

I sedimenti tardo-quadernari dell'area litorale veneziana: analisi delle caratteristiche fisico-meccaniche

47

GEOLOGIA TECNICA & AMBIENTALE

2/94

LUIGI TOSI
Istituto per lo Studio della Dinamica
delle Grandi Masse
C.N.R. - Venezia

Lavoro svolto nell'ambito del «Progetto Sistema Lagunare Veneziano»
Linea di Ricerca 2.7

1. INTRODUZIONE

Il litorale veneziano si estende per circa cinquanta chilometri tra le foci dei fiumi Brenta a sud e Sile a nord ed è suddiviso in quattro settori: i litorali di Chioggia, Pellestrina, Lido e Cavallino, separati da tre bocche di porto che permettono l'interscambio dell'acqua lagunare con quella del mare. L'ampiezza del litorale è variabile da alcune decine di metri a Pellestrina a tre chilometri al Cavallino.

La morfologia dei lidi è in gran parte il risultato di una dinamica costiera e fluviale indotta da opere antropiche come: diversioni fluviali, dighe foranee, pennelli, murazzi, smantellamento di apparati dunali e non meno importanti insediamenti umani.

Questo studio sulle caratteristiche geotecniche del sottosuolo litoraneo veneziano si inserisce in un più ampio studio del litorale lagunare, iniziato da diversi anni, che comprende tanto ricerche a carattere scientifico che più propriamente a carattere applicativo.

L'importanza dell'integrità della struttura litoranea nel suo complesso è infatti cruciale per la sopravvivenza della laguna, e al tempo stesso la conoscenza dell'evoluzione del litorale è determinante per la comprensione dell'evoluzione del bacino lagunare.

A questo scopo, negli anni Settanta, l'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del C.N.R. di Venezia ha iniziato una ricerca sulle caratteristiche fisiche e geologiche del litorale e sulla sua evoluzione antica e recente. Furono quindi realizzate campagne investigative con la terebrazione di numerosi sondaggi tra cui i 18 sondaggi a carotaggio continuo («lito»), spinti a profondità medie di 25 metri e ubicati in modo abbastanza equispaziato nei quattro settori litoranei (Fig. 1).

Sui campioni recuperati furono eseguite migliaia di analisi a carattere diverso; oltre alle analisi geotecniche di seguito descritte, anche datazioni con radiocarbonio, analisi mineralogiche con diffrattometro (XRD), con microscopio elettronico a scansione (SEM), con microsonda elettronica (EMP) equipaggiata con EDS (Energy Dispersion Spectrometer), WDS (Wavelength Dispersion Spectrometer) e BSE (Backscattered Electron Detector), analisi chimiche e petrografiche, analisi granulometrica con analizzatore di immagine (Image Analysis), analisi micropaleontologiche e sedimentologiche, ecc., che per varie difficoltà si sono protratte per tempi piuttosto lunghi.

Alcuni dei risultati sono stati oggetto di pubblicazioni [GATTO 1980a, 1980b, 1984; GATTO e CARBO-

GNIN, 1981; BORTOLAMI et al., 1984; BONARDI et al. 1992; BONARDI e CARBOGNIN, 1992; TOSI 1993, 1994; BONARDI e TOSI 1994], altri, più prolungati nel tempo per la particolarità e l'innovazione delle metodologie impiegate, sono ancora in corso di elaborazione.

Per completezza di inquadramento e per una migliore comprensione delle caratteristiche geotecniche del sottosuolo litoraneo, argomento del presente lavoro, si ritiene utile richiamare i concetti fondamentali sulle caratteristiche litostratigrafiche dei sedimenti analizzati.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRATIGRAFICO

La ricostruzione dell'evoluzione ambientale e della stratigrafia superficiale del litorale è schematizzata in figura 2 dove sono sintetizzati gli elementi essenziali dei settori di Chioggia, Pellestrina, Lido e Cavallino, già descritti da GATTO [1980a, 1983].

Gli ultimi 25-30 metri di depositi quadernari sottostanti l'attuale cordone litoraneo che delimita la laguna di Venezia dal mare aperto, rappresentano l'evoluzione dall'ambiente continentale tardo-pleistocenico a quello marino-lagunare olocenico.

È noto che durante l'ultima glaciazione würmiana il livello marino era 90-130 metri più basso dell'attuale e la linea di costa era localizzata all'altezza di Pescara. Di questo periodo è il complesso continentale tardo-pleistocenico di base, caratterizzato da alternanze di strati limoso-argillosi più o meno torbosi e torbe. La struttura lentiforme e i frequenti passaggi laterali rivelano lo stile fluvio-continentale di questi depositi; le analisi paleontologiche indicano due diversi tipi di ambiente, uno prevalentemente fluvio-lacustre a sud ed uno più marcatamente lacustre-palustre a nord [TOSI, 1994].

Il settore meridionale e quello settentrionale erano separati da un alto strutturale, coincidente grosso modo con l'attuale zona di Venezia-Lido, che molto probabilmente fungeva da spartiacque tra i bacini del Piave e del Sile a nord, e della Brenta, del Bacchiglione e dell'Adige a sud. Questo alto strutturale, come si può vedere in figura 2, è ben evidenziato dal limite Pleistocene-Olocene indicante l'andamento morfologico della paleopianura würmiana che da -20 m dal livello medio del mare in località Sottomarina (estremo sud), sale a -8 m nella zona centrale del Lido per poi approfondirsi nuovamente verso il Cavallino fino a -14 m (estremo nord).

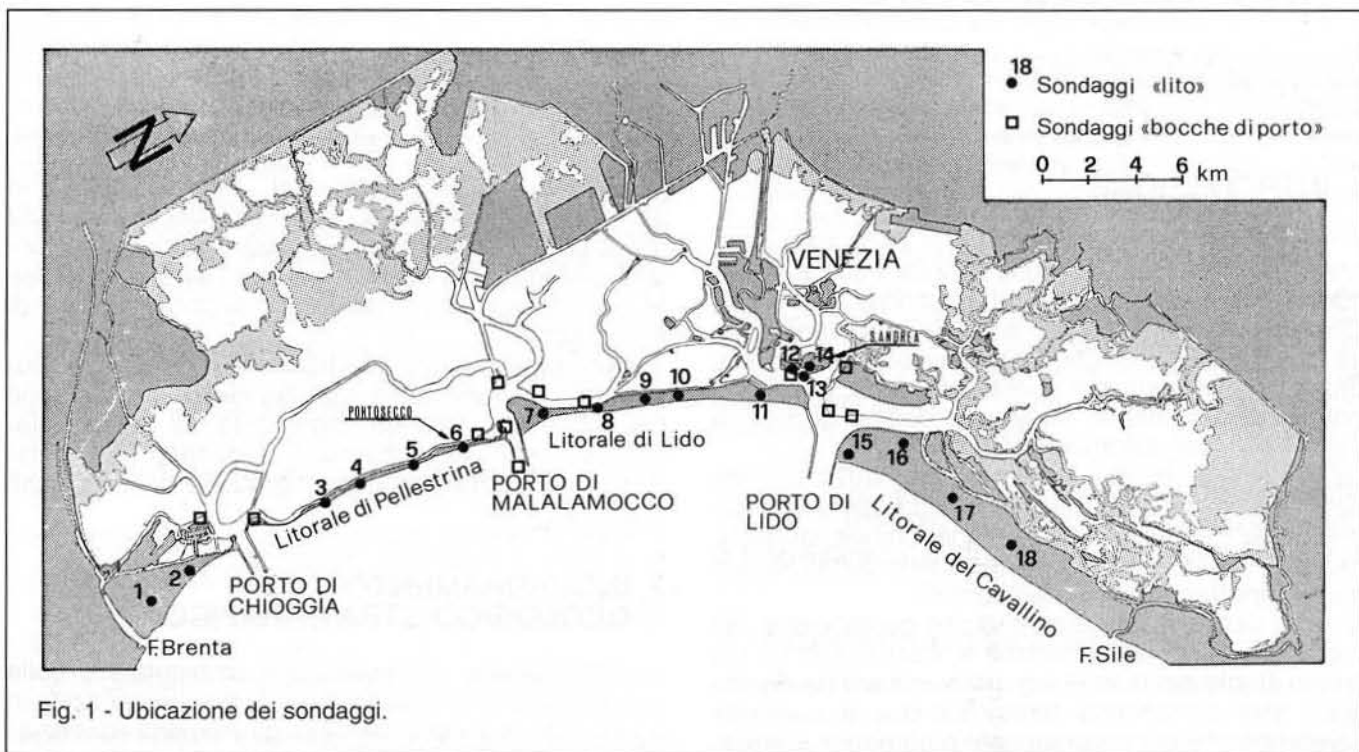


Fig. 1 - Ubicazione dei sondaggi.

