, che rappresenta un settore sommerso del distretto vulcanico dei Campi Flegrei (Fig.3). In particolare, l'area del porto di Miseno è caratterizzata da una successione olocenica espansa, che è stata investigata fino ad una profondità massima di 40 m, e risulta costituita da una successione di sabbie marine più o meno limose con abbondante frazione vulcanoclastica ed intercalazioni di livelli o strati di depositi piroclastici rappresentati prevalentemente da pomici.

Lo studio delle campionature, condotto sia sulla base delle caratteristiche litologiche ricavate dalla descrizione dei *log* di carotaggio, sia utilizzando i risultati dell'analisi granulometrica dei campioni in laboratorio, ha consentito di riconoscere cinque unità litostratigrafiche principali che dal basso verso l'alto sono state distinte con lettere E-A (Figg. 3 e 4).

6.1. Proprietà fisiche e meccaniche

L'analisi delle proprietà fisiche dei campioni ha evidenziato valori piuttosto bassi del grado di saturazio-

Sondaggio (n°)	Campione (n°)	Profondità (m)	Granulometria (% in peso)			Umidità w (%)	Peso specifico dei granuli γ_s ($1\text{E}+03 \text{ Kg/m}^3$)	Peso di volume γ (kN/m^3)	Porosità n (%)	Grado di saturazione S (%)
			Ghiaia	Sabbia	Limo + Argilla					
1	1	8,0-8,5	3,22	92,98	3,79	36,13	2,518	17,289	48,58	0,96
1	2	11,5-12,0	48,68	33,43	17,87	46,98	2,481	15,847	55,66	0,92
1	3	18,0-18,4	38,43	33,21	28,35	75,54	2,487	13,631	68,15	0,87
1	4	25,0-25,6	13,47	63,07	23,45	37,68	2,524	18,093	46,90	1,00
1	5	29,0-29,5	0,13	90,65	9,20	38,20	2,552	16,759	51,54	0,91
2	1	6,0-6,4	0,95	92,90	6,13	29,25	2,513	16,573	47,95	0,79
2	2	11,0-11,5	41,9	50,8	7,28	25,80	2,486	15,847	48,32	0,68
2	3	18,0-18,6	3,65	87,09	9,25	40,64	2,467	16,308	52,07	0,92
2	4	26,0-26,5	14,81	62,30	22,87	41,99	2,384	14,778	55,49	0,80
2	5	30,0-30,5	4,06	91,82	4,11	21,58	2,521	19,034	36,66	0,93
3	1	6,0-6,5	0,78	86,58	12,63	26,69	2,491	19,034	38,51	1,00
3	2	10,0-10,6	31,59	63,86	4,54	19,01	2,495	14,641	49,71	0,47
3	3	17,5-17,8	8,73	83,50	7,76	39,27	2,548	17,279	50,34	0,98
3	4	24,5-25,0	0,65	95,57	3,76	56,61	2,384	15,514	57,37	0,99
3	5	29,0-29,3	0,4	88,92	10,66	54,71	2,353	15,592	56,31	0,99
4	1	6,0-6,5	5,54	91,28	3,16	18,73	2,510	14,670	49,81	0,47
4	2	11,0-11,5	21,16	71,58	7,24	26,55	2,478	15,690	48,96	0,68
4	3	18,0-18,6	0,59	95,85	3,54	32,43	2,524	17,416	47,17	0,91
4	4	25,0-25,6	3,98	86,03	9,71	40,98	2,300	15,926	49,89	0,94
4	5	31,0-31,5	0,84	93,46	5,66	22,52	2,523	18,750	37,88	0,93
5	1	4,0-4,5	2,78	94,10	3,10	22,37	2,622	17,563	44,16	0,74
5	2	11,0-11,5	8,17	87,48	4,33	51,03	2,413	15,475	56,69	0,94
5	3	18,0-18,6	3,53	80,87	15,59	35,19	2,507	17,278	48,02	0,95
5	4	25,0-25,5	7,14	79,68	13,17	37,20	2,522	16,709	50,84	0,90
5	5	37,0-37,5	42,33	43,17	14,9	24,65	2,486	17,769	41,52	0,86

Tab. 3 - Risultati delle prove di laboratorio per la determinazione delle proprietà fisiche dei campioni MGF.

Summary of main physical properties of samples MGF as determined in laboratory.

