

Job Title : Sperimentazione KZ fora CPT - DEFORMAZIONE PLASTICA
 From File : In1.sav

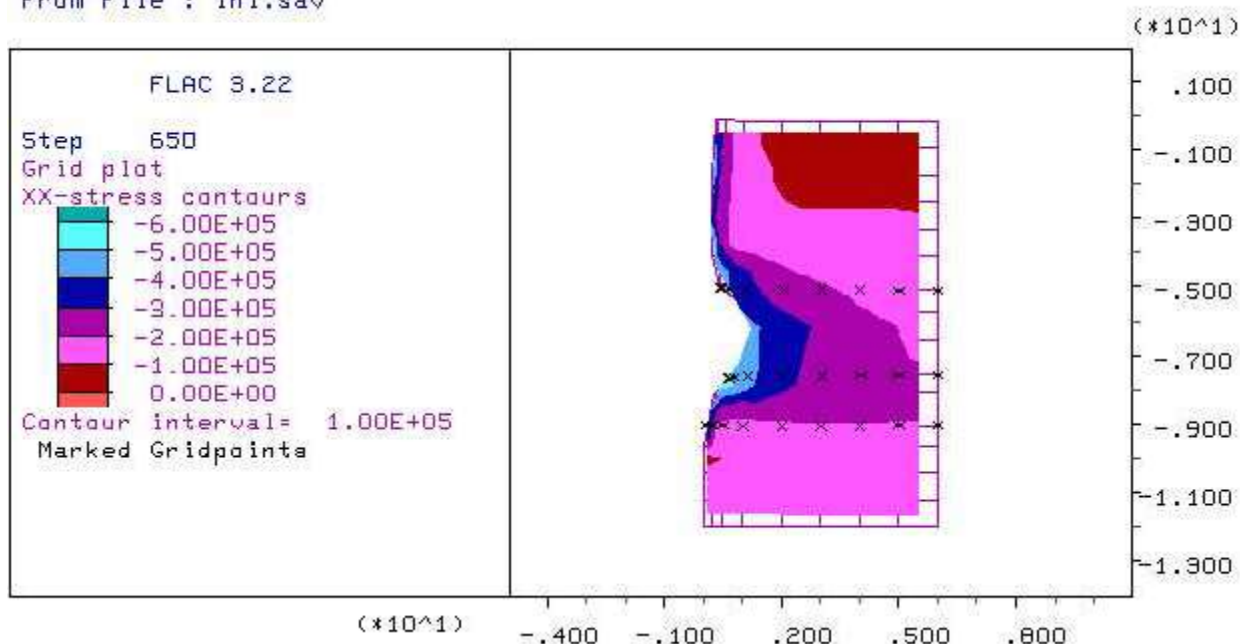


Fig. 8 – distribuzione delle tensioni orizzontali, comportamento elasto-plastico -

Sebbene questa rappresentazione risulti più corretta da un punto di vista del regime tensoriale legato alle deformazioni indotte, lo stadio analizzato risulta eccessivamente elevato (deformazione troppo spinta). Ciò si può spiegare tenendo conto delle seguenti considerazioni:

- Le volumetrie di resina necessarie per produrre una tale deformazione sono nettamente superiori a quelle realmente impiegate ($6,07 \text{ m}^3$ contro $0,95 \text{ m}^3$);
- I valori di tensione orizzontale indotti risultano eccessivamente elevati e non giustificativi degli incrementi percentuali di resistenza misurati dalla prova CPT2 eseguita a seguito dell'iniezione;
- La deformazione risulta troppo spinta in senso longitudinale raggiungendo distanze significative $2,5 \text{ m}$;
- I tempi di reazione (solidificazione) della resina risultano bassi e non consentirebbero in alcun caso il raggiungimento di uno stadio deformativo così avanzato.

Si osserva comunque già una buona corrispondenza tra le zone di concentrazione dello stress e gli incrementi di resistenza offerti dal confronto tra le prove CPT.

Una rappresentazione più realistica degli spostamenti effettivamente prodotti dall'espansione della resina, nel breve tempo di indurimento della stessa, è riportata per uno step corrispondente ad uno spostamento di 35 cm ca.

Gli incrementi di stress orizzontale, per quanto meno pronunciati, presentano distribuzione (fig. 9) simile al caso precedente con un "bulbo significativo calcolato" di ampiezza orizzontale di ca. 1.5 m.

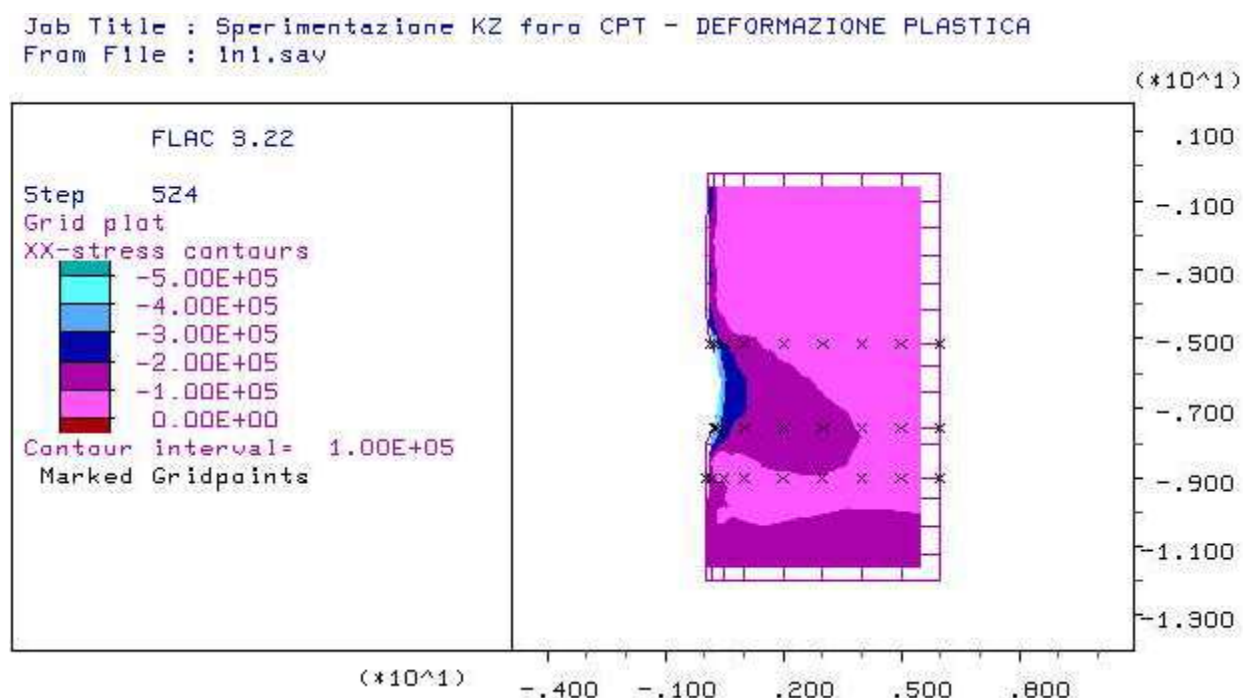


Fig. 9– distribuzione delle tensioni orizzontali, comportamento elasto-plastico, step corrispondente a 35 cm di spostamento -

La validità del modello proposto per quanto concerne lo stato di deformazione raggiunto (strain) risulta confermata dal calcolo volumetrico che è stato eseguito sullo strain raggiunto. Passando dal caso bidimensionale sopra-proposto al caso tridimensionale, mediante una semplice rotazione del modello intorno all'asse "z" verticale (modello 3D), è possibile calcolare lo strain volumetrico ottenuto che risulta pari a 0.97 m^3 (l'analisi riferita allo strain precedente forniva un valore di 6.07 m^3). Con una densità della resina pari a 110 Kg/m^3 il volume iniettato nel foro della prova risulta pari a 0.95 m^3 per cui praticamente coincidente col valore fornito dal modello di analisi geotecnica del continuo alle differenze finite sopra-esposto.

Vista la situazione litostatigrafica e geotecnica fornita dal modello, la presenza di terreni a prevalente componente argilloso-limosa non favorisce senz'altro il drenaggio delle pressioni neutre, pertanto il campo delle tensioni-deformazioni risulta forse più regolato dall'andamento delle pressioni litostatiche totali che da quello delle pressioni litostatiche efficaci.

A questo scopo dalle elaborazioni delle prove penetrometriche pre e post iniezione è possibile calcolare la variazione della pressione litostatica.

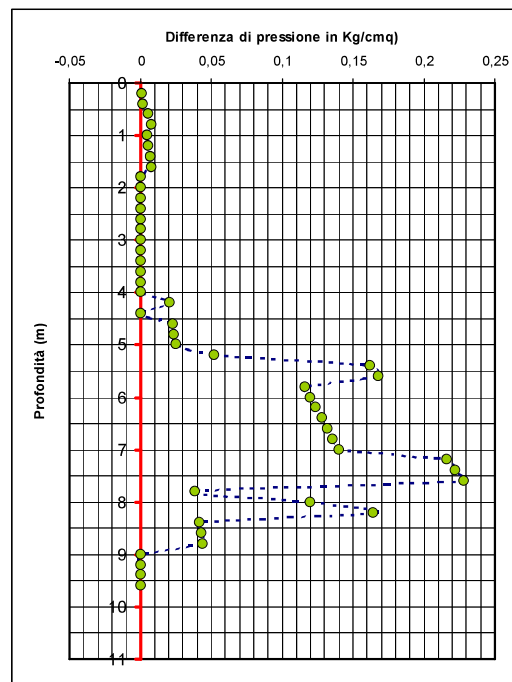
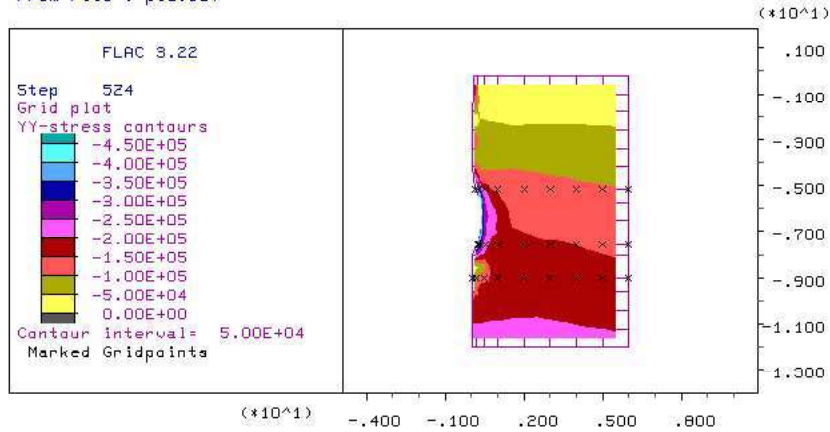


Fig. 10– Variazione della pressione citostatica desinta dall'elaborazione delle prove CPT2 e CPT2A -

L'analogia tra i due bulbi di consolidazione calcolati e misurati appare ancora più evidente nonostante i limiti e le differenze di comparazione.

E' stata quindi eseguita la successiva elaborazione sul modello matematico che ricostruisce l'andamento delle pressioni verticali (fig. 11) e la loro variazione (fig. 11a), in modo tale da proporre un confronto che risulti ottimizzato da un punto di vista dei postulati matematici delle condizioni a contorno.

Job Title : Sperimentazione KZ fora CPT - DEFORMAZIONE PLASTICA
 From File : pla.sav



Job Title : Sperimentazione KZ fora CPT - DEFORMAZIONE PLASTICA
 From File : pla.sav

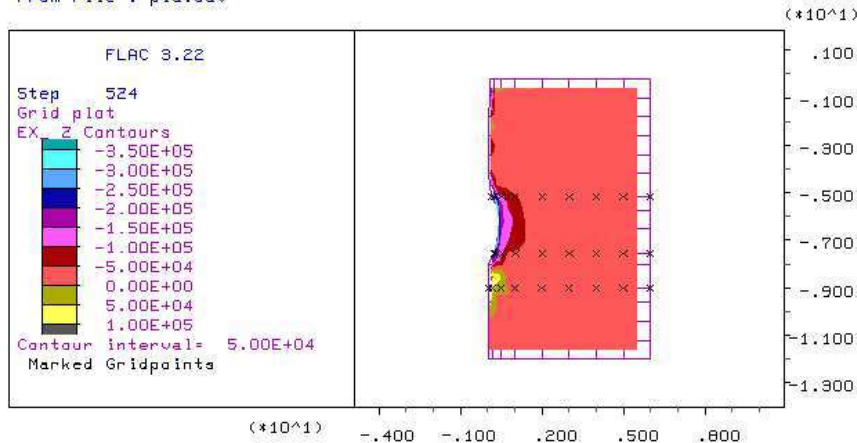


Fig. 11 – andamento delle pressioni verticali e della loro variazione dopo l'iniezione -

Il confronto tra i due modelli suggerisce quanto segue:

- I valori negativi di pressione indicano compressione e quindi aumento di pressione, ciò in piano accordo con quanto rilevato dal modello statistico; i valori positivi indicano dilatazione che, sebbene limitata, non è stata rilevata dal modello statistico (almeno su questa verticale).
- La variazione di pressione orizzontale e verticale diminuisce con legge esponenziale allontanandosi dall'asse dell'iniezione; tale legge può essere rappresentata con la seguente equazione:

$$\Delta\sigma = 4.1549 e^{-1.5431 d}$$

Questa legge è stata ricavata diagrammando i valori di variazione di pressione ottenuti a diverse profondità dal modello matematico in funzione della loro distanza dall'asse di iniezione (fig. 12).

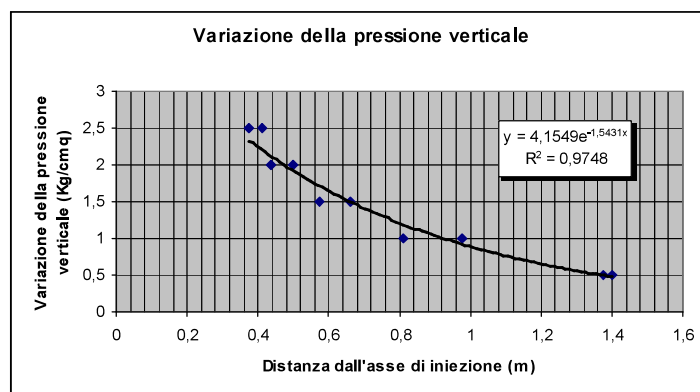


Fig. 12 – relazione tra variazione di pressione verticale e distanza dall'asse di iniezione –

Una analisi critica del modello in relazione alla distribuzione della variazione delle pressioni verticali evidenzia che sebbene vi sia una buona corrispondenza qualitativa del dato in termini quantitativi i valori ottenuti risultino decisamente superiori rispetto a quelli ottenuti ricavando il parametro dai valori della resistenza alla punta.

Questo aspetto che verrà meglio sviscerato nel proseguo, deriva dal fatto che la resina sviluppa una prioritaria azione sulle pressioni orizzontali, per effetto della viazione operata sul rapporto di sovraconsolidazione.

Verifiche geotecniche

Su un totale complessivo di c.a 80 cantieri sono state eseguite indagini geognostiche pre e post iniezione allo scopo di testare i risultati dell'intervento di consolidamento eseguito. Tali indagini riguardano per la maggiore parte dei casi prove penetrometriche statiche e dinamiche; sono state anche però eseguite indagini geofisiche (tomografie elettