CONSEGUENZE DELL'IRRIGAZIONE CON ACQUE SALINO-SODICHE SU ALCUNE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL SUOLO

Fabbri A., Guarnieri A, Marcheselli L.

Dipartimento DEIAgra - Università di Bologna

Riassunto

Nel corso del presente studio, volto a valutare l'influenza della concentrazione salina di NaCl e $CaCl_2$ e dell'indice di sodicità di quattro suoli argillosi sulle loro caratteristiche fisico-meccaniche, sono stati determinati i valori dei limiti di Atterberg (LL ed LP), della resistenza alla penetrazione (CI) ed alla compressione monoassiale in condizioni non confinate. Le prove sono state effettuate su campioni di suolo trattati dal Dipartimento di Agronomia dell'Università di Bologna con soluzioni saline con concentrazioni 0,001 – 0,1 M e indici di sodicità 5 – 15 – 45 SAR classico.
I risultati relativi ai limiti di Atterberg mostrano l'esistenza di una marcata influenza delle variazioni di salinità e sodicità solo sul terreno di Ozzano, per il quale il limite liquido aumenta con la concentrazione salina, mentre diminuisce quello plastico.
Per quanto concerne la resistenza alla penetrazione non sono state evidenziate differenze fra i diversi trattamenti, oltre a quelle ovvie, dovute alle differenze tra terreni o umidità. E' emersa invece un'influenza molto significativa del trattamento dei campioni sulla resistenza alla compressione, misurata su provini cilindrici sottoposti a compressione monoassiale in condizioni non confinate, valutata solo su due terreni e due trattamenti. In particolare, mentre la correlazione con la sodicità è risultata positiva, quella con la salinità è risultata di segno opposto.

Summary

In this study, with the aim to appraise the influence of the salt concentration of NaCl and $CaCl_2$ and of the sodicity index of four clay soils on their physical-mechanical characteristics, have been determined the Atterberg limits (LL and LP), the penetration resistance as cone-index (CI) and the monoaxial compression resistance in unconfined conditions. The tests have been carried on on soil samples with salt concentrations 0,001 - 0,1 M and sodicity indexes of 5 - 15 - 45 classical SAR.

Lavoro eseguito con finanziamenti MURST ex40%, 1988. Il prof. Guarnieri è il responsabile dell'unità operativa; l'ing. Fabbri ha sviluppato l'analisi statistica e ne ha discusso i risultati assieme al prof. Guarnieri. Il dott. Marcheselli ha effettuato le prove di laboratorio.

The results relative to the Atterberg limits have shown a clear influence of the salinity/sodicity variations only on the soil from Ozzano, for which the LL decrease for increasing salinity and sodicity, while LP decrease.
As far as the cone index, differences between the different treatments have not been underlined, besides those obvious, due to differences between soils or moisture. A high significative influence of the treatment of the samples on the compression resistance, measured on cylindrical samples submitted to a monoaxial compression in unconfined conditions, also emerged

1. INTRODUZIONE

Sulla base della letteratura scientifica si osserva come siano particolarmente sviluppate le conoscenze di carattere chimico e fisico sui fenomeni elettrici di superficie nei colloidi ed in particolare sulla stabilità di struttura e sui limiti di Atterberg (Aylmore L. A. G., and Sills I. D., 1982) (Baver L. D., 1928) (Dexter A. R., and Chan K. Y., 1991) (Grant C. D., et al., 1991) (Murray R. S., and Quirk J. P., 1990), alcune ricerche evidenziano un generale ampliamento del campo di plasticità, più spesso dovuto all'aumento del valore del limite liquido, ed in alcuni casi alla diminuzione di quello plastico (Baver L. D., 1930) (Campbell D. J., 1991) (Charpentier S., and Bourrié G., 1997) (Dexter A. R., and Chan K. Y., 1991) (Hettiarachi D. P. R., and O'Callaghan J. R., 1990) (Sridharan A., Rao S. M., and Murthy N. S., 1986). A tal proposito la letteratura da tempo riporta come la presenza dello ione Na si associ ad un aumento del limite liquido ed una diminuzione di quello plastico, e come in particolare l'effetto di idratazione dello ione Na, risulti superiore a quello degli altri ioni bivalenti come Ca, Mg o K, in relazione al film di umidità che circonda le particelle terrose, e che è responsabile degli effetti di plasticità (Baver L. D., 1948). Le poche ricerche documentate circa gli aspetti meccanici, fanno principalmente riferimento a correlazioni tra i limiti di Atterberg e la resistenza al taglio ed alla penetrazione del suolo, e ad altri aspetti fisico-agronomici, senza evidenziarne in modo peculiare il ruolo della diversa salinità e sodicità (Campbell D. J., 1991) (Charpentier S., and Bourrié G., 1997) (Freitag D. R., 1987) (Ohu J.O., 1986) (Perumpral J. V., and Ayers P. D., 1982) (Smith C. W., 1985). La particolare attenzione che si vuole riservare ai limiti di Atterberg è anche conseguenza delle molteplici relazioni empiriche tra questi limiti e le altre proprietà complesse come friabilità, lavorabilità e trafficabilità (Freitag D. R., 1987) (Hettiarachi D. P. R., and O'Callaghan J. R., 1990) (McKeys E., 1989) (Müller L., et al., 1990) (Ohu J.O., et al., 1986) (Perumpral J. V., and Ayers P. D., 1982). A fronte di una pur limitata disponibilità di conoscenze circa l'influenza dell'irrigazione con acque salino-sodiche sulle proprietà meccaniche del suolo in campo plastico, del tutto assenti risultano invece le conoscenze di tali relazioni per quanto riguarda i suoli in campo friabile, ovvero nelle normali condizioni di lavorabilità (Hettiarachi D. P. R., and O'Callaghan J. R., 1990) (McKeys E., 1989) (Müller L., et al., 1990) (SISS, 1997). In tale stato, denominato comunemente in ambito agromeccanico come *tempera*, il suolo si frantuma, pur senza polverizzarsi, con bassa spesa energetica, trovandosi nelle migliori condizioni di lavorabilità, ovvero per valori dell'indice di consistenza superiori ad 1,3 (Ic=(LL-Umidità)/Ip) (SISS, 1997). Su tali aspetti più comunemente si fa riferimento alla resistenza alla rottura di campioni di terreno sottoposti a prove di compressione e in qualche caso alla resistenza alla penetrazione (Grant C. D., et al., 1991) (Merry R. H., 1988) (Smith C. W., 1985).

2. MATERIALI E METODI

Al fine di valutare gli effetti dei trattamenti con acque salino-sodiche sulle proprietà fisico-meccaniche si è ritenuto di operare, preliminarmente, nell'ambito delle umidità tipiche della consistenza plastica del suolo, ovvero del campo compreso tra il limite liquido e quello plastico. E' stato peraltro ritenuto interessante analizzare l'influenza dei sali sul comportamento del suolo anche per umidità inferiori al limite plastico, ovvero nelle condizioni di friabilità del suolo. In tale ottica sono stati preparati quattro campioni di circa 16kg di suolo argilloso di differente provenienza, la cui granulometria è riportata in tabella 1.

Tabella 1 – Classi granulometriche e composizione mineralogica dei terreni.

Terreno	***Classi di granulometria (USDA)***		
	2 - 0,05 mm	*0,05 - 0,002* mm	*< 0,002* mm
Argese *(ilite, caolinite)* [da Locorotondo di Bari]	*6,38*	*54,96*	*38,66*
Cardone *(ilite, caolinite)* [da Locorotondo di Bari]	*8,46*	*56,48*	*35,06*
Carpi *(ilite, vermiculite, clorite, caolinite)* [Modena]	*3,03*	*53,84*	*43,13*
Ozzano *(vermiculite, ilite, smectite, caolinite)* [Bologna]	*13,69*	*47,68*	*36,63*

Tali terreni sono stati trattati in laboratorio con quattro soluzioni saline corrispondenti alle combinazioni tra concentrazioni saline (NaCl e $CaCl_2$) e sodicità riportate in tabella 2.

Tabella 2 – Soluzioni saline impiegate nel trattamento di sodicizzazione dei terreni.

Trattamento	**Concentrazione salina** M	**Indice di sodocità** SAR
a	10^{-3}	5
b	10^{-1}	15
c	10^{-1}	45
c*	10^{-1}	45

Il trattamento **c*** è relativo ad un diverso trattamento fisico dei suoli, teso ad aumentare la percentuale di sodio scambiabile.

Al termine di un ciclo di 3 immersioni nella soluzione salina (trattamenti **a**, **b**, **c**) e di 5 immersioni (trattamento **c***), e dopo essiccazione in forno per 24h a 45°C, sono state determinata la percentuale di sodio scambiabile (ESP) e la conduttività elettrica (EC) ottenuta con una soluzione di terreno ed acqua a 25°C nel rapporto 1:5, ottenendo i risultati riportati in tabella 3.

Tabella 3 –Percentuale di sodio scambiabile (ESP) e conduttività elettrica dei terreni (EC) di una soluzione 1:5 acqua-terreno, dopo il trattamento salinizzante.