Sondaggio (n°)	Campione (n°)	Profondità (m)	Angolo di attrito ϕ (°)	Coesione c (kPa)
1	1	8,0-8,5	38	18,0
1	2	11,5-12,0	33	0,0
1	3	18,0-18,4	36	8,0
1	4	25,0-25,6	37	14,0
1	5	29,0-29,5	36	15,0
2	1	6,0-6,4	35	2,0
2	2	11,0-11,5	39	1,0
2	3	18,0-18,6	38	10,0
2	4	26,0-26,5	30	0,0
2	5	30,0-30,5	40	17,0
3	1	6,0-6,5	39	7,0
3	2	10,0-10,6	33	0,0
3	3	17,5-17,8	37	4,0
3	4	24,5-25,0	41	4,0
3	5	29,0-29,3	36	0,0
4	1	6,0-6,5	35	0,0
4	2	11,0-11,5	36	4,0
4	3	18,0-18,6	36	0,0
4	4	25,0-25,6	36	0,0
4	5	31,0-31,5	34	0,0
5	1	4,0-4,5	35	0,0
5	2	11,0-11,5	36	2,0
5	3	18,0-18,6	39	3,0
5	4	25,0-25,5	35	0,0
5	5	37,0-37,5	36	0,0

Tab. 4 - Risultati delle prove di laboratorio per la determinazione delle proprietà meccaniche dei campioni MGF.

Mechanical properties of samples MGF as determined in laboratory.

	Unità litostratigrafiche	Porosità n (%)	Grado di saturazione S (%)	Peso di volume γ (kN/m ³)	Angolo di attrito ϕ (°)	Coesione c (kPa)
A	Sabbie fini limose	49,81	0,47	14,71	35,00	0,0
B	Sabbie medio-grossolane incoerenti	47,87	0,78	15,62	36,38	4,2
C	Pomici eterometriche in matrice pozzolanica	59,25	0,93	15,54	36,50	6,0
D	Sabbie limose pozzolaniche	50,48	0,93	16,67	36,50	6,6
E	Sabbie grossolane ghiaiose	39,70	0,90	18,24	35,00	0,0

Tab. 5 - Medie aritmetiche dei risultati delle prove di laboratorio per la determinazione delle principali proprietà fisiche e meccaniche dei campioni MGF espresse in funzione delle unità litostratigrafiche riconosciute.

Arithmetic mean of main physical and mechanical properties of samples MGF plotted against lithostratigraphic units.

ne S e dei pesi di volume γ da porre probabilmente in relazione sia ad un lieve grado di cementazione dello scheletro vetroso, che può avere talora sensibilmente ridotto la porosità efficace dei sedimenti, che alla natura vulcanoclastica dei depositi. I pesi specifici reali sono stati determinati attraverso l'uso di picnometri collegati con pompa a vuoto. In molti casi, dati i valori bassi del grado di saturazione S , si è fatto riferimento alla porosità, invece che al peso di volume γ , per valutare lo stato di addensamento dei depositi.

I risultati delle prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche, o di parametri ad esse correlabili, quali il numero di colpi N_{SPT} della *Standard Penetration Test*, sono piuttosto disomogenei, fatta eccezione per la coesione c la quale è risultata sempre piuttosto bassa, in tutte le unità campionate, nonostante un certa tendenza dei depositi piroclastici pozzolanici a presentare una debole cementazione in ambiente diagenetico marino. A tale proposito va ricordato che il minimo disturbo arrecato al sedimento durante le fasi di prelievo dei campioni danneggia le tessiture sedimentarie, distruggendo conseguentemente il tenue scheletro vetroso che conferisce, invece, una certa consistenza ai sedimenti in sito. A ciò, oltre che alla scarsa cernita ed alta variabilità granulometrica dei depositi vulcanoclastici, deve probabilmente imputarsi anche l'elevata dispersione delle misure di N_{SPT} che hanno evidenziato valori molto elevati o a rifiuto.

Le prove di taglio sono state effettuate con tre provini per ogni determinazione, imponendo pressioni verticali rispettivamente di 150 kPa, 300 kPa e 450 kPa. I risultati di queste prove hanno fornito valori dell'angolo di attrito ϕ normalmente proporzionali alle dimensioni medie dei granuli costituenti il sedimento.

6.2. Analisi di facies e stratigrafia

L'analisi delle associazioni di litofacies della successione in studio indica ambienti deposizionali di transizione (spiaggia sommersa, laguna costiera) di bassa energia, dove la circolazione ristretta e l'assenza di moto ondoso e forti correnti lungo costa favoriscono l'accumulo dei depositi con frazione fine relativamente abbondante.

La successione stratigrafica investigata evidenzia un'evoluzione generale trasgressiva, localmente interrotta da due brevi fasi regressive probabilmente collegate ad un rapido accumulo (giacitura primaria) e/o trasporto (con parziale rimaneggiamento) di depositi piroclastici che terminano con la formazione di due livelli di torba, denominati rispettivamente t_1 e t_2

(Fig. 3).

In particolare, il rapido accumulo delle piroclastiti dell'unità C (Insinga *et al.*, 2001), che può raggiungere uno spessore di 5 m (sondaggio MGF 1), e la conseguente diminuzione dello spazio di accommodamento disponibile per i sedimenti, determinano il passaggio da condizioni di spiaggia sommersa (Unità B) a condizioni tipiche di ambiente meno profondo (unità D). Tale passaggio avviene attraverso una fase di transizione in cui predominano processi di alterazione tipici di ambiente vadoso e/o subaereo, testimoniati dalle frequenti tracce e patine di ossidazione che caratterizzano i primi metri dell'unità C.

Ulteriore evidenza a sostegno di episodi regressivi è data proprio dallo sviluppo dei livelli torbosi i quali suggeriscono brevi episodi di emersione con formazione di insenature o lagune costiere effimere che poi evolvono nuovamente ad ambienti di spiaggia sommersa. Successioni di questo genere, con depositi di transizione o continentali intercalati a sedimenti marini, sono tipiche di zone costiere in aree vulcaniche attive (Lajoie & Stix, 1992).

Nel corso dei carotaggi sono stati campionati due livelli di torba, t_1 e t_2 , rispettivamente nei sondaggi MGF 3 (profondità 9 m, unità D) e MGF 1 (profondità 31 m, al passaggio tra le unità A e B). I campioni di torba hanno fornito età radiometriche (^{14}C) di 3560 ± 40 anni e 7815 ± 55 anni rispettivamente, e risultano pertanto correlabili con due paleosuoli che testimoniano a terra fasi di quiescenza dell'attività vulcanica dei Campi Flegrei. In particolare, l'orizzonte t_2 si correla con il paleosuolo B (8,2-4,8 ka, Di Vito *et al.*, 1999) o paleosuolo P3 (8,0-4,6 ka, Rosi & Sbrana, 1987), mentre l'orizzonte t_1 è correlabile alla fase di quiescenza dell'attività vulcanica tra l'eruzione di Senga (3,7 ka, Ghiara, 1990) e quella di Monte Nuovo (1538 A.D., Rosi & Sbrana, 1987).

Nessuno dei carotaggi effettuati ha raggiunto il substrato tufaceo (ca 11000 anni) che pure si rinviene estesamente in affioramento nelle aree circostanti il Porto di Miseno. Ciò suggerisce per l'area di studio elevati tassi di sedimentazione durante l'Olocene superiore, da porsi probabilmente in relazione ai processi di subsidenza e di collasso vulcano-tettonico di aree discrete del settore occidentale dei Campi Flegrei, di cui la piattaforma interna del Golfo di Pozzuoli rappresenta il settore sommerso (Colantoni, 1972; Pescatore *et al.*, 1984; Milia, 1998). Quest'osservazione, associata alle determinazioni delle età assolute dei livelli di torba t_1 e t_2 , intercalati ai depositi di Porto Miseno, indica che la base della successione carotata ha un'età probabilmente compresa tra 9.000-10.000 anni.

Una stima dei tassi di sedimentazione medi, negli intervalli di tempo compresi all'incirca tra 8.000 e 3.600 anni e tra 3.600 anni e l'attuale, calcolati in base agli spessori stratigrafici delle unità inferiori (A e B) e superiori (D ed E) del sondaggio MGF 1, conduce a valori di 3.5 m/ka e di 2.2 m/ka, rispettivamente. Se si ammette che i tassi di sedimentazione misurati rappresentino in qualche modo il riflesso della variabilità dei volumi di materiale vulcanoclastico disponibili per l'apporto sedimentario in ambiente costiero, si può avanzare l'ipotesi che il valore inferiore del tasso di sedimentazione registrato nella parte alta della successione (unità D ed E) sia conseguenza dello scarso apporto di sedimenti vulcanoclastici nell'area per l'assenza di manifestazioni

eruttive durante gli ultimi 3.6 ka.