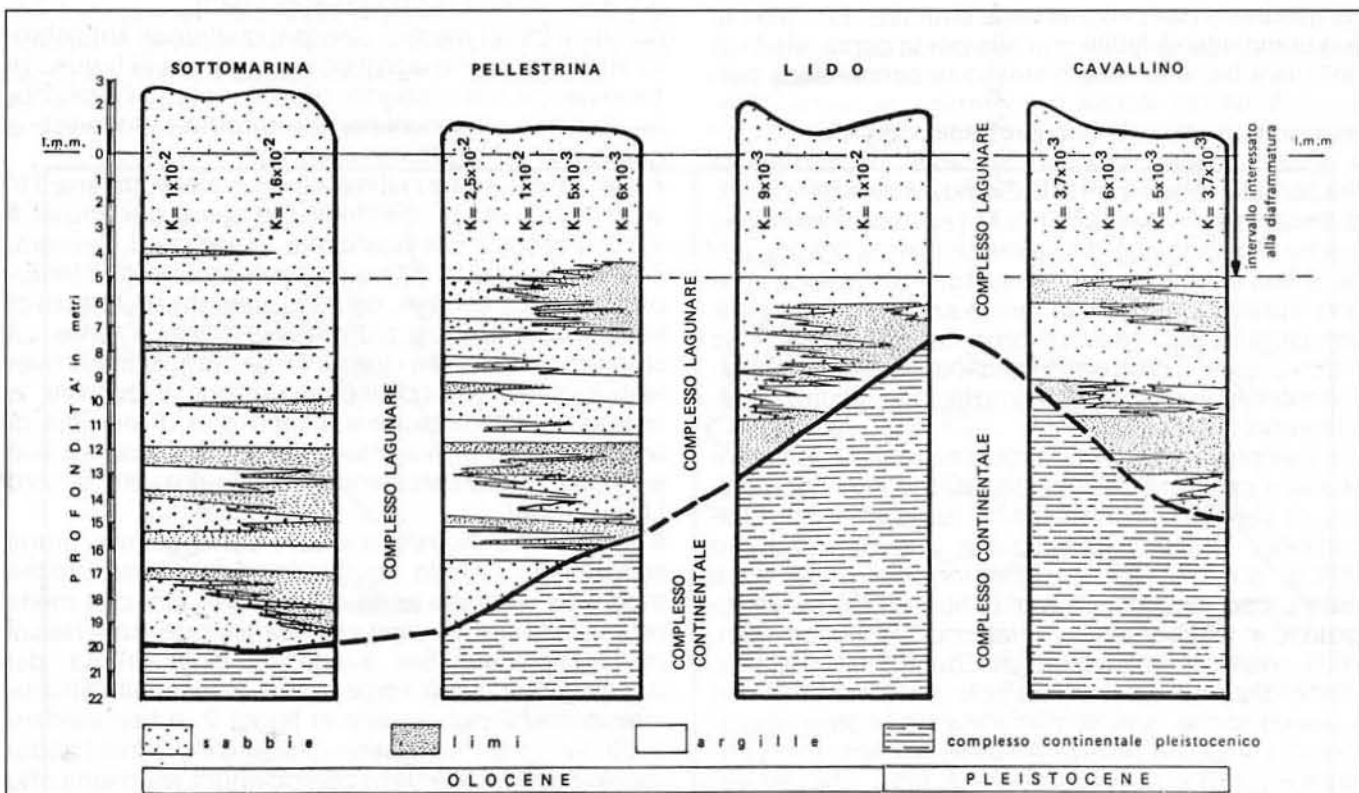


Fig. 2 - Stratigrafia schematica del sottosuolo litoraneo; coefficienti di permeabilità media dei primi 5 metri di profondità [da GATTO, 1983].

In corrispondenza dell'acme glaciale, in condizioni climatiche rigide ed aride, il reticolo idrografico presentava una limitata attività favorendo così l'essiccazione delle argille più superficiali e la formazione del piastrone sovraconsolidato noto come *caranto*.

Il *caranto* è un paleosuolo che rappresenta l'apice della regressione marina con significato cronostratigrafico molto importante e, anche se discontinuo o mancante per erosione, per le sue caratteristiche litologiche e meccaniche è un ottimo strato guida facilmente individuabile e utilissimo per riconoscere il limite Pleistocene-Olocene [FONTES e BORTOLAMI, 1972; GATTO e PREVIADELLO, 1974; GATTO e CARBOGNIN, 1981; BORTOLAMI et al., 1984].

I sedimenti più antichi qui indagati sono stati datati circa 30.000 anni b.p. mentre gli ultimi depositi pleistocenici sottostanti il *caranto* hanno un'età compresa tra i 18.000 e 16.000 anni b.p. [BORTOLAMI et al., 1984]. Purtroppo i tentativi di datare il *caranto* col ^{14}C sono risultati vani.

Con il miglioramento climatico iniziò la trasgressione Flandriana, riprese l'attività fluviale e con la progressiva variazione del livello di base si accentuarono i fenomeni di rotta e di esondazione.

Il complesso marino-lagunare olocenico, costituito in prevalenza da sabbie e sabbie limose, inizia di solito con depositi sabbiosi, ma talvolta si apre con livelli di argille continentali chiare o verdognole originate proprio dai menzionati depositi di sovralluvionamento da parte dei corsi d'acqua e comunque appartenenti al ciclo trasgressivo di apertura della deposizione olocenica. In questo livello di limi argillosi, già definito «di esondazione» [GATTO 1980a], sono state trovate breccie intraformazionali derivate dalla frammentazione del sottostante piastrone continentale.

Le radiodazioni hanno evidenziato che i primi sedimenti olocenici non sono isocroni, essendo stati datati circa 11.000 anni b.p. nella zona di Sottomarina, 5.000 anni b.p. verso il Lido nord e 7.000 anni b.p. nella zona di Cavallino nord.

Sopra queste *facies* iniziali, la serie olocenica continua quindi con depositi limoso-sabbiosi di ambiente marino litorale alternati ad argille limose e limi sabbiosi di ambiente lagunare e più raramente continentali. Queste variazioni deposizionali sono dovute alla combinazione di due fattori principali: le variazioni locali del rapporto tra tasso di subsidenza e sedimentazione e all'irregolarità del fenomeno eustatico che, come noto, dipende dalle variazioni climatiche.

Su questa situazione si impostano la laguna primordiale ed una serie di segmenti litorali separati da diverse aperture che mettono in comunicazione la laguna col mare aperto.

Successivamente in epoca storica le opere antropiche (diversioni fluviali, murazzi, dighe foranee, escavo dei canali ecc.) hanno causato la variazione dei rapporti tra subsidenza e sedimentazione e provoca-

to ulteriori modifiche al sistema lagunare costringendolo alla configurazione attuale.

Nell'area litorale lo spessore della coltre olocenica è molto variabile, da circa 20 metri nel settore meridionale, diminuisce a 8-10 metri nella zona centrale ed aumenta nuovamente a 15 metri nel settore settentrionale.

Parallelamente lo spessore diminuisce procedendo dal litorale verso la laguna fino quasi ad annullarsi nell'immediato entroterra.

3. MATERIALI E METODI

Per definire le caratteristiche geotecniche dei terreni tardo-pleistocenici ed olocenici in esame, sono stati utilizzati i 18 sondaggi «lito» precedentemente menzionati più 12 sondaggi ubicati nei pressi delle tre bocche di porto (v. fig. 1) facenti parte di una serie di numerose terebrazioni descritte da GATTO et al. [1976].

Complessivamente vengono considerate le analisi di 37 campioni di argille oloceniche di cui 6 della «zona di esondazione», di 73 campioni di argille pleistoceniche di cui 11 del *caranto*, di 125 campioni di sabbia olocenica e 32 pleistocenica e altri 181 campioni di sabbia indistinti (olocenica e pleistocenica).

Delle carote prelevate dai sondaggi «lito» sono stati studiati sia i campioni coesivi che quelli granulari. In particolare, sulle sabbie sono state eseguite prove di permeabilità e analisi granulometriche, mentre sulle argille oltre alla determinazione dei limiti di Atterberg, con i quali i terreni sono stati classificati sulla carta di Casagrande, si sono misurati anche il contenuto naturale d'acqua (che con i limiti ha fornito l'indice di consistenza), l'attività, il peso specifico e la resistenza al penetrometro tascabile ed allo scissometro. Solo per il sondaggio «lito 14», ubicato presso il Forte di Sant'Andrea e terebrato in occasione dei lavori di restauro dello stesso, oltre alle analisi delle argille succitate, sono disponibili anche delle prove di compressibilità edometrica.

In totale sui campioni «lito» sono state eseguite 157 analisi granulometriche, 181 prove di permeabilità, 77 determinazioni del contenuto naturale d'acqua e dei limiti di Atterberg (W_L, W_p) e 5 prove edometriche.

Per quanto concerne i campioni degli altri 12 sondaggi, l'utilizzo di queste analisi si è reso indispensabile sia per integrare lo studio della compressibilità e consolidazione che per arricchire con ulteriori campioni le altre analisi sui terreni coesivi. In dettaglio si sono considerate 43 determinazioni del contenuto naturale d'acqua e dei limiti di Atterberg (W_L, W_p) e 14 prove edometriche.

Una ulteriore integrazione di analisi è stata necessaria per generalizzare le caratteristiche del *caranto*; si è utilizzato così il lavoro di GATTO e PREVIADELLO

[op. cit.] che hanno preso in esame alcune centinaia di campioni di questo litotipo.