Tesi	**a**		**b**		**c**		**c***	
Terreno	ESP %	EC mS/cm	ESP %	EC mS/cm	ESP %	EC mS/cm	ESP %	EC mS/cm
Argese	0,98	0,13	1,74	1,45	4,94	0,92	20,91	1,10
Cardone	0,74	0,17	1,64	1,42	4,83	1,55	18,41	1,37
Carpi	1,61	0,26	1,49	1,55	4,47	1,08	19,66	0,98
Ozzano	0,60	0,14	1,26	1,37	5,21	0,98	14,33	1,12

I valori dei limiti di Atterberg sono stati determinati secondo lo standard BSI 1337 (BSI, 1975), in particolare il metodo adottato per la determinazione del limite liquido prevede l'uso di un conopenetrometro dinamico, con punta a cono con angolo di apertura pari a 30° ed altezza di circa 35mm. Mentre per la determinazione del limite plastico, secondo lo standard citato, è stata determinata la minima quantità d'acqua che permette di modellare plasticamente dei cilindretti di terreno del diametro di circa 3mm senza provocarne la rottura.
Per la misura della resistenza alla penetrazione, il terreno, setacciato a 2 mm e portato a quattro livelli di umidità compresi fra LL ed LP, è stato disposto in contenitori cilindrici (h=55mm, Φ=50mm), con ogni accorgimento volto ad ottenere provini il più possibile omogenei. La determinazione è stata effettuata utilizzando uno strumento appositamente costruito, analogo a quello descritto dallo standard ASAE S313.2 (ASAE, 1994), con punta conica (Φ=8 mm, H=14 mm, angolo di apertura 30°) e velocità di discesa pari a circa 10 mm/s. Il valore di resistenza alla penetrazione utilizzato per le analisi è stato determinato come valore medio sull'intervallo di profondità 20-40 mm.
Le prove di compressione assiale non confinata sono state effettuate su provini cilindrici (Φ=36mm) da 120g dei terreni Ozzano e Cardone corrispondenti alle tesi **c** e **c***. I provini di terreno setacciato a 2 mm, e successivamente umidificato per valori compresi tra LL ed LP, sono stati compattati in formatori cilindrici, per strati successivi di 20 g per mezzo di un solo colpo provocato da una massa di 2400 g in caduta dall'altezza di 30 mm. Le prove di compressione sono state effettuate alla velocità di 83 μm/s. Dalla curva forza-spostamento, acquisita con risoluzione di 1 kHz, sono stati determinati i relativi valori in corrispondenza del punto di massimo.
Per tutte le tipologie di prova il terreno, dopo essere stato disposto in vaschette su strati di circa 20 mm ed umidificato per aspersione, dall'alto, è stato lasciato riposare per 12 h negli stessi contenitori, resi ermetici.
In relazione agli standard adottati le determinazioni di LL ed LP sono state replicate quattro volte, mentre quelle di resistenza alla penetrazione ed alla compressione per cinque volte.

3. DISCUSSIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

3.1. LIMITI DI ATTERBERG

Dall'analisi della correlazione lineare tra le variabili (limiti di Atterberg, tipo di terreno, trattamento, salinità e sodicità delle soluzioni, limo, argilla), considerando i quattro terreni

assieme, non è possibile evidenziare un'influenza significativa tra i trattamenti con soluzioni saline ed i limiti di Atterberg (tab. 4).

Tabella 4 – Correlazione lineare sui dati aggregati. Coefficiente R di Pearson e sua significatività, su 64 casi.

	LL	LP	Ip
Terreno	0,45 (p<0,001)	-0,45 (p<0,001)	0,68 (p<0,001)
Trattamento	0,11	-0,46	0,14
Salinità	0,05	0,04	0,02
Sodicità	0,11	0,01	0,10
Limo	-0,25 (p<0,05)	0,69 (p<0,001)	-0,62 (p<0,001)
Argilla	0,77 (p<0,001)	0,53 (p<0,001)	0,44 (p<0,001)

Com'era da attendersi, peraltro, i limiti risultano influenzati sia dalla mineralogia del terreno che dalla frazione argillosa, evidenziando per i terreni più montmorillonitici, Carpi ed Ozzano, un più alto valore dell'indice plastico (tab. 5).

Tabella 5 – Valori medi di LL, LP ed Ip complessivamente rilevati per i diversi terreni trattati.

	Argese	Cardone	Carpi	Ozzano
LL	44,2	42,6	51,5	46,4
LP	23,6	23,4	25,1	19,7
IP	20,6	19,2	26,4	26,7

In particolare appare evidente dal grafico in figura 1 e dalla successiva analisi di varianza (tab. 6) come il LL del terreno di Ozzano manifesti la maggiore sensibilità rispetto ai diversi trattamenti.

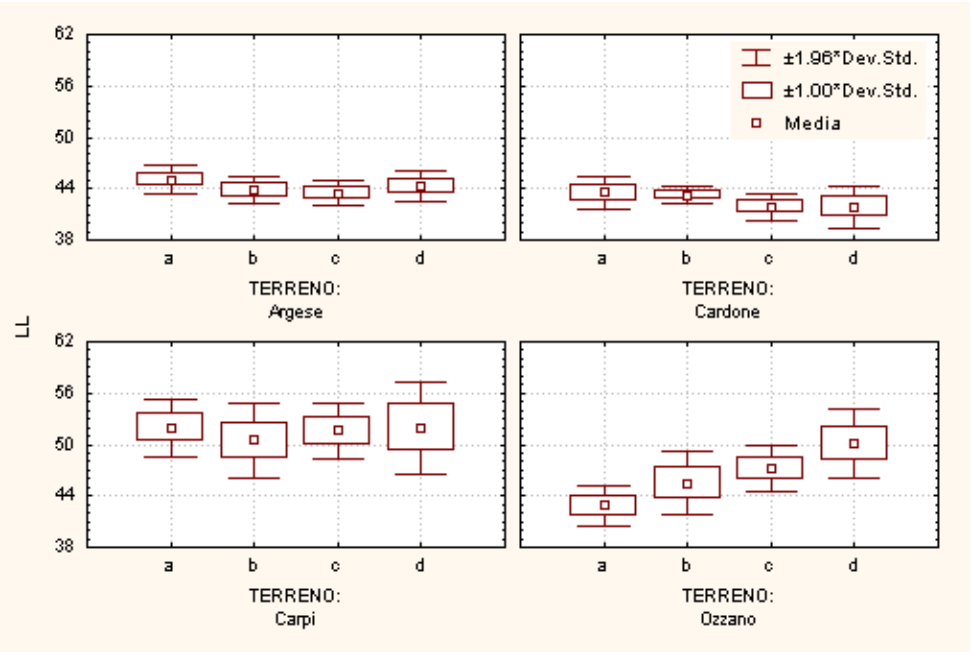

fig. 1 Box-plot categorizzato per la variabile LL

Tabella 6 – Test di Student-Newmann-Keuls sulla variabile LL per terreno di Ozzano.

Trattamento	**a** LL=42,8	**b** LL=45,5	**c** LL=47,2	**c*** LL=50,1
a	-	0,04	<0,01	<0,01
b	<0,05	-	0,17	<0,01
c	<0,01	0,17	-	<0,05
c*	<0,01	<0,01	<0,05	-

Dall'esame della correlazione lineare, i cui risultati sono riportati in tabella 7, per il terreno di Ozzano si nota anche come sia più accentuata l'influenza della sodicità (R=0,82, p<0,01) rispetto alla salinità (R=0,68, p<0,01).

Tabella 7 – Correlazione lineare sul terreno di Ozzano. Coefficiente R di Pearson e sua significatività, su 16 casi.

	LL	**LP**	**Ip**
Trattamento	0,87 (p<0,001)	-0,71 (p<0,01)	0,91 (p<0,001)
Salinità	0,68 (p<0,01)	-0,28	0,61 (p<0,05)
Sodicità	0,82 (p<0,001)	-0,84 (p<0,001)	0,91 (p<0,001)

L'effetto delle variazioni di salinità e sodicità sul limite liquido del terreno Ozzano sono ben evidenziate dalla relazione ΔLL≈0,02·ΔSalinità + 0,24·ΔSodicità, (R=0,88, p<0,01) (fig. 2). In particolare i coefficienti normalizzati della regressione multipla β, (0,24 per la salinità e 0,43 per la sodicità) mostrano come l'influenza della sodicità sia circa doppia rispetto a quella della salinità.

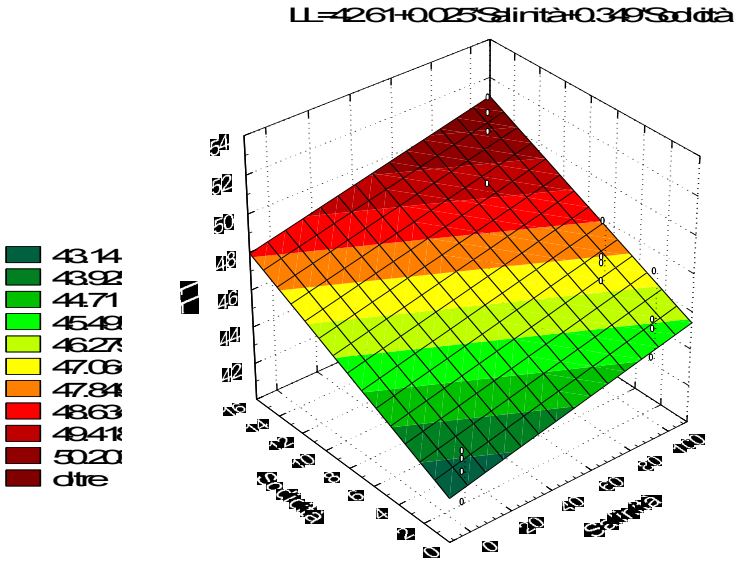

fig. 2 Regressione multipla delle variabili Sodicità e Salinità sul limite liquido del terreno di Ozzano (R=0,88, p<0,01)

Dai risultati esposti, concordemente con i dati sperimentali disponibili in letteratura (Baver L. D., 1948), sembra che l'aumento della sodicità, almeno per il terreno di Ozzano, determini un

aumento della consistenza del terreno e di conseguenza una maggiore resistenza alla penetrazione della punta conica dello strumento per la misura del LL (fig. 3), assimilabile a quella corrispondente ad una diminuzione di umidità.

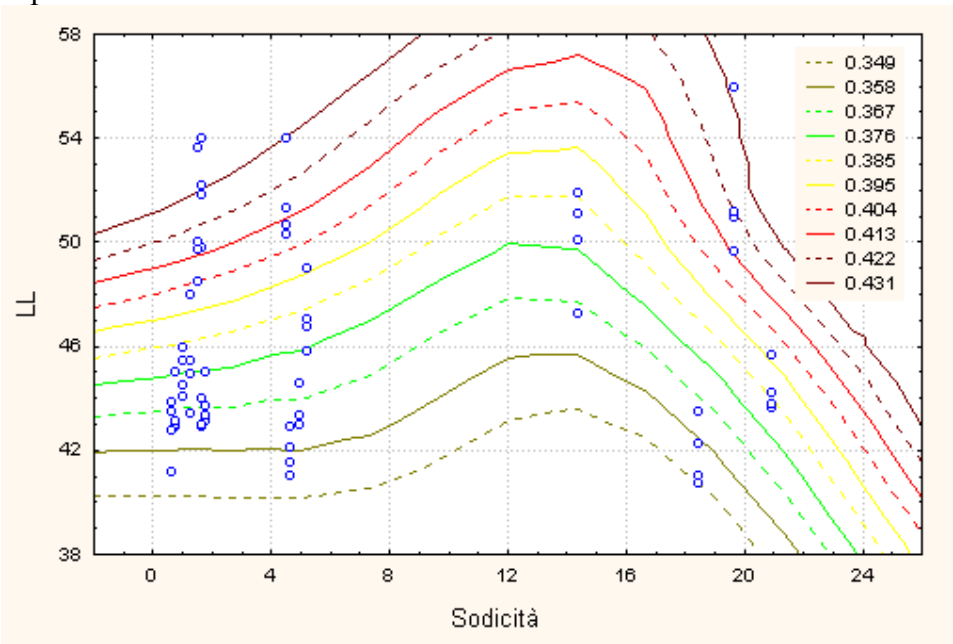

fig. 3 Approssimazione spline della relazione tra LL, sodicità e contenuto di argilla, per i quattro terreni considerati

Tale comportamento, in termini fisici, concordemente con il fatto che il terreno di Ozzano si distingue dagli altri per un maggior contenuto di Montmorillonite, può significare che il sodio è in grado di diminuire la capacità dell'acqua di fluidificare il terreno. Più in particolare, potendosi ritenere applicabili i risultati esposti dal Baver (Baver L. D., 1948) sull'influenza della sodicità sulla viscosità, nel dominio comprendente prima il punto di minimo, poi quello di massimo (tratto della curva concava superiormente), sarebbe interessante verificare l'andamento, del tutto plausibile, del limite liquido in funzione della sodicità, che scaturisce dal complesso dei risultati di questa ricerca (fig. 3).
Relativamente al limite plastico i diversi terreni mostrano un comportamento disomogeneo, nel senso che mentre i due terreni Argese ed Ozzano mostrano una tendenza del limite plastico sostanzialmente decrescente con il trattamento, più evidente per quello di Ozzano, nel terreno Cardone invece si evidenzia un aumento significativo del limite plastico all'aumentare della salinità (tesi **a** e **b**) ed un andamento prima decrescente e poi crescente all'aumentare della sodicità (fig. 4).

