



**GARASSINO** s.p.a.

Via Curtatone, 25  
20122 MILANO (ITALIA)  
Tel.: +39 02 55190493  
Fax: +39 02 55181865

E-Mail: [garassinosl@garassinosl.it](mailto:garassinosl@garassinosl.it)  
Internet: [www.garassinosl.it](http://www.garassinosl.it)



**INTERPORTO TOSCANO  
AMERIGO VESPUCCI S.p.A.**

**Livorno - Collesalveti**

**Compendio sulle indagini geognostiche  
effettuate sull'area di Interporto**

*Angelo Garassino*

**Commessa Job 1136**  
**Protocollo / Rev Doc. No. 26.01**

| Indica le parti modificate con l'ultima revisione *Latest revision*

REV	DATA DATE	DESCRIZIONE DESCRIPTION	REDATTO PREPARED	CONTROLLATO CHECKED	APPROVATO APPROVED
00	26.11.02	Emissione	R. Morgavi A.L. Garassino	M. Nesti	A.L. Garassino
01	03.03.08	Revisione	M. Nesti	M. Nesti	A.L. Garassino

**MECCANICA DEI TERRENI E INGEGNERIA DELLE FONDAZIONI**

Cod. Fisc. e Part. IVA 09893920158 – C.C.I.A.A. Milano 1325801 – Tribunale Milano Reg. Soc. 299857 – Capitale Sociale € 10.400,00 int. vers.

Azienda con Sistema Gestione Qualità ISO 9001:2000 certificato da ICMQ  
Company with Quality Management System ISO 9001:2000 certified by ICMQ



## INDICE

1.	INTRODUZIONE	pag. 5
2.	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	" 8
3.	INDAGINI ESEGUITE	" 10
4.	STRATIGRAFIA	" 17
4.1	Falda	" 24
4.2	Stratigrafia del campo prove	" 25
5.	INTERPRETAZIONE DELLE PROVE IN SITU ED IN LABORATORIO	" 26
5.1	Prove in sito	" 28
5.1.1	Prove scissometriche	" 29
5.1.2	Prove penetrometriche con punta piezometrica	" 35
5.1.3	Interpretazione delle prove dilatometriche	" 51
5.2	Interpretazione delle prove di laboratorio	" 64
5.2.1	Caratteristiche fisiche	" 64
5.2.2	Caratteristiche meccaniche di resistenza	" 67
5.2.3	Caratteristiche di deformabilità	" 69
5.2.4	Caratteristiche reologiche	" 73
5.3	Campo sperimentale	" 75
5.3.1	Rilevato sperimentale – Area senza dreni	" 75
5.3.2	Area con dreni	" 83
5.3.3	Area deep-mixing	" 85
5.3.4	Calcolo della consolidazione secondaria	" 87
5.3.5	Considerazioni sui rilevati del campo sperimentale	" 90
5.3.5.1	Vane tests nei sondaggi	" 96
5.3.5.2	Prove dilatometriche	" 96
5.3.5.3	Ancora sul campo sperimentale	" 97
6.	STRATIGRAFIA E PARAMETRI DI PROGETTO	" 99
6.1	Granulometria	" 99
6.2	Peso di volume $\gamma$	" 100
6.3	Limiti di Atterberg	" 101
6.4	Densità relativa $D_r$	" 101
6.5	Angolo di attrito $\varphi'$	" 102



6.6	Resistenza al taglio non drenata $c_u$	“ 103
6.7	Moduli di deformazione	“ 104
6.8	Coefficienti di consolidazione $c_v$ e $c_h$	“ 105
6.9	Coefficienti di consolidazione secondaria $c_\alpha$	“ 106
6.10	Grado di sovraconsolidazione OCR	“ 106
6.11	Riassunto dei parametri	“ 107