Data la numerosità complessiva alla fine disponibile e l'importanza che questi parametri rivestono per la caratterizzazione geotecnica dei terreni coesivi, sia presi singolarmente che nelle relazioni I_p e I_c , i dati sono stati elaborati statisticamente. Come già anticipato questo lavoro verrà inquadrato in uno studio molto più ampio che rivestirà anche carattere paleoambientale. Si è quindi cercato di evidenziare analogie o differenze delle proprietà geotecniche nei depositi del tardo-Pleistocene e dell'Olocene mantenendo separati i due pacchetti di campioni benché da un punto di vista puramente geotecnico questa distinzione non sia essenziale. La divisione dei campioni olocenici da quelli pleistocenici si è basata principalmente sul limite definito dal «caranto» e anche sulle analisi paleontologico-ambientali eseguite.

4. ANALISI E DISCUSSIONI DEI DATI

Le analisi e discussioni che seguono sono state riportate separatamente per i terreni coesivi, e quelli granulari dividendo ove possibile i campioni in pleistocenici ed olocenici. Nei campioni coesivi, inoltre, sono stati studiati a parte il *caranto* e il livello di «esondazione». Ove non specificato, le analisi descritte si riferiscono ai campioni di tutti i 30 sondaggi considerati.

PROPRIETÀ INDICI DEI SEDIMENTI COESIVI PLEISTOCENICI

I terreni coesivi Pleistocenici sono costituiti da argille, limi e da termini intermedi, di colore variabile da grigio scuro a chiaro e a volte azzurrognolo.

Sulla carta di Casagrande vengono classificati come argille inorganiche di medio-bassa plasticità (CL) e in misura leggermente minore come limi inorganici di media compressibilità (ML). Rari sono i limi di alta compressibilità nei quali è generalmente presente una frazione organica (Fig. 3).

Il limite liquido varia dal 25 al 54% mentre l'indice plastico dal 6 al 26%. L'indice di consistenza assume valori da bassissimi a 1,58; quindi i terreni si trovano in uno stato da fluido-plastico a semisolido.

La estrema variabilità dell'indice di consistenza trova un riscontro anche con le prove speditive eseguite con il penetrometro e lo scissometro tascabili.

Parallelamente la resistenza al penetrometro tascabile è compresa da 0,1 kg/cm² a oltre 4 kg/cm², che classifica i terreni da molto molli a compattissimi.

Il caranto

Il *caranto* si presenta come un'argilla giallastra a volte biancastra, generalmente molto compatta, con valori di resistenza al penetrometro tascabile maggiori di 1 kg/cm².

I campioni esaminati nell'area litorale hanno le carat-

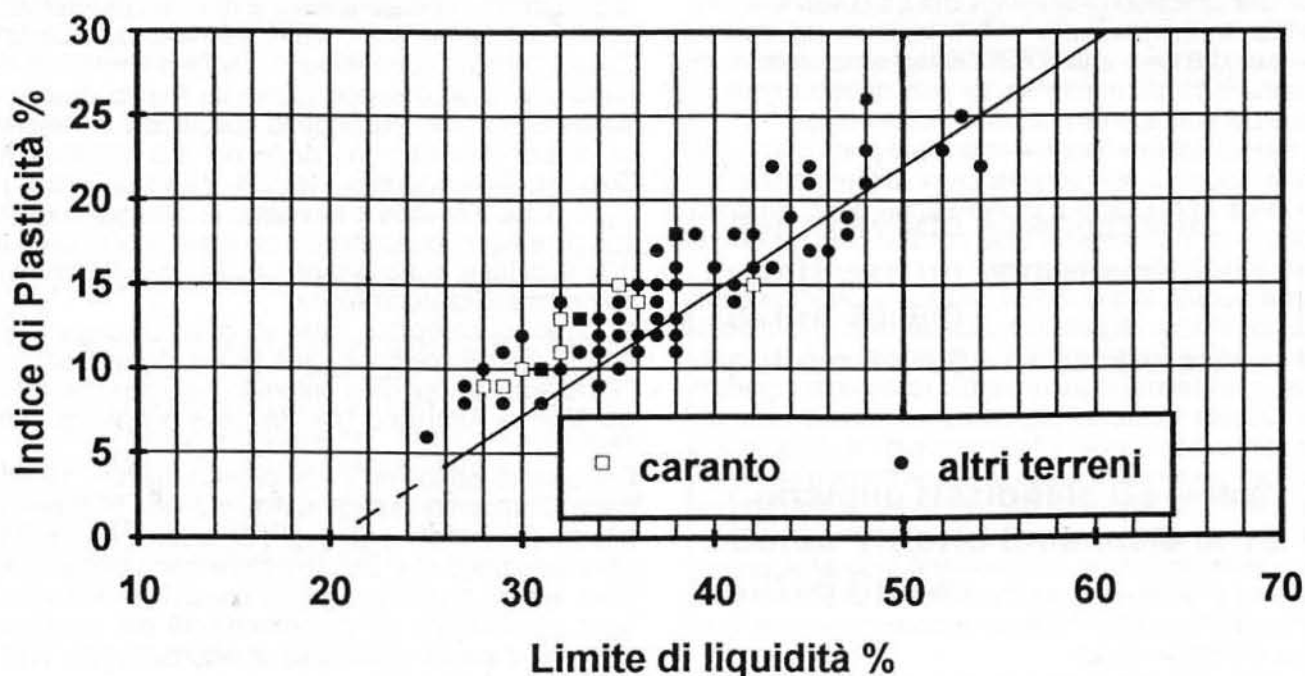


Fig. 3 - Distribuzione dei campioni tardo-pleistocenici sulla carta di Casagrande.

teristiche descritte dai limiti di Atterberg ed i relativi indici che rientrano nei campi di variabilità individuati dai campioni nel comprensorio lagunare (Tab. 1). Va detto che nell'area lagunare più che in quella litorale, la giacitura e lo spessore del *caranto* sono molto variabili per cui le sue caratteristiche si diversificano dal tetto al letto della formazione ed anche arealmente.

Infatti i campioni del comprensorio lagunare presentano mediamente un campo di variabilità delle caratteristiche fisico-meccaniche molto più ampio; è bene precisare però che pur essendo molto dispersi, i valori più frequenti rientrano comunque in intervalli molto più ristretti.

Dall'esame della distribuzione sulla carta di Casagrande, il *caranto* si classifica (Fig. 3) come un'argilla di medio-bassa plasticità (CL).

Per l'importanza cronostratigrafica che questo paleosuolo riveste nell'area veneziana è utile riportare alcune caratteristiche descritte da GATTO e PREVIA-TELLO [op. cit.] benché non analizzate per i campioni litorali e quindi non confrontabili tra loro.

Il fuso granulometrico evidenzia che la frazione argillosa ($\% < 2 \mu$) è compresa tra il 15 e il 48%.

La relazione tra l'indice di plasticità I_p e la frazione argillosa classifica la quasi totalità dei campioni (90%) come argille inattive mentre le rimanenti come argille normali; ciò indica un alto contenuto di Illite e Caolinite che confermerebbe [SKEMPTON, 1953] l'origine continentale del *caranto*. L'indice dei vuoti iniziali, alla pressione effettiva, varia tra 0.455 e 0.760; l'indice di compressibilità (Cc) risulta compreso tra 0,086 e 0,281 e il valore della consistenza relativa I_c varia da 0,6 a 1,2 con massima frequenza tra 0,8 e 1. Dalle prove di compressione semplice è risultato che il *caranto* nell'area lagunare ha una sensibilità piuttosto limitata; infatti, il rapporto tra la resistenza alla compressione con espansione laterale libera di un

campione indisturbato e la resistenza dello stesso rimaneggiato, è mediamente pari a 1,5.

Anche se il *caranto*, come detto sopra, si trova a profondità differenti, e quindi ha subito una diversa compattazione in base al carico litostatico sopportato, sembra che la consolidazione maggiore si sia prodotta in quelle zone ove ha subito una maggiore esposizione, e quindi essiccamento, che sono quelle in cui il piastrone è più superficiale.

Di notevole interesse sono i limiti delle caratteristiche di granulometria e di plasticità entro i quali si sono fatti sentire gli effetti dell'essiccamento stabilito come causa della sovraconsolidazione del *caranto*, che comunque potrebbe non essere l'unica in quanto esistono delle superfici di erosione oloceniche per cui è ipotizzabile anche una sovraconsolidazione per cause meccaniche.

I limiti granulometrici sono quelli dei passanti al vaglio n. 200 maggiore dell'80% e di una frazione argillosa minore del 15%; mentre per le caratteristiche di plasticità i limiti più bassi sono di $W_I = 25\%$ ed $I_p = 9\%$.

Da queste osservazioni si può quindi dedurre che sopra certe dimensioni dei grani o sotto un certo grado di plasticità, l'essiccamento non ha portato alla sovraconsolidazione dei depositi.

PROPRIETÀ INDICI DEI SEDIMENTI COESIVI OLOCENICI

I sedimenti coesivi olocenici sono costituiti da argille, di colore variabile da grigio scuro o chiaro a giallastro, qualche volta verde chiaro, e limi da grigio scuro a grigio chiaro. Frequenti sono i termini intermedi come argille limose e limi argillosi.

I terreni sulla carta di Casagrande si distribuiscono abbastanza uniformemente in tre aree principali caratteristiche delle argille inorganiche di medio-bassa plasticità (CL), dei limi inorganici di medio-bassa compressibilità (ML) e dei limi inorganici di alta compressibilità (MH).

Il limite liquido varia da 25 a 72%, mentre l'indice di plasticità è compreso tra 6 e 36%.