La successione olocenica di Porto Miseno può essere tentativamente correlata con altri depositi marini tardo-quadernari già descritti in letteratura lungo la fascia costiera dei Campi Flegrei. In particolare, l'unità A, e le unità B-C e D-E, discusse in questo lavoro, ben si correlano rispettivamente con le unità sismostratigrafiche G1, G2 e G3, individuate nel settore centrale ed in quello orientale della piattaforma continentale del Golfo di Pozzuoli (Milia, 1996; 1998; Milia & Torrente, 2000). Una correlazione possibile con successioni affioranti a terra è individuabile, inoltre, nei depositi del terrazzo marino de "La Starza" presso Pozzuoli dove la successione olocenica è stata sollevata di circa 40 m al di sopra del livello del mare durante gli ultimi 4000 anni (Cinque *et al.*, 1985; Barra, 1991).

7. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Corpo della Guardia di Finanza per l'assistenza ed il supporto logistico fornito durante le operazioni di carotaggio sul molo e nello specchio d'acqua antistante la Stazione Navale di Porto Miseno nel Comune di Bacoli (Na) ed i dott. Alessandro Conforti e Gennaro Sarnacchiaro per l'attiva collaborazione offerta durante le operazioni di carotaggio e nella stesura delle singole stratigrafie. Gli autori sono grati inoltre a tutti i ricercatori e tecnici dell'Istituto di Ricerca del CNR Geomare Sud di Napoli che, a vario titolo, hanno reso possibile lo svolgimento di questo lavoro ed all'ing. Armando Simonelli che ha fornito utili consigli per un corretto inquadramento dell'analisi ed interpretazione dei dati geotecnici.

Si desidera ringraziare ancora il Prof. Aldo Cinque ed un revisore anonimo per i preziosi suggerimenti e spunti forniti in sede di revisione critica del manoscritto.

Le analisi delle proprietà fisiche e meccaniche condotte su campioni indisturbati sono state eseguite dal laboratorio ufficiale "Geologia Tecnica" di Salerno. Le determinazioni delle età assolute con il metodo del radiocarbonio (^{14}C) dei campioni di torba sono state effettuate presso il laboratorio "ISOTOPTECH" di Debrecen, Ungheria.

8. LAVORI CITATI

- Aiello G., Budillon F., Cristofalo G., D'Argenio B., de Alteriis G., De Lauro M., Ferraro L., Marsella E., Pelosi N., Sacchi M., Tonielli R., (1999): *Marine geology and morphobathymetry in the Bay of Naples*, CONISMA, Spec. Vol. on the Int. Cong. "Diversità e cambiamenti", Ischia, October 1998, Springer-Verlag.
- Aiello G., Budillon F., D'Argenio B., de Alteriis G., De Lauro M., Ferraro L., Insinga D., Marsella E., Molisso F., Pelosi N., Sacchi M., Tonielli R. (2001): *Nuovi dati sulla morfologia sottomarina e sedimentazione recente nel Golfo di Napoli (Tirreno meridionale)*, "Geologia Ambientale", volume speciale, in stampa.
- Alessio M., Allegri L., Antoniofi F., Belluomini G., Improta S., Manfra L., Martinez M.P. (1994): *La curva di risalita del Mar Tirreno negli ultimi 40 ka*