### Elenco simboli

a	= costante propria della punta utilizzata per la prova CPTU;
$C_\alpha$	= coefficiente di consolidazione secondaria;
$C_{\alpha\varepsilon}$	= coefficiente di consolidazione secondaria in termini di deformazione;
$C_c$	= coefficiente di compressione;
$C_h$	= coefficiente di consolidazione orizzontale;
$c_v$	= coefficiente di consolidazione verticale;
CPTU	= prova penetrometrica a punta elettrica con misura della pressione dei pori;
$C_r$	= coefficiente di ricomprensione;
$c_u$	= resistenza al taglio non drenata dei terreni;
$E_{25}$	= modulo di Young al 25% della deformazione di rottura;
$E_{50}$	= modulo di Young al 50% della deformazione di rottura;
DMT	= prova dilatometrica;
$D_r$	= densità relativa;
$f_s$	= resistenza laterale misurata al penetrometro;
I.P.	= $(W_L - W_P)$ indice di plasticità;
$K_0$	= coefficiente di spinta a riposo;
M	= modulo edometrico;
$N_k$	= fattore empirico di correzione per prove penetrometriche statiche;
N.C.	= normal consolidato;
O.C.	= sovra consolidato;
OCR	= grado di sovraconsolidazione;
$p_a$	= pressione atmosferica di riferimento (100 kPa);
$q_c$	= resistenza misurata alla punta del penetrometro statico;
$q_T$	= resistenza totale alla punta del penetrometro con misura delle pressioni interstiziali;
SPT	= prova penetrometrica dinamica standard;



- $U_{bt}$  = pressione dei pori in eccesso letta dal penetrometro rispetto al valore idrostatico;  
 $u$  = pressione neutra registrata;  
 $VT$  = prova con scissometro (anche Vane Test o vane Border);  
 $W_p$  = limite plastico;  
 $W_L$  = limite liquido;  
 $\gamma$  = peso di volume del terreno naturale;  
 $\gamma'$  = peso di volume efficace del terreno naturale;  
 $\varphi'$  = angolo di attrito del terreno in termini di sforzi efficaci;  
 $\lambda$  =  $1 - (C_r/C_c)$ ;  
 $\sigma_v$  = pressione geostatica totale;  
 $\sigma'_v$  = pressione geostatica efficace;  
 $\sigma_{v0}$  = pressione geostatica efficace corrispondente alla condizione attuale;  
 $\sigma'_p$  = pressione di preconsolidazione.





## 1. INTRODUZIONE

A Nord-Ovest della città di Livorno e precisamente tra gli abitati di Stagno e di Guasticce in Comune di Collesalveti la Società Interporto Amerigo Vespucci S.p.A. sta realizzando un grosso centro di scambio intermodale merci collegato al momento con due svincoli alla superstrada Firenze-Pisa-Livorno e che prossimamente sarà collegato anche con la ferrovia e col porto.

L'area è pianeggiante con una quota prossima al livello del mare, variabile mediamente da +0.20 m a +0.80 m e localmente esiste qualche punto più elevato in corrispondenza degli argini dei fossi di raccolta delle acque che solcavano la piana e che in parte sono già stati deviati, mentre in parte saranno deviati prossimamente.

La costruzione dell'Interporto prevede consistenti movimenti di terra e la realizzazione di opere disparate con le esigenze più varie.

In relazione a ciò è stato necessario eseguire uno studio dettagliato del terreno sul quale dette opere saranno fondate, con una approfondita caratterizzazione sia dal punto di vista stratigrafico sia per quanto riguarda i parametri geomeccanici e fisici che del terreno individuano il comportamento, appunto.

La raccolta dei dati è stata eseguita in più fasi attraverso l'esecuzione di più campagne di indagini condotte in tempi diversi.

L'ubicazione dell'area di Interporto è individuata nelle figure 1.1 e 1.2 che ne evidenziano la posizione strategica rispetto alle aree industriali ed al sistema di trasporti esistente.

Scopo del presente rapporto è la raccolta e l'esame di tutti i dati disponibili con la redazione di un documento di sintesi che possa fornire i dati che stanno alla base della progettazione delle strutture da realizzare.



## 2. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

L'area dell'Interporto è posta in una zona di pianura situata nella porzione occidentale del comune di Collesalveti. Dal punto di vista geomorfologico la pianura è del tipo alluvionale. L'attuale assetto morfologico è in parte dovuto all'azione antropica in quanto, una serie di bonifiche, in corso a partire dal XIV secolo, hanno determinato il prosciugamento delle paludi che occupavano una porzione dominante dell'area. La quota depressa dell'area, infatti, e l'assenza di sensibili gradienti topografici hanno favorito il ristagno dell'acqua. Il drenaggio naturale, praticamente assente, e la natura impermeabile dei terreni sono le cause che, fisicamente, hanno provocato il ristagno dell'acqua nell'area. Solo dal periodo di bonifica sono stati costruiti dei canali artificiali che hanno consentito il deflusso delle acque ed hanno permesso il prosciugamento dell'area.

Dal punto di vista geologico l'area si inquadra all'interno della pianura di Pisa. Il substrato è suddivisibile in tre porzioni: il substrato profondo, il substrato intermedio ed il substrato superiore.

Il substrato profondo è identificabile con le formazioni rocciose della serie toscana depositate tra il Trias medio ed il Miocene inferiore e con le formazioni delle serie Liguri deposte tra il Giurese superiore e l'Eocene. Le formazioni riferibili alla serie Toscana si sono deposte nel mare epicontinentale Paleoafricano, cioè su un tratto contiguo al margine settentrionale della Paleoafrica, a partire dal Trias medio, in concomitanza con le fasi di apertura del paleocontinente Pangea. Le formazioni delle Serie Liguri, invece, si sono deposte successivamente, nel paleoceanico Ligure, a partire dal Giurese superiore, quando la tettonica distensiva aveva staccato il paleocontinente Africano ed il paleocontinente Europeo a tal punto da consentire la formazione dell'oceano Ligure. Nel Miocene inferiore le serie Liguri sono sovrascorse sulla serie Toscana con la formazione del Paleoappennino.

Nel miocene superiore iniziava lo sprofondamento di fosse tettoniche nel versante interno, sud-occidentale, del Paleoappennino con apertura di sistemi di faglie dirette e la formazione della fossa Versiliese – Pisana.

I sedimenti del substrato intermedio sono ascrivibili al periodo che intercorre tra il Miocene superiore ed il Pleistocene inferiore. La successione stratigrafica del substrato intermedio comprende tre trasgressioni: quella del Messiniano, quella alla base del Pliocene inferiore e quella del Pliocene Inferiore (Santerniano). I sedimenti che testimoniano le fasi regressive sono meno sviluppati e generalmente si identificano con depositi sabbiosi, che denotano un ritorno a condizioni di mare poco profondo.



Infine il substrato superiore è quello formato da depositi più recenti del Pleistocene inferiore. Queste rocce sono costituite dai calcari e conglomerati del Pleistocene medio.

Al disopra del substrato superiore si rinvengono i depositi del pleistocene medio e dell'Olocene di tipo continentale o transizionale.

Dal punto di vista geomorfologico la piana di Guasticce si identifica come la propaggine meridionale della pianura di Pisa ed è delimitata, a sud, dai Monti Livornesi. Il bacino Pisano-Versiliese si è sviluppato principalmente nel Pliocene inferiore ed in seguito è emerso, per poi subire un successivo sprofondamento nel Pleistocene inferiore. A partire dal Pleistocene medio si è esplicata una serie di fasi dominate da una geomorfologia di impronta fluviale, alternata a motivi tipicamente costieri. Le foto aeree denotano la presenza di alcuni paleoalvei a sud dell'area dell'Interporto. Di notevole importanza, infine, è l'ambiente di tipo palustre che ha contraddistinto l'area fino all'epoca attuale.

Elementi morfologici a carattere artificiale sono i canali di bonifica nonché il canale scolmatore dell'Arno.

L'altimetria dell'area è decisamente regolare e presenta una debolissima pendenza che degrada verso ovest, essendo il paese di Guasticce posto a circa 2 m s.l.m. e l'abitato di Stagno a 0.5 m s.l.m.





### 3. INDAGINI ESEGUITE

Tralasciando le indagini eseguite per i progetti di fattibilità e di massima, che non vengono analizzate nel dettaglio a causa di incertezze di coordinate, ma i cui risultati sono stati presi in considerazione, si ha:

- campagna di indagini 1992 relativa a tutta l'area di Interporto ma con particolare focalizzazione sull'area del rilevato sperimentale;
  - n° 1 sondaggio a rotazione, nel campo prova, con carotaggio continuo e prelievo di campioni indisturbati, con esecuzione di prove SPT in terreni granulari o prove Vane Test in terreni coesivi, spinto alla profondità massima di 36.0 m;
  - n° 2 sondaggi a rotazione con carotaggio continuo e prelievo di campioni indisturbati, con esecuzione di prove SPT in terreni granulari o prove Vane Test in terreni coesivi, spinti alla profondità massima di 40.0 m;
  - n° 6 sondaggi a rotazione con carotaggio continuo e prelievo di campioni indisturbati, con esecuzione di prove SPT in terreni granulari o prove Vane Test in terreni coesivi, spinti alla profondità massima di 60.0 m;
  - n° 5 prove penetrometriche statiche CPTU con piezocono, spinte fino alla profondità di 30.0 m, di cui 2 eseguite nel campo prova ed 1 nel campo deep-mixing;
  - n° 5 prove penetrometriche statiche CPTU con piezocono, spinte fino alla profondità di 40.0 m;
  - n° 1 prova dilatometrica DMT spinta fino alla profondità di 25.0 m, eseguita nel campo deep-mixing;
  - n° 4 prove dilatometriche DMT spinte fino alla profondità di 30.0 m di cui due eseguite nel campo prova;
  - n° 9 prove dilatometriche DMT spinte fino alla profondità di 40.0 m.





Nei fori dei sondaggi 8, 10, 40, 68, 78 e 89 sono state installate celle piezometriche tipo CASAGRANDE.

Lungo le verticali CPTU 21B, 1C, 2B e 3B e DMT 1s, 2, 5 e 94 sono state eseguite prove di dissipazione.

Di tutte le indagini sopra descritte, le seguenti sono state eseguite nel campo prova:

- Sondaggio	SS1	a 36.0 m di profondità	RILEVATO
- CPTU	1c	a 30.0 m di profondità	
- CPTU	2c	a 30.0 m di profondità	
- DMT	1s	a 30.0 m di profondità	
- DMT	2	a 30.0 m di profondità	
- CPTU	3b	a 30.0 m di profondità	DEEP-MIXING
- DMT	5	a 25.0 m di profondità	

Oltre alle celle piezometriche Casagrande, di cui si è già detto, sparse nell'area di interesse, particolare strumentazione geotecnica è stata messa in opera nel campo sperimentale:

- n° 10 piezometri elettrici modello EL 605 (prodotto dalla ditta ELSIM);
  - n° 4 tubi inclinometrici verticali;
  - n° 2 tubi inclinometrici assestometrici orizzontali;
  - n° 2 assestimetri magnetici;
  - n° 1 cella piezometrica Casagrande.
- 
- La esecuzione di un rilevato sperimentale strumentato nel 1992-93 realizzato in parte su dreni ed in parte su terreno naturale.
  - La esecuzione di un campo prova sperimentale con trattamento di miscelazione profonda ed applicazione di un sovraccarico con blocchi di cemento nel 1992-93.
  - L'esecuzione di una piccola campagna nel 1993 per verificare i risultati del campo sperimentale composta da:
    - n° 2 prove dilatometriche spinte a 30 m dal piano campagna originario.



- n° 2 verticali con Vane Test in situ entro fori a distruzione spinti a 30 m dal piano campagna originario (fino a 21 m sono state effettuate prove Vane test, al di sotto, nel livello granulare, sono state eseguite prove SPT).
- Campagna di indagini 1996 relativa all'area dove sorgeranno i magazzini gomma-gomma Nord:
  - n° 5 prove penetrometriche a punta elettrica con misura della pressione dei pori spinte alla profondità di 40 m dal piano campagna;
  - 
  - n° 2 prove dilatometriche spinte alla profondità di 25 m.
- La campagna di indagini del 1998 intesa a coprire tutta l'area, integrando le indagini precedenti e consentendo così la redazione di profili stratigrafici significativi che correlano gli strati presenti su tutta l'area, consistente in:
  - n° 4 sondaggi geognostici di cui 3 spinti alla profondità di 50 m ed 1 alla profondità di 70 m dal p.c.;
  - n° 15 prove dilatometriche spinte alla profondità massima di 50 m da p.c.;
  - n° 13 prove penetrometriche con misura delle pressioni dei pori CPTU spinte alla profondità massima di 70 m da p.c..

Per comodità si riassumono nelle tabelle 3.I ÷ 3.IV le indagini geognostiche eseguite sull'area e la strumentazione geotecnica installata. Per quanto riguarda le indagini finalizzate ai campi prova esse sono evidenziate.

Nella figura 3.1 è riportata la planimetria completa delle indagini mentre nella figura 3.2 sono riportate le indagini dedicate al campo prova.

		COORDINATE				COORDINATE	
	TIPO	X	Y		TIPO	X	Y
●	S8	328.38	144.52	■	PD29	1254.53	226.68
	S10	543.35	400.89		PD52	1469.15	120.74
	S24	975.40	199.47		PD63	264.59	208.46
	S40	467.78	25.36		PD76	1876.17	484.46
	S45	1551.63	349.91		PD94	2090.14	669.10
	S68	1684.96	181.66		CPTU1C	1388.74	37.10
	S78	1919.27	554.02		CPTU2B	1390.42	21.48
	S89	1955.00	425.45		CPTU3B	1330.70	55.64
	SS1	1364.48	34.56		CPTU21	745.76	239.10
■	DMT1	188.06	169.10	▼	CPTU36	211.57	15.75
	DMT2	1372.22	9.08		CPTU47	1575.74	389.41
	DMT16	618.78	172.47		CPTU59	270.89	310.92
	DMT31	71.49	8.00		CPTU64	389.10	248.62
	DMT39	373.69	17.79		CPTU73B	1802.70	368.47
	PD5	1333.23	38.27		CPTU84	1818.41	222.02

**Tabella 3.I** – Indagini geognostiche di 1<sup>a</sup> fase, 1992

	TIPO	POSIZIONE
●	SS2	RILEVATO SPERIMENTALE AREA DRENI
	SS3	RILEVATO SPERIMENTALE AREA SENZA DRENI
■	DMT / PDT3	RILEVATO SPERIMENTALE AREA DRENI
	DMT / PDT4	RILEVATO SPERIMENTALE AREA SENZA DRENI
* COORDINATE NON NOTE CON PRECISIONE		

**Tabella 3.II** – Indagini geognostiche di 1<sup>a</sup> fase, 1993

		COORDINATE	
	TIPO	X	Y
■	DMTD1	716.40	350.18
	DMTD2	1130.33	352.20
▼	CPTUP1	620.85	344.03
	CPTUP2	862.72	328.78
	CPTUP3	981.62	336.75
	CPTUP4	1055.05	343.12
	CPTUP5	1197.89	341.19

**Tabella 3.III** – Indagini geognostiche 1996



	TIPO	COORDINATE			TIPO	COORDINATE	
		X	Y			X	Y
●	SG2/1	1262.52	418.80	■	DMT2/13	2410.51	752.48
	SG2/2	1940.63	247.55		DMT2/14	709.45	197.87
	SG2/3	2552.63	258.78		DMT2/15	1037.62	197.87
	SG2/4	2348.05	677.05		CPTU2/1	1339.14	151.18
■	DMT2/1	1917.35	90.39	■	CPTU2/2	2431.40	177.63
	DMT2/2	2111.91	123.90		CPTU2/3	2215.04	246.15
	DMT2/3	2060.45	313.56		CPTU2/4	2266.64	341.19
	DMT2/4	2390.99	333.46		CPTU2/5	2231.45	355.52
	DMT2/5	2077.11	487.84		CPTU2/6	2621.50	765.34
	DMT2/6	2299.28	506.59		CPTU2/7	631.45	504.75
	DMT2/7	2489.68	518.05		CPTU2/8	868.04	504.75
	DMT2/8	742.93	504.75		CPTU2/9	1625.10	652.41
	DMT2/9	1060.49	504.75		CPTU2/10	2163.24	608.29
	DMT2/10	1134.22	504.75		CPTU2/11	2492.86	638.83
	DMT2/11	1434.09	458.64		CPTU2/12	1037.60	197.87
	DMT2/12	1420.25	590.79		CPTU2/13	796.59	173.37

**Tabella 3.IV** – Indagini geognostiche di 2<sup>a</sup> fase, 1998

	TIPO	COORDINATE	
		X	Y
△	CPT1	-11.16	6.18
⊕	CPTU1	1260.65	15.53
	CPTU2	975.82	16.57
	CPTU3	719.23	-25.71
	CPTU4	535.13	21.63
	CPTU5	258.27	-36.07
⊕	BH1	1113.33	20.93
	BH2	900.26	-61.72
	BH3	722.51	20.35
	BH4	594.34	-51.75
	BH5	348.48	-16.97
	BH6	123.12	-45.05

**Tabella 3.V** – Indagini geognostiche finalizzate al tracciato ferroviario