L'indice di consistenza assume valori da bassissimi a 0,96 che sono caratteristici di un terreno con uno stato fisico variabile da fluido a solido-plastico confermato anche dalla resistenza al penetrometro tascabile che è compresa tra 0,4 e 3,7 kg/cm².

Questa variabilità delle caratteristiche geotecniche oltre ad essere dovuta alla diversa giacitura dei sedimenti olocenici che conferisce diverso grado di consolidazione litostatica, è imputabile anche alle differenze del tipo di ambiente di deposizione riscontrato.

Sedimenti della «zona di esondazione»

La «zona di esondazione» è un livello costituito da limi argillosi e argille limose di colore da giallo a grigio, sovente variegato, in cui sono stati trovati spesso de-

Proprietà indici	Campioni area litorale	Campioni area lagunare (1)
W%	11-30	17-30
W _I %	28-30	25-57
W _p %	19-23	16-27
I _p %	9-18	9-31
I _c	0,3-1,7	0,6-1,2

(1) Da GATTO e PREVIA TELLO, 1974.

Tab.1 - Confronto dei valori dei limiti di Atterberg, dell'indice di plasticità, e del contenuto naturale d'acqua tra i campioni dell'area litorale e quelli dell'area lagunare.

gli inclusi nodulari del piastrone continentale, in una struttura caotica tipica degli ambienti ad alta turbolenza. Questo livello abbastanza discontinuo si trova al tetto del *caranto* o a diretto contatto con le argille che chiudono la serie pleistocenica. Per le caratteristiche sedimentologiche e per il contenuto paleontologico è da attribuirsi alla deposizione in ambiente continentale. Il limite liquido varia da 29 a 49%, mentre l'indice plastico è compreso tra 11 e 22% e sulla carta di Casagrande si classificano come argille di medio-bassa plasticità (CL) (Fig. 4).

L'indice di consistenza, che assume valori compresi tra 0,46 e 1,57, è quello riferibile ai terreni dallo stato molle-plastico a semisolido; i valori della resistenza al penetrometro tascabile, variabili da 1,5 kg/cm² a maggiori di 4 kg/cm², classificano i suoli da compatti a compattissimi, in accordo con l'indice di consistenza.

ATTIVITÀ COLLOIDALE

Questo parametro è stato calcolato solo sui campioni del «lito 14» e su quelli dei 12 sondaggi alle bocche, in cui erano note le analisi granulometriche delle argille (Fig. 5).

In generale i campioni esaminati si distribuiscono nel settore delle argille inattive e normali mentre sono presenti in numero più limitato in quello delle argille attive. Senza addentrarsi in considerazioni paleoambientali e deposizionali, sulla base delle conoscenze

note in letteratura [SKEMPTON, 1953], questi risultati starebbero ad indicare che l'Illite e la Caolinite sono i minerali più abbondanti di queste argille con una più scarsa presenza di Montmorillonite.

Con uno studio più dettagliato dell'attività colloidale si potrebbero evidenziare differenze nella distribuzione areale e deposizionale che fornirebbero un utile contributo interpretativo alla ricostruzione paleoambientale.

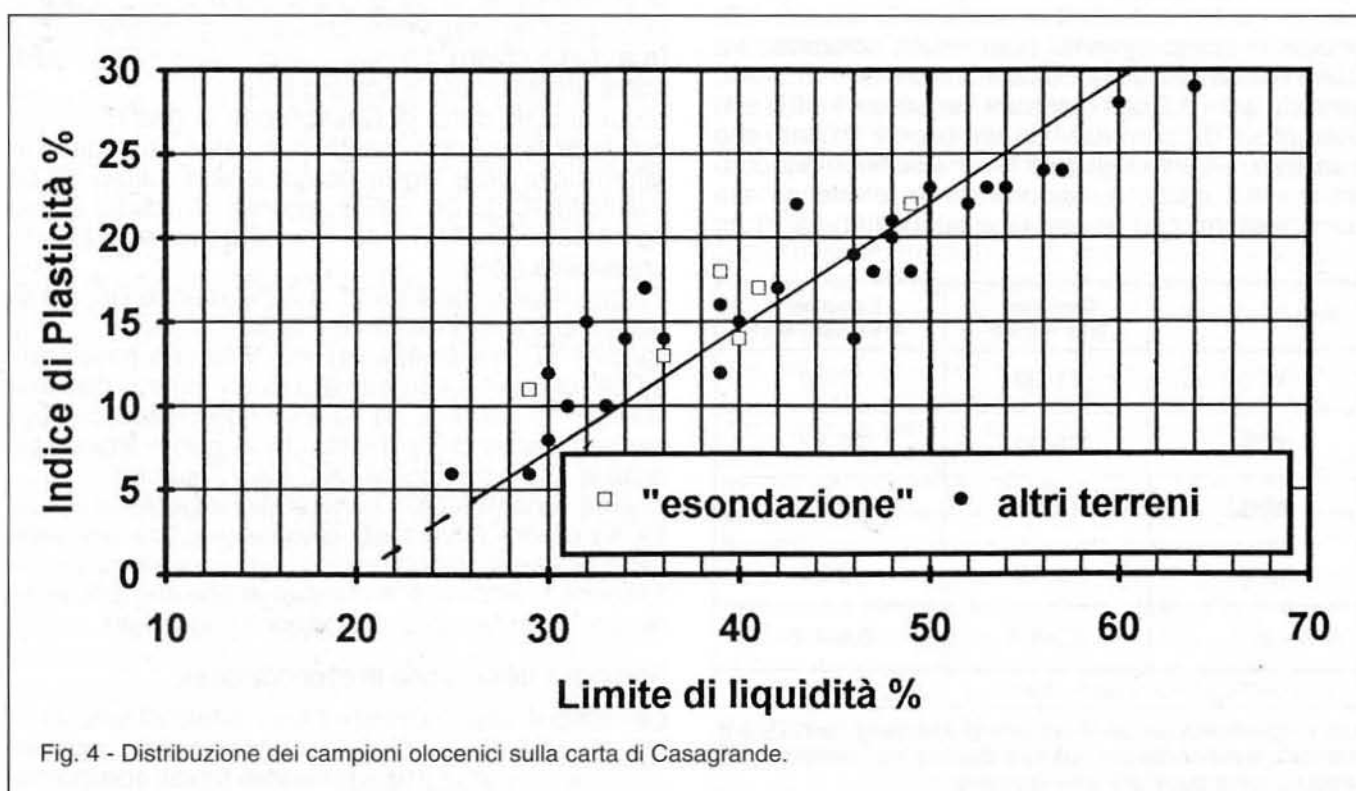
PROVE EDOMETRICHE

Per lo studio della compressibilità e della consolidazione sono state utilizzate 19 analisi eseguite sui campioni del «lito14» e su quelli dei sondaggi alle bocche. Dai risultati delle prove si può trarre una interpretazione di massima di queste proprietà, ma la ridotta numerosità delle stesse non permette di caratterizzare il comportamento meccanico di tutto il sottosuolo litoraneo. Come si vedrà di seguito i risultati di queste prove sono comunque stati di grande utilità per il calcolo delle equazioni di correlazione con i limiti di Atterberg, l'indice dei vuoti ed il contenuto naturale d'acqua. I campi di variazione dei parametri determinati sono:

$C_c = 0,13-0,64$ (maggior frequenza 0,13-0,23)

$C_v = 0,005-0,0006$ (maggior frequenza 0,002-0,004 (cm²/sec.))

Med. = 1000-8500 (kPa)



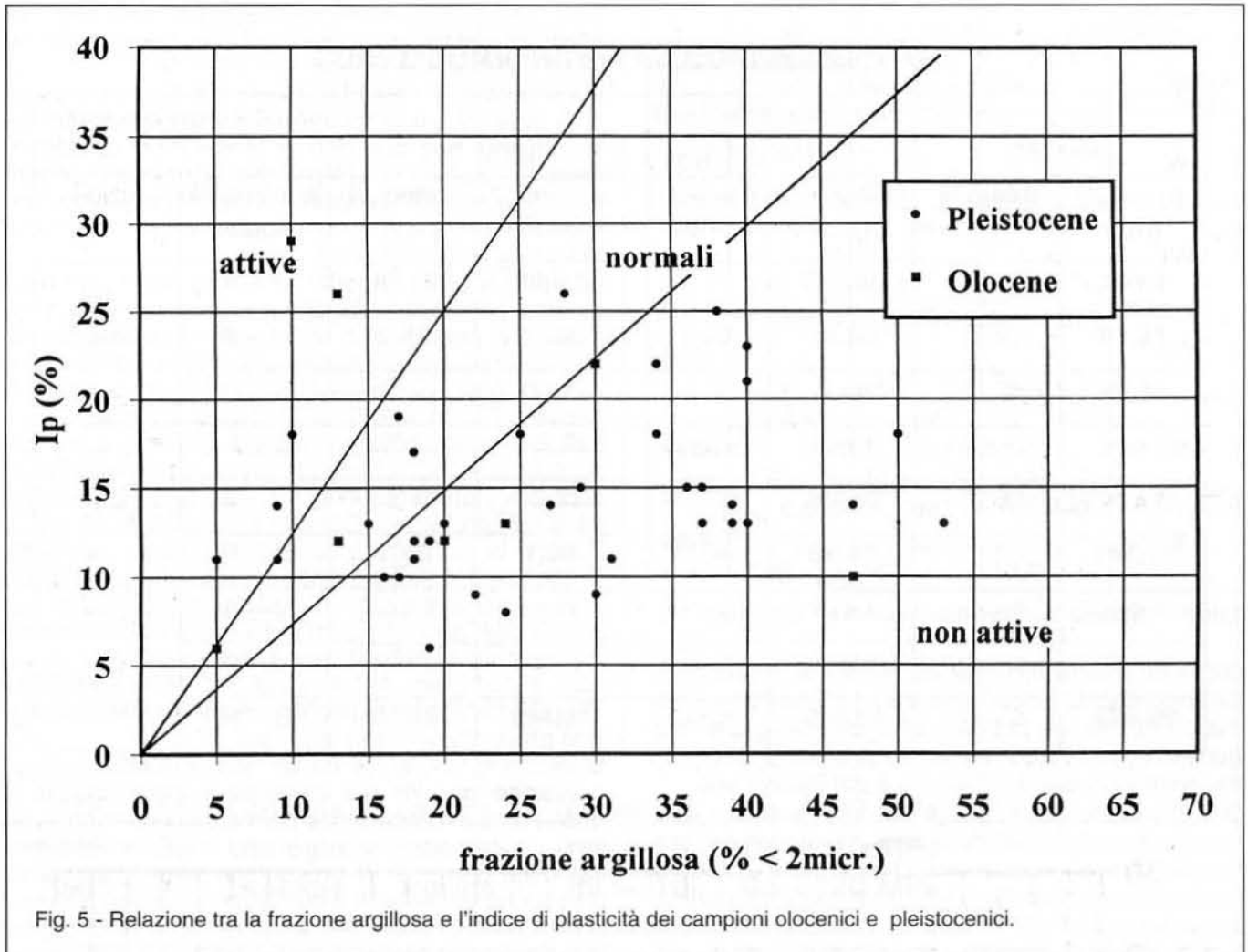


Fig. 5 - Relazione tra la frazione argillosa e l'indice di plasticità dei campioni olocenici e pleistocenici.

Dal confronto con le pressioni effettive attualmente agenti nel punto di prelievo del campione e la pressione di consolidazione determinata con la prova edometrica, oltre al *caranto* non sembra ci sia l'evidenza che altri livelli di argille possano presentare un elevato grado di sovraconsolidazione.

È stata comunque osservata una leggera sovraconsolidazione in altri livelli, ma l'incertezza della determinazione del punto di massima curvatura non rende attendibile il calcolo della pressione di consolidazione.

ANALISI STATISTICA

Come accennato in precedenza, i dati pertinenti ai limiti di Atterberg e relativi indici, sia per la numerosità campionaria disponibile che per il loro significato nella classificazione geotecnica dei suoli, sono stati oggetto di particolari elaborazioni statistiche.

Il primo passo è stato quello di fare un riassunto sta-

tistico delle variabili, come riportato in tabella 2. È immediato osservare come i dati siano alquanto dispersi attorno alle rispettive medie ad eccezione di W_p che, con coefficiente di variazione del 14% in Pleistocene e del 19% in Olocene ha valori più concentrati attorno alla media. Viceversa I_c presenta enormi dispersioni fornendo un coefficiente di variazione in Olocene superiore al 250% risultando così sicuramente instabile e poco rappresentativo; questo è in accordo con quanto scritto nelle pagine precedenti e può dipendere dai valori di W , variabili per diverse cause.

In generale i valori medi di ogni singola variabile presentano una sensibile differenza nei due periodi; per valutarne la significatività si è calcolato il test «t di Student», idoneo a questo tipo di indagine.

Dai risultati ottenuti (Tab. 2) si può affermare, con elevata probabilità di precisione (livelli di significatività < 2%), che la differenza tra i valori medi dei due periodi analizzati è ragionevolmente troppo elevata

Variabili e indici	Parametri statistici	$\hat{\mu}(o)$	$\hat{\sigma}(o)$	Cv Coefficiente di variazione (%)	t di Student
		$\hat{\mu}(p)$	$\hat{\sigma}(p)$		
W		37,22	8,33	23,7	6,33
		28,23	5,33	18,5	
WI		43,75	11,34	25,9	2,97
		38,23	7,14	18,6	
Wp		26,31	5,03	19,1	3,19
		23,57	3,42	14,5	
Ip		17,43	7,06	40,5	2,34
		14,65	4,71	32,1	
Ic		0,26	0,66	253,8	4,66
		0,51	0,34	66,7	

Tab. 2 - Riassunto statistico delle variabili e t di Student.

per poter essere attribuita ad effetti casuali (errori di campionamento e di analisi), ma va intesa come sistematica (differenze deposizionali, mineralogiche, diagenetiche, ecc.) a conferma di una effettiva differenza tra i terreni coesivi dell'Olocene e del Pleistocene.

Si è effettuata quindi l'analisi discriminante per valutare il potere selettivo delle singole variabili nell'ambito dei due raggruppamenti cronologici e il grado di nitidezza dei singoli campioni (matrice di riclassificazione dei dati). La sintesi dei risultati ottenuti è riportata in tabella 3 ottenuta riclassificando tutti gli elementi campionari in base alle soglie discriminanti.

In questo modo si ottiene la matrice di riclassificazione nella quale gli elementi diagonali rappresentano le percentuali di corretta riclassificazione (O→O e P→P) mentre gli elementi non diagonali rappresentano le percentuali di errata classificazione (O→P e

Prop. indici Potere discrim.	W (%)	WI (%)	Wp (%)	W (%) WI (%) Wp (%)	Ip (%)	Ic
	O → O (%) O → P	69	56	59	75	56
	31	44	41	25	44	47
P → P (%) P → O	77	68	64	77	69	72
	23	32	36	23	31	28

Tab. 3 - Sintesi dell'analisi discriminante. I risultati del Pleistocene apparentemente più «corretti» sono pro parte ascrivibili alla più elevata numerosità campionaria (NO = 32, NP = 69).

P→O) e possono essere assunte quali indicatori del grado di «sovrapposizione» dei due campioni olocenici e pleistocenici in esame.

In particolare si nota che a nessuna delle tre variabili W, WI e Wp, è associato un prevalente potere discriminante tra i due periodi (errori medi di classificazione superiori al 30%) mentre la precisione discriminativa aumenta a valori di riclassificazione corretti per circa il 75% se le tre variabili vengono considerate congiuntamente (col. 4).

Gli indici Ip e Ic, importanti nel loro significato geotecnico, non sono sufficientemente idonei a discriminare i due periodi, anzi presentano un potere selettivo inferiore a quello relativo alle singole variabili che li compongono e quindi, per questo tipo di discriminazione, hanno un debole contenuto informativo.

Inoltre essendo note le proprietà indici dei campioni sui quali sono state eseguite le prove edometriche, si sono calcolate le regressioni lineari semplici dell'indice di compressione (Cc) con le variabili WI, W e e_0 .

Benché la numerosità campionaria non ci permetta di ottenere risultati con l'attendibilità che si vorrebbe avere, né ci autorizza a formulare considerazioni generalizzate, abbiamo comunque operato un confronto con i risultati delle stesse elaborazioni svolte da diversi autori (Tab. 4) fra i quali RICCERI e PREVIA-TELLO [1972] che hanno esaminato argille di analoghe proprietà nell'area lagunare.

Si può notare che, se da un lato la relazione di regressione con WI qui calcolata è paragonabile a quella data in precedenza per l'area veneziana, è altresì confortante osservare che anche le relazioni calcolate con e_0 e W presentano valori parametrici pressoché equivalenti a quelli riportati in letteratura.

D'altra parte, a conferma di ciò vediamo (Tab. 5) che la correlazione esistente tra Cc ed e_0 ($r = 0,98$) è decisamente più elevata rispetto a quella tra Cc e WI ($r = 0,48$), come peraltro affermato da A. AZZUZ et al. [1976], indicando quindi una maggiore attendibilità nella relazione della regressione con l'indice dei vuoti iniziale. Inoltre è doveroso osservare che anche W presenta una forte relazione funzionale con Cc ($r = 0,97$), migliore rispetto a quella con WI. Questo ci suggerisce una maggior attenzione su W e e_0 quando i parametri geotecnici vengono stimati da relazioni empiriche. Bisogna però osservare che per calcolare e_0 necessitano campioni indisturbati, mentre WI può essere determinato su campioni rimaneggiati.

I TERRENI GRANULARI

La determinazione della granulometria, e della permeabilità, sono il primo approccio per la valutazione dei possibili fenomeni di filtrazione e sifonamento che possono interessare la coltre più superficiale di sedimenti incoerenti costituenti il cordone litorale veneziano, possibilità già notata con un'indagine preliminare da GATTO [1980b].

Relazioni calcolate*	Relazioni proposte	Tipi di materiale
Cc = 0,0088 (WI-10,2)	Cc = 0,007 (WI-7) da Skempton (1944)	Argille rimaneggiate
	Cc = 0,007 (WI-5,3) da Ricceri e Previatello (1972)	Argille della Laguna veneta
	Cc = 0,009 (WI-10) da Terzaghi e Peck (1967)	Argille mobili
Cc = 0,011 (W-12,3)	Cc = 0,01 (W-5) da Azzuz et al. (1976)	700 argille inorganiche
Cc = 0,36 (e ₀ -0,29)	Cc = 0,75 (e ₀ -0,50) da Sowers (1970)	Argille di bassa plasticità
	Cc = 0,40 (e ₀ -0,25) da Azzuz et al. (1976)	700 argille inorganiche

* Le argille qui analizzate sono classificate come (argille) inorganiche di medio-bassa plasticità, da molto molli a compatte di deposizione continentale e marino-lagunare.

Tab. 4 - Correlazione tra diverse proprietà indici e l'indice di compressione.

	W	WI	Wp	e ₀	M	Cc
W	1,0000	0,5880	0,7632	0,9912	-0,4625	0,9756
WI	0,5880	1,0000	0,8455	0,5378	0,0988	0,4823
Wp	0,7632	0,8455	1,0000	0,7200	-0,1551	0,6675
e ₀	0,9912	0,5378	0,7200	1,0000	-0,4811	0,9845
M	-0,4625	0,0988	-0,1551	-0,4811	1,0000	-0,4592
Cc	0,9756	0,4823	0,6675	0,9845	-0,4592	1,0000

Tab. 5 - Matrice di correlazione lineare tra i due diversi parametri.

Tali fenomeni possono essere accentuati in presenza di strutture anomale sepolte, come paleoalvei, in cui vengono a contatto litotipi con caratteristiche idrauliche differenti; in particolare i paleoalvei sono riempiti con sabbie grossolane ricche di frammenti di conchiglie ad elevata permeabilità. La presenza di queste strutture è stata evidenziata da indagini microsmiche ad altissima risoluzione (UNIBOOM) [STEFANON, 1987].

Anche lo studio dei terreni granulari è stato programmato per approfondire sia l'aspetto idrogeologico (granulometria e permeabilità) che quello mineralogico-sedimentologico. Quest'ultimo, qui non trattato, è finalizzato alla determinazione dei bacini di provenienza dei sedimenti e aiuterà a tracciare il limite Pleistocene-Olocene in quelle situazioni stratigrafiche non definite dove il *caranto* è stato eroso o non si è formato, contribuendo così alla ricostruzione paleogeografica della laguna veneta.

Considerando sia la necessità di eseguire lo studio mineralogico su differenti frazioni granulometriche del campione (caratteristiche delle dimensioni medie dei vari minerali utilizzati come indicatori dei bacini di provenienza) che quella di utilizzare per le analisi

mineralogiche gli stessi grani di sedimento dei quali precedentemente si erano misurate le dimensioni, sono stati adottati dei limiti granulometrici di classe comuni per entrambe le analisi:

Argilla < 0,0039 mm;

Limo 0,0039-0,062 mm;

Sabbia fine 0,062-0,5 mm;

Sabbia medio-grossa > 0,5 mm.

Le sabbie continentali tardo-pleistoceniche in esame sono generalmente di colore giallo più o meno scuro e a volte grigio, spesso limose dal classico aspetto «sporco», intercalate da frequenti livelletti di limo con laminazioni torbose e carboniose.

Quelle trasgressive oloceniche, invece, di deposizione lagunare-litoranea, sono tendenti al grigio e spesso molto fossilifere.

Da uno studio mineralogico di dettaglio [BONARDI e TOSI, 1994] eseguito con una nuova metodologia non distruttiva che utilizza la microsonda elettronica (EMP) equipaggiata con EDS (Energy Dispersion Spectrometer), WDS (Wavelength Dispersion Spectrometer) e BSE (Backscattered Electron Detector) [BONARDI et al., 1992], è emerso che le sabbie pleistoceniche sono prevalentemente silicatiche mentre sono più carbonatiche quelle di deposizione olocenica e che le percentuali della composizione mineralogica (Calcite, Dolomite, Quarzo, Feldspati, Miche, Clorite ecc.) discriminano molto bene questi due periodi.

Le considerazioni che seguono derivano dalle 157 analisi granulometriche e 181 prove di permeabilità effettuate sui campioni dei sondaggi «lito».

Analisi granulometrica meccanica

Complessivamente le sabbie oloceniche di deposizione prevalentemente marina e lagunare presentano un fuso granulometrico più ampio di quelle tardo-pleistoceniche continentali. In particolare la frazione maggiore di 0,5 mm rappresenta fino al 35% del totale nelle prime, mentre nelle sabbie tardo-pleistoce-

niche raramente supera il 2%. Le distribuzioni della frazione di sabbia fine e di quella limoso-argillosa invece sono abbastanza simili nella deposizione olocenica ed in quella tardo-pleistocenica; per entrambe i valori sono molto variabili con punte del 95-98% per la sabbia fine e del 15% per la limoso-argillosa. Confrontando gli inviluppi granulometrici ed i campi di variazione delle percentuali appartenenti alle rispettive frazioni sono stati osservati dei raggruppamenti granulometrici zionali non coincidenti con l'attuale configurazione dei quattro settori litoranei (Tab. 6).

La spiegazione della diversità granulometrica è da ricercarsi nei fenomeni di dinamica costiera, agli ambienti di deposizione e ai differenti bacini di provenienza dei sedimenti. La zona più meridionale, tra la foce del Brenta e la bocca di Chioggia (settore di Sottomarina, 1), è abbastanza simile a quella più settentrionale tra la foce del Sile e la bocca di Lido (settore di Cavallino, 5) a conferma dell'influenza di una vicina foce fluviale. Le sabbie sono in prevalenza fini con la frazione limoso-argillosa raramente maggiore del 30-40%. Il tratto intermedio del cordone di Pellestrina (settore 2) è caratterizzato da sabbie fini limose intercalate da limi sabbiosi. Come si può vedere in tabella 6 i campi di variazione delle percentuali della frazione limoso-argillosa e quella della sabbia fine sono molto ampi e pressoché simili. Le sabbie del

tratto litoraneo compreso tra la zona di Portosecco attraverso la bocca di Malamocco fino a metà del litorale di Lido (settore 3), hanno una frazione medio-grossa molto variabile che raggiunge il 30%, la più elevata dei campioni studiati del litorale veneziano, mentre quella limosa ha delle punte del 90%. È da notare che in questa zona il limite Pleistocene-Olocene è marcato da una superficie erosiva ed inoltre è stato rinvenuto un paleoalveo proprio in corrispondenza del «lito 6» a Portosecco; il riempimento di queste paleostrutture sicuramente ha contribuito all'incremento medio della frazione grossolana. L'area immediatamente a sud della bocca di Lido e quella lagunare più prossima, Sant'Andrea (settore 4), sono caratterizzate da sabbie con valori massimi della frazione fine dell'80%, da valori della frazione limosa e argillosa elevate, rispettivamente con punte dell'85% e del 15% e da quella grossolana del 5%. La maggior presenza di argilla nelle sabbie in questo caso è da attribuirsi ai tipi di ambiente di deposizione dei sedimenti che sono principalmente continentali e lagunari.

Prove di permeabilità

Le prove di permeabilità sono state eseguite con un permeametro a carico variabile orientando opportunamente i provini dei campioni per la determinazione del coefficiente di permeabilità orizzontale.

Settori		% argilla	% limo	% sabbia fine	% sabbia medio-grossa
1	min.	0	0,6	60	0
	max.	0	40	99,2	4
	med.	0	7,8	91,4	0,7
2	min.	0	1,2	2,2	0
	max.	12	97,8	98,7	4,8
	med.	0,24	25	74,15	0,38
3	min.	0	0,6	4	0
	max.	3	94,2	99,3	30
	med.	0,18	14,9	83,3	1,6
4	min.	0	0,6	15	0
	max.	14	85	99,1	12
	med.	1,97	28	68,3	1,6
5	min.	0	0,3	72	0
	max.	0	28	99,5	6,6
	med.	0	6,8	92,3	0,84

Tab. 6 - Variazioni delle percentuali granulometriche per i cinque settori litoranei: 1, Sottomarina; 2, Pellestrina; 3, Malamocco; 4, Lido-Sant'Andrea; 5, Cavallino. I valori delle percentuali medie si riferiscono al totale dei campioni.

Dall'esame generale delle 181 prove effettuate, si può constatare che esistono due province con caratteristiche di permeabilità abbastanza diverse: la provincia meridionale, caratterizzata da coefficienti di permeabilità variabili da 10^{-4} e 10^{-6} m/sec., e la provincia settentrionale con valori da 10^{-5} a 10^{-7} m/sec. (Fig. 6).

Si è inoltre evidenziato, e si può osservare anche dalla figura, che la permeabilità diminuisce all'aumentare della profondità con diverso gradiente.

A sud l'andamento del coefficiente di permeabilità è più delineato e le variazioni tra le permeabilità dei terreni superficiali e di quelli profondi sono mediamente più marcate, mentre nel settore nord, pur mantenendosi una certa differenza, le variazioni sono minori.

Come già rimarcato da GATTO [1980a] per i primi 5 metri di profondità, anche nell'intervallo da 5-10 metri dal livello medio mare, la permeabilità media della prevalente frazione sabbiosa non è idonea a garantire una perfetta tenuta idraulica delle strutture litoranee permettendo pericolosi processi di filtrazione e di sifonamento.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

A conclusione di questa analisi sulle caratteristiche geotecniche del sottosuolo del litorale veneziano, si evidenziano i seguenti punti essenziali.

I terreni coesivi tardo-pleistocenici sono costituiti da limi, argille e dai loro termini intermedi con colore variabile da grigio chiaro a scuro, a volte azzurrognolo. Pur essendo generalmente compatti, con valori massimi dell'indice di consistenza di 1,58, possono presentare dei livelli locali di argille più o meno limose sottoconsolidate e argille torbose e torbe a bassissima consistenza. Sulla «carta di Casagrande» si classificano come argille inorganiche di medio-bassa plasticità (CL) e in misura leggermente minore limi inorganici di media compressibilità (ML), mentre i limi di alta compressibilità, generalmente sottoconsolidati o con una frazione organica abbondante, sono abbastanza rari.

Il *caranto*, che chiude la serie tardo-pleistocenica, quindi sempre di ambiente continentale, presenta caratteristiche particolari che lo differenziano dai precedenti.

Si tratta di un paleosuolo sovraconsolidato presente nell'area litorale, soprattutto nella zona centro meridionale (ma molto ben sviluppato all'interno dell'area lagunare), le cui caratteristiche di consistenza, compressibilità e consolidazione variano in funzione del grado di essiccamento raggiunto durante l'acme glaciale.

Le sue caratteristiche fisico-meccaniche dipendono quindi sia dalle proprietà intrinseche del terreno (plasticità, liquidità e granulometria) che dalla giacitura. Infatti in zone retrostanti l'attuale litorale, o in quelle

morfologicamente più elevate durante il Tardo Pleistocene, l'esposizione subaerea è sicuramente stata più prolungata conferendo un maggior grado di sovraconsolidazione alle argille.

Inoltre non bisogna dimenticare che parte del tetto di questo litotipo può essere stata asportata per erosione durante la fase trasgressiva olocenica e che quindi le proprietà geotecniche del *caranto* presentano anche delle variazioni verticali (dal letto al tetto) oltre alle già citate differenze zonali.

Generalmente il *caranto* presenta una colorazione biancastro-giallastra con caratteristiche di plasticità e compattezza che competono alle argille di medio-bassa plasticità (CL) da mediamente compatte a molto compatte con valori dell'indice di consistenza variabili da 0,3 a 1,7.

I terreni coesivi olocenici, di deposizione principalmente marino-lagunare, sono costituiti da limi, argille e termini intermedi, di colore molto variabile, dal grigio al giallo al verde e talora azzurro.

Complessivamente si differenziano dai sottostanti pleistocenici in quanto presentano una maggiore variabilità delle caratteristiche fisico-meccaniche ed in particolare una maggior compressibilità. Sono da poco a molto compatti con indice di consistenza che assume valori da bassissimi, tipici di uno stato fisico fluente, a elevati (fino a 0,96), caratteristici dello stato semisolido.

Quest'ampia variabilità è da imputarsi sia al diverso grado di consolidazione raggiunto, che al diverso tipo di ambiente deposizionale (marino, lagunare e continentale).

Sulla carta di Casagrande si distribuiscono abbastanza uniformemente nelle tre aree caratteristiche di argille inorganiche di medio-bassa plasticità (CL), limi inorganici di medio-bassa compressibilità (ML) e limi inorganici di alta compressibilità (MH).

La «zona di esondazione», livello di suoli continentali che talora apre la serie olocenica, è abbastanza discontinua ed è stato rinvenuto principalmente nel settore centro-meridionale.

Questo livello si trova al tetto del *caranto* o a diretto contatto con le argille che chiudono la serie pleistocenica e per modalità di deposizione presenta caratteri continentali.

La «zona di esondazione» è caratterizzata da sedimenti costituiti da limi argillosi e argille limose di colore variabile da giallo a grigio e sovente variegato, da poco a molto compatti ($0,46 < I_c < 1,57$) e classificati come argille di medio-bassa plasticità (CL).

In questo livello sono stati trovati spesso degli inclusi nodulari del piastrone continentale, in una struttura caotica tipica degli ambienti ad alta turbolenza.

L'elaborazione quantitativa dei dati ha permesso di trarre anche alcune informazioni di interesse sui parametri esaminati. L'analisi delle singole variabili ha evidenziato una sensibile differenza nei valori medi in

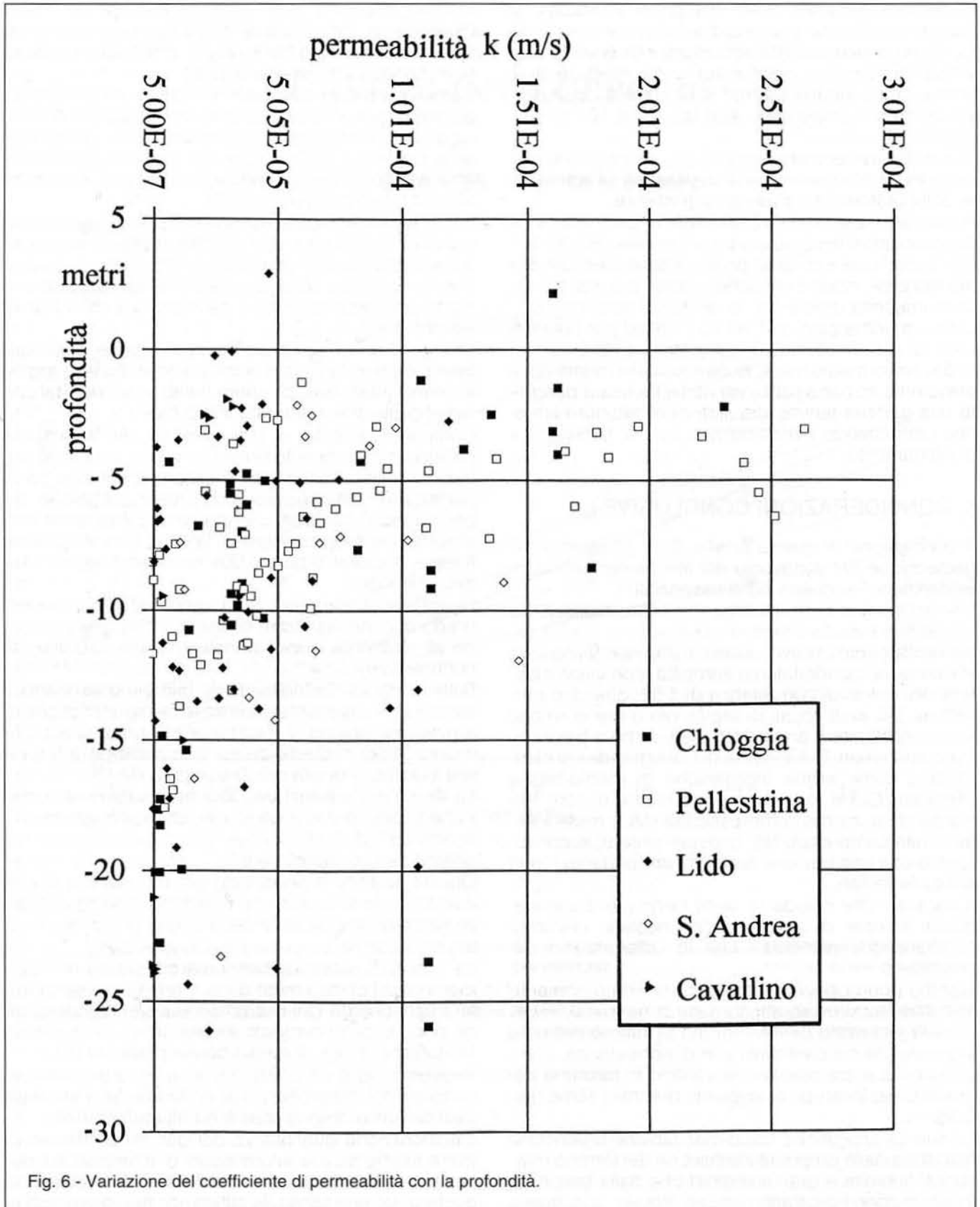


Fig. 6 - Variazione del coefficiente di permeabilità con la profondità.

Olocene e Pleistocene. Per valutarne la significatività si è calcolato il test «t di Student».

Dai risultati ottenuti si può affermare, con buon grado di certezza, che la differenza tra i valori medi dei due periodi analizzati non può essere attribuita al caso, ma va intesa come sistematica, a conferma che esiste una differenza reale tra i terreni coesivi dell'Olocene e del Pleistocene.

Con l'analisi discriminante si è visto che a nessuna delle tre variabili W , Wl e Wp è associato un prevalente potere discriminante tra i due periodi (errori medi di classificazione superiori al 30%) mentre la precisione discriminatoria aumenta a valori di riclassificazione corretti per circa il 75% se le tre variabili vengono considerate congiuntamente. Inoltre gli indici I_p e I_c , importanti nel loro significato geotecnico, non sono sufficientemente idonei a discriminare i due periodi, anzi presentano un potere selettivo inferiore a quello relativo alle singole variabili che li compongono, e quindi per questo tipo di discriminazione hanno un debole contenuto informativo.

Per quanto riguarda l'attività e la compressibilità edometrica, non è stato possibile studiare separatamente i due complessi deposizionali data la scarsità campionaria, soprattutto per l'Olocene.

Per l'attività si è comunque tentato un confronto dal quale non sono emerse significative differenze per i due periodi. Complessivamente le argille sono prevalentemente inattive e normali, mentre quelle attive sono presenti in un numero più limitato.

Dai risultati delle prove edometriche si è visto che l'indice di compressibilità e il coefficiente di consolidazione, pur essendo molto variabili ($0,13 < C_c < 0,64$) e ($0,005 < c_v < 0,0006$), assumono più frequentemente valori nell'intervallo $0,13-0,23$ e $0,002-0,004$ ($\text{cm}^2/\text{sec.}$), mentre il modulo edometrico (Med), che varia da 1000 a 8500 (kPa), è generalmente ben correlato con la profondità.

Poiché di questi campioni erano note le proprietà indici, si sono calcolate le regressioni lineari semplici dell'indice di compressione (C_c) con le variabili Wl , W e e_0 . Ne è emerso che, se da un lato la relazione di regressione con Wl calcolata per il settore litorale è paragonabile a quella data in precedenza per l'area veneziana, anche le relazioni calcolate con e_0 e W presentano valori parametrici pressoché equivalenti a quelli riportati in letteratura. A conferma di ciò si è visto che la correlazione tra C_c ed e_0 ($r = 0,98$) e C_c e W ($r = 0,97$) è decisamente più elevata rispetto a quella tra C_c e Wl ($r = 0,48$).

Questo ci suggerisce una maggior attenzione, ove possibile, su W ed e_0 , quando i parametri geotecnici vengono stimati da relazioni empiriche, anche se la determinazione di Wl è possibile su campioni rimaneggiati. Una maggior affidabilità nella relazione tra C_c e W o e_0 evidenzia il legame tra C_c e la storia tensionale subita dal deposito.

Alcune prove edometriche condotte su campioni sottostanti il *caranto* provenienti dal sondaggio all'isola di Sant'Andrea («lito 14»), hanno fornito valori indicativi di argille leggermente sovraconsolidate. Benché questo potrebbe essere importante per una interpretazione geologica, visti gli andamenti delle curve di compressione non si è potuto separare l'effetto del campionamento da quello naturale. Analoghe considerazioni per una prova relativa ad un sondaggio poco a nord della bocca di Malamocco.

Per quanto riguarda lo studio dei depositi granulari, si è visto che complessivamente le sabbie marino-lagunari oloceniche presentano un fuso granulometrico più ampio di quelle continentali tardo-pleistoceniche. In particolare la frazione maggiore di 0,5 mm rappresenta fino al 35% del totale nelle prime, mentre nelle sabbie tardo-pleistoceniche raramente supera il 2% e le frazioni di sabbia fine e limoso-argillosa non sono diverse nell'Olocene e nel tardo-Pleistocene; per entrambe sono molto variabili con valori fino al 95-98% per la sabbia fine e fino al 15% per quella limoso-argillosa.

Si sono individuate differenze zonali (non coincidenti con l'attuale configurazione dei quattro settori litoranei) della distribuzione granulometrica, evidenziando processi comuni nelle due aree limite della laguna dove la frazione fine più scarsa testimonia un ambiente più dinamico (influenze fluviali) e arrivando progressivamente alla parte più centrale del cordone litoraneo dove l'ambiente prevalente lagunare ha viceversa permesso una consistente deposizione di materiale più fine anche se l'azione del mare è testimoniata dalla presenza di materiale più grossolano. Sono state evidenziate caratteristiche idrogeologiche diverse per i settori sud e nord; i valori del coefficiente di permeabilità presentano marcate differenze tra i terreni superficiali (0-8 metri sotto il livello medio del mare) e quelli profondi nella provincia meridionale, mentre nella provincia settentrionale le variazioni sono minori.

Inoltre la permeabilità è quasi sempre più elevata a sud dove il coefficiente raggiunge valori di 10^{-4} m/sec. a differenza dell'area settentrionale dove i valori sono compresi tra 10^{-5} e 10^{-7} m/sec.

La tenuta idraulica dei cordoni litorali in caso di realizzazione delle opere alle bocche di porto appare insufficiente per i primi 5 metri di profondità dal livello medio mare, esistendo il rischio di pericolosi processi di filtrazione e di sifonamento, soprattutto in quelle zone ove il cordone litoraneo è particolarmente sottile.

Con i valori di permeabilità in gioco questi fenomeni potrebbero estendersi fino a -10 metri dal l.m.m. soprattutto nelle aree sud e nord dove le formazioni sabbiose oloceniche sono più potenti e più grossolane. Nel settore centrale, malgrado la granulometria più fine, questo rischio potrebbe non essere trascurabile a causa della presenza di paleoalvei che,

riempiti di materiale altamente permeabile, incidono il substrato continentale limo-argilloso qui più superficiale.

In conclusione si può affermare che il cordone litoraneo veneziano, struttura di fondamentale importanza per la sopravvivenza della laguna, della città e delle isole, presenta un'estrema variabilità di valori nelle caratteristiche fisico-meccaniche del sottosuolo. L'area corrispondente a questa struttura necessita quindi di un continuo monitoraggio idrogeologico ed altimetrico, in particolare durante e dopo l'esecuzione di opere, e di una zonazione dei vari settori litoranei in base alle varie tipologie di rischio ambientale.

RINGRAZIAMENTI

Un particolare ringraziamento alla Dott.ssa Laura Carboognin ed al Dott. Giancarlo Taroni per le elaborazioni statistiche e la lettura critica del testo. Desidero ringraziare inoltre il Prof. Paolo Previatello per i preziosi suggerimenti offerti.

BIBLIOGRAFIA

- AZZUZ A. S., KRIZEK R. J. e KOROTIS R. B. (1976): *Regression Analysis of Soil Compressibility, Soils and Foundations*. Vol. 16, No 2.
- BJERRUM L. (1967): *Engineering geology of normally consolidated marine clays as related to the settlement of buildings*. Geotechnique, vol. 18, pp. 83-118.
- BJERRUM L., LO K.Y. (1963): *Effect of aging on the shear-strength properties of a normally consolidated clay*. Geotechnique, vol. 13, No. 1, pp. 1-20.
- BONARDI M., CARBOGNIN L. (1992): *Late quaternary sediments differentiation and characterization by EMPA-EDS mineral assemblage study*. Electron Microscopy 92, Proc. of the 10th EUREM 92, vol. 2, p. 603, Granada.
- BONARDI M., SOCCORSO C., ALDIGHIERI F. (1992): *A new approach to the study of the sediments of the Lagoon of Venice (Italy)*. Marine Geoscience, vol. 4, No 1, p. 36-39.
- BONARDI M., TOSI L. (1994): *I sedimenti tardo-quadernari del cordone litoraneo della laguna di Venezia: le sabbie*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 184, Venezia.
- BORTOLAMI G., CARBOGNIN L., GATTO P. (1984): *The natural subsidence in the Lagoon of Venice, Italy*. Land Subsidence, IAHS Publ. no 151, p. 777-785.
- FONTES J. CH., BORTOLAMI G. (1972): *Subsidence of the area of Venice during the past 40.000 years*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 54, Venezia.
- GATTO P. (1980a): *Il sottosuolo del litorale veneziano*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 108, Venezia.
- GATTO P. (1980b): *I processi costieri nel tratto antistante il litorale di Venezia*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 109, Venezia.
- GATTO P. (1984): *Il cordone litoraneo della laguna di Venezia e le cause del suo degrado*. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti. Rapporti e Studi, Vol. IX, pp. 163-193, Venezia.
- GATTO P., CARBOGNIN L. (1981): *The Lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification*. Hydr. Sc. Bull., 26 (4): 370-391.
- GATTO P., PREVIATELLO P. (1974): *Significato stratigrafico, comportamento meccanico e distribuzione nella laguna di Venezia di un'argilla sovraconsolidata nota come 'caranto'*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 70, Venezia.
- GATTO P., PREVIATELLO P., CARBOGNIN L., MOZZI G. (1976): *Note illustrative sul sottosuolo delle bocche della laguna di Venezia*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 67, Venezia.
- RICCERI G., PREVIATELLO P. (1972): *Caratteristiche geotecniche del sottosuolo della laguna veneta*. Atti Accademia Patavina di Scienze, Lettere ed Arti, Vol. LXXXIV, 1971-72.
- SKEMPTON A.W. (1944): *Notes on the compressibility of clays*. Q. J. Geol. Soc. London, 100, pp. 119-135.
- SKEMPTON A.W. (1953): *The colloidal 'Activity' of clays*. 3rd Int. Conf. on Soil Mechanics and Found. Eng., Vol. 1, pp. 57-61, Switzerland.
- SKEMPTON A.W., NORTHY R.D. (1952): *The sensitivity of clays*. Geotechnique, Vol. 3, No. 1, pp. 49-69.
- SOWERS G. B. (1970): *Introductory Soils Mechanics and Foundations*. The Macmillian Company.
- STEFANON A. (1987): *Aspetti geologici poco noti, ma determinanti, nella problematica veneziana*. Atti del VI Congresso Nazionale dell'Ordine dei Geologi, pp. 257-263, Venezia.
- TERZAGHI K., PECK R.B. (1967): *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- TOSI L. (1993): *Caratteristiche geotecniche del sottosuolo del litorale veneziano*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 171, Venezia.
- TOSI L. (1994): *Rapporto e prime interpretazioni sulle analisi paleontologiche condotte su campioni tardo-quadernari del sottosuolo del litorale veneziano*. C.N.R., Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Techn. Rep. 182, Venezia.