- ottenuta mediante datazioni di speleotemi sommersi e dati archeologici, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, **LII**, 261-275.
- Barra D., (1991): *Studio del Pleistocene superiore-Olocene delle aree vulcaniche campane*, Tesi di dottorato, Università di Napoli Federico II, 298 pp.
- Barberi F., Corrado G., Innocenti F., Luongo G., (1984): *Phlegrean Field 1982-1984: Brief Chronicle of a volcano emergency in a densely populated area*, Bull. Volcanol., **47-2**, 175.
- Caputo P., (1989): *Attività di tutela della Soprintendenza Archeologica di Napoli e Caserta*, Atti II Conv. Naz. Archeologia subacquea. Ministero Beni AA.CC., Roma
- Cinque A., Rolandi G., Zamparelli V., (1985): *L'estensione dei depositi marini olocenici nei Campi Flegrei in relazione alla vulcano-tettonica*, Boll. Soc. Geol. Ital., **104**, 327-348.
- Cinque A., Russo F., Pagano M., (1991): *La successione dei terreni di età post-romana delle terme di Misero (Napoli): nuovi dati per la storia e la stratigrafia del bradisisma puteolano*, Boll. Soc. Geol. It., **110**, 231-244.
- Colantoni P., Del Monte M., Fabbri A., Gallignani P., Selli R. & Tomadin L. (1972) - *Ricerche geologiche nel Golfo di Pozzuoli*, In: Versino, L. (ed.), *Relazione sui rilievi effettuati nell'area flegrea nel 1970-71*, CNR, Quaderni de "La Ricerca Scientifica", 83, pp. 23-76.
- D'Antonio M., Civetta L., Orsi G., Pappalardo L., Piochi M., Carandente A., de Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., (1999): *The present state of the magmatic system of the Campi Flegrei caldera based on a reconstruction of its behavior in the past 12 ka*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, **(91) 2-4**, 247-268
- Di Girolamo P., Ghiara M.R., Lirer L., Munno R., Rolandi G. & Stanzione D., (1984): *Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei*, Boll. Soc. Geol. It., **103**, 349-413.
- Di Vito M., Lirer L., Mastrolorenzo G., Rolandi G., (1987): *The Monte Nuovo eruption (Campi Flegrei, Italy)*, Bull. Volcanol. **49**, 608-615.
- Di Vito M., Isaia R., Orsi G., Southon J., de Vita S., D'Antonio M., Pappalardo L., Piochi M., (1999): *Volcanism and deformation since 12,000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy)*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, **(91) 2-4**, 221-246.
- Dvorak J.J. & Mastrolorenzo G. (1991): *The mechanisms of recent vertical crustal movements in Campi Flegrei caldera, southern Italy*, Special Paper-Geological Society of America.
- Ghiara M.R., (1990): *Studio evolutivo del sistema magmatico flegreo negli ultimi 10 ka*, Boll. Soc. Natur. Napoli, **98-99**, pp 30.
- Insinga D., Lanphere M., Morra V., Sacchi M., Molisso F., Ricci G., (2001): *Stratigraphy, ¹⁴C and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology, and petrochemistry of Holocene deposits in an active volcanic area: the Pozzuoli Bay, Southern Italy*, EUG Assembly, Strasbourg, April 2001.
- Ippolito F., D'Argenio B., Pescatore T & Scandone P., (1973a): *Unità stratigrafico-strutturali e schema tettonico dell'Appennino meridionale*, Ist. Geol. Geofis. Università Napoli, Pubbl. 15, 1-33.
- Lajoie J. and Stix J., (1992): Volcaniclastic rocks. In: R. G. Walzer and N. P. James (eds), *Facies Models: Response to sea level change*. Geological Association of Canada, pp. 101-118.
- Milia A., (1996): *Evoluzione tettono-stratigrafica di un bacino peritirrenico: Il Golfo di Napoli*, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Milia A., (1998): *Stratigrafia, strutture deformative e considerazioni sull'origine delle unità deposizionali oloceniche del Golfo di Pozzuoli (Napoli)*, Boll. Soc. Geol. It., **117**, 777-787.
- Milia A., (2000): *Active deformation and volcanism offshore Campi Flegrei, Italy: new data from high-resolution seismic reflection profiles*, Marine Geology, **171**, pp.61-73.
- Milia A., Torrente M.M., (2000): *Fold uplift and synkinematic stratal architectures in a region of active transtensional tectonics and volcanism, eastern Tyrrhenian Sea*, GSA Bulletin, **112**, p 1531-1542.
- Orsi G., De Vita S., di Vito M., (1996): *The restless resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, **74**, 179-214.
- Ortolani F., Aprile F., (1978): *Nuovi dati sulla struttura profonda della Piana Campana a sud-est del fiume Volturno*, Boll. Soc. Geol. It., **98**, 591-608.
- Pescatore T.S., Diplomatico G., Senatore M.R., Tramutoli M., & Mirabile L., (1984): *Contributi allo studio del Golfo di Pozzuoli: aspetti stratigrafici e strutturali*, Mem. Soc. Geol. It., **27**, 133-149.
- Pirazzoli P.A. (1976): *Sea-Level variations in the northwest Mediterranean during Roman times*, Science, **194**, 519-521.
- Rosi M. & Sbrana A., (1987): *Phlegrean Fields*, C.N.R., Quaderni de "La ricerca scientifica", **114-9**, pp176.

Ms. ricevuto il 15 maggio 2001
 Testo definitivo ricevuto il 23 aprile 2002

Ms. received: May 15, 2001
 Final text received: April 23, 2002