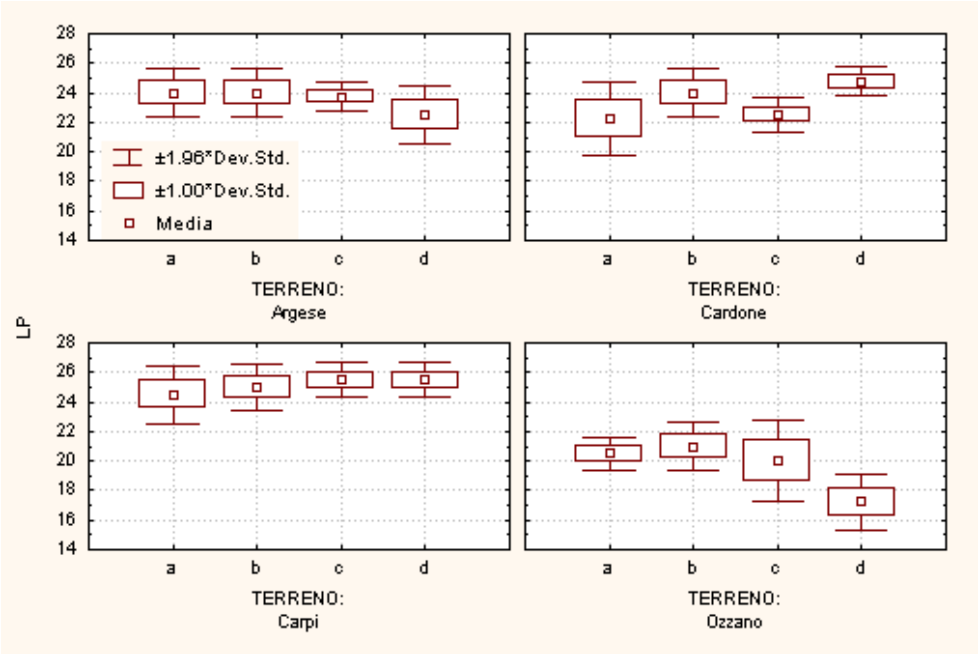

fig. 4 Box-plot categorizzato per la variabile LP

In termini meccanico-agronomici, la diminuzione del LP riscontrata per i terreni di Ozzano ed Argese, equivale ad una riduzione del campo della friabilità del suolo, ovvero dell'intervallo di umidità maggiormente adatto per le lavorazioni primarie e secondarie.
In conseguenza degli andamento visti dei limiti di Atterberg, il trattamento con acqua salino-sodiche produce l'effetto di aumentare l'Ip, e quindi il campo di plasticità. Tale effetto è particolarmente notevole per il terreno di Ozzano, per il quale si passa da un valore minimo di Ip=24% ad un massimo di Ip=32% ($p<0,01$).

3.2. RESISTENZA ALLA PENETRAZIONE

I risultati relativi al trattamento con acque saline, sia considerando i terreni separatamente che aggregati, non hanno evidenziato alcuna influenza significativa sui valori del CI, mentre lo stesso parametro risulta essere influenzato significativamente, in linea con i dati reperibili in letteratura, sia dal tipo di terreno che dall'umidità (fig. 5). Sebbene il penetrometro a cono sia ormai considerato uno strumento adatto alla valutazione delle condizioni di lavorabilità e trafficabilità dei suoli, ed in generale della resistenza alla penetrazione, esso tuttavia non è risultato in grado di evidenziare gli effetti del trattamento salino-sodico, nonostante tali effetti siano invece emersi, per il terreno di Ozzano, utilizzando uno strumento sostanzialmente simile per la misura dinamica del LL, anche se con umidità più elevate.

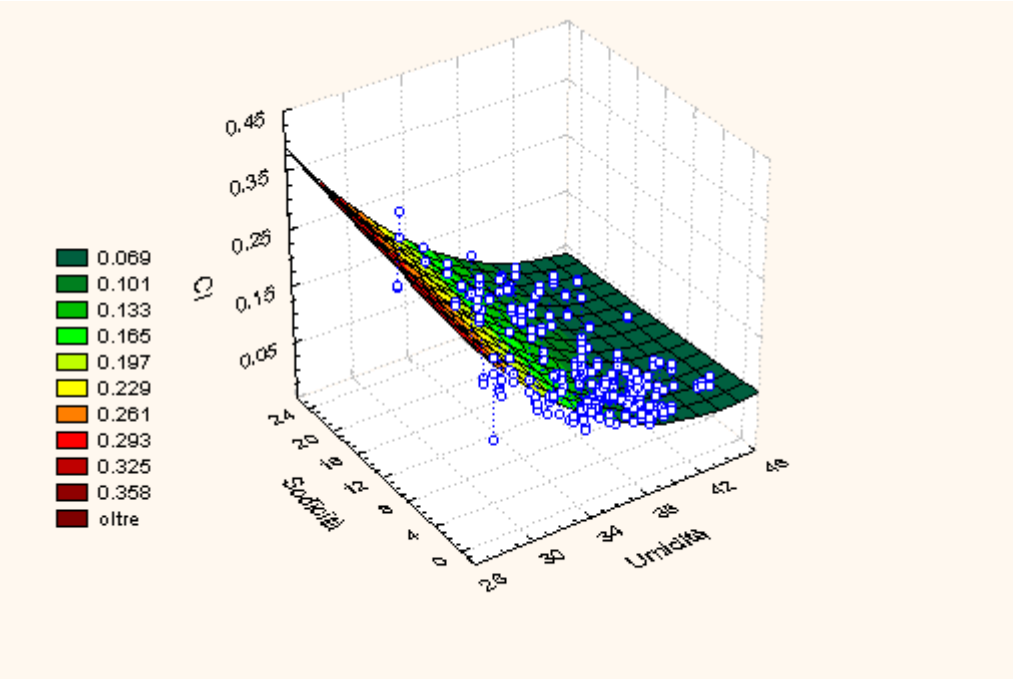

fig. 5 Influenza del sodio sul CI di tutti i terreni, per umidità comprese tra 25% e 45%

3.3. RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE ASSIALE NON CONFINATA

L'analisi dei valori relativi all'umidità ed alla massa volumica b.s. dei provini impiegati per le prove di resistenza alla compressione, ha fornito rispettivamente valori compresi nell'intervallo 10-23% e 0,95-2,15 kg/dm^3, e perciò sostanzialmente in campo friabile.
La resistenza alla compressione dei due terreni considerati (Cardone ed Ozzano), valutata attraverso la misura del punto di massimo delle curve forza-spostamento su provini cilindrici ad espansione laterale libera, è risultata influenzata significativamente dal trattamento con acque salino-sodiche, sia per quanto riguarda la sodicità ($R=0,37$, $p<0,01$) e la salinità ($R=-0,48$, $p<0,01$) sia per l'umidità ($R=0,40$, $p<0,01$).
L'analisi di regressione multipla delle variabili salinità-sodicità-umidità-massa volumica sulla resistenza alla compressione ($R=0,82$, $p<0,01$) (fig. 6), per i due terreni, mette in evidenza l'importanza del ruolo della salinità anche rispetto agli altri parametri. E' possibile inoltre notare come nel caso della resistenza alla compressione la salinità abbia una importanza circa tripla rispetto alla sodicità, ma con segno opposto (tab. 8).

Tabella 8 – Coefficienti di regressione multipla sulla variabile resistenza alla compressione.

	Sodicità	**Salinità**	**Umidità**	**Massa volumica**
β	0,26	-0,73	0,42	-0,48
B	0,088	0,245	0,083	0,014

Tale influenza va comunque valutata nel contesto di una prova limitata, per il numero delle tesi considerate, peraltro caratterizzata da una estrema difficoltà nel controllo delle variabili sperimentali, legate alla preparazione dei provini, con particolare riferimento alla massa volumica, sulla quale si ritiene di dovere approfondire gli aspetti della resistenza in un campo

come quello della friabilità di particolare interesse per i problemi di carattere meccanico-agronomico.

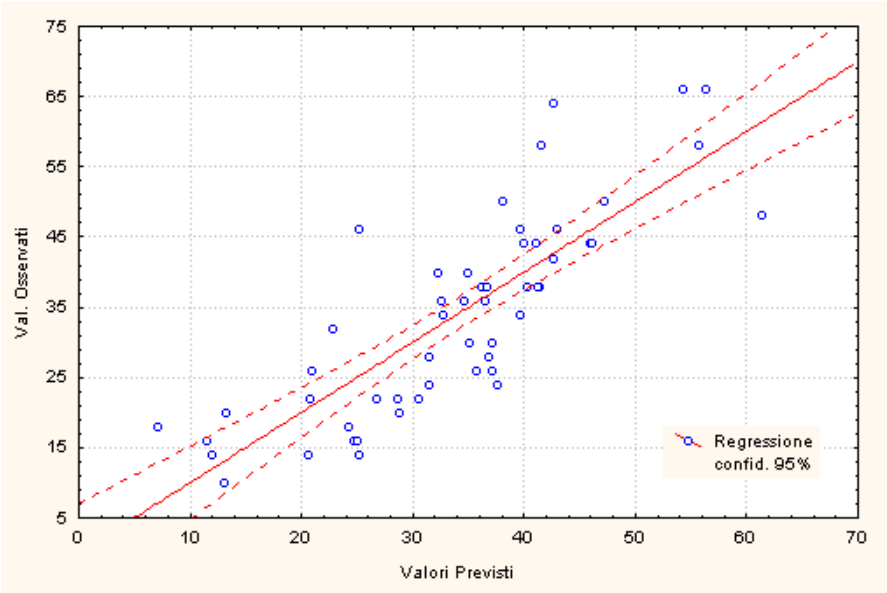

fig. 6 Regressione sulla variabile resistenza alla compressione: valori calcolati-valori misurati (R=0,82, p<0,01)

Bibliografia

ASAE (1994), ASAE Standards 1994. Standards Engineering Practices Data. St. Joseph, MI, USA.

Atterberg A., Die plastizität der tone, Int. Mitt. Bodenkd. (1911), 1: 10-43.

Aylmore L. A. G., and Sills I. D., Characterisation of soil structure and stability using modulus of rupture-exchangeable sodium percentage relationship, Aust. J. Soil Res. (1982), 20: 213-22.

Baver L. D., Soil physics, John Wiley&Sons, (1948), NY.

Baver L. D., The Atterberg consistency constants: factors affecting their values and a new concept of their significance, J. Am. Soc. Agron. (1930), 22: 935-948.

Baver L. D., The relation of exchangeable cations to the physical properties of soils, J. Am. Soc. Agron. (1928), 20: 921-941.

BSI (1975) Methods of test for Soils for civil engineering purposes, British Standard Institution, London.

Campbell D. J., Liquid and plastic limits, Soil Analysis: physical methods, (1991), Smith & Mullins, New York.

Charpentier S., and Bourrié G., Deformation of saturated clays under mechanical and osmotic stress and its relation with the arrangement of the clays, European J. Soil Sci. (1997), 48 (1): 49-57.

Dexter A. R., and Chan K. Y., Soil mechanical properties as influenced by exchangeable cations, J. Soil Sci. (1991), 44: 219-26.

Freitag D. R., A proposed strength classification test for fined-grained soils, Journal of Terramechanics (1987), 5, 2: 9-23.

Grant C. D., et al., Residual effects of addition of calcium compounds on soil structure and strength, Soil Tillage Res. (1991), 22: 283-97.

Hettiarachi D. P. R., and O'Callaghan J. R., Mechanical behaviour of agricoltural soils, J. Agric. Engng. Res. (1990), 25: 239-59.

Hettiarachi D. P. R., Hatibu N., The transition from ductile flow to brittle failure in unsaturated soils, J. Agric. Engng. Res. (1993), 54: 319-328.

McKeys E., Agricoltural engineering soil mechanics, (1989), Elsevier Science, Amsterdam.

Merry R. H., and Spouncer L. R., The measurement of carbon in soils using a microprocessor-controlled resistance furnace, Commun. Soil Sci. Plant Anal. (1988), 19: 707-20.

Müller L., et al., Workability of alluvial clay soils in response to drainage status, Soil & Tillage Research (1990), 16: 273-87.

Murray R. S., and Quirk J. P., Interparticle forces in relation to the stability of soil aggregates, Soil colloids and their association in aggregates, (1990), Plenum Press, New York.

Ohu J.O., et al., Shear strength prediction of compacted soil with varying added organic matter contents, Transaction of ASAE (1986), 29, 2: 351-55.

Perumpral J. V., and Ayers P. D., Moisture and density effect on cone index, Transaction of ASAE (1982), 1169-172.

SISS, Metodi di analisi fisica del suolo, (1997) Franco Angeli, Milano.

Smith C. W., et al., Shrinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel, Geoderma (1985), 35: 47-65.

Sridharan A., Rao S. M., and Murthy N. S., Liquid limit of montmorillonite soils, Geotech. Testing J. (1986) 9: 156-159.

Stakman W. P., and Bishay B. G., Moisture retention and plasticity of highly calcareous soils in Egypt, Neth. J. Agric. Sci. (1976), 24: 43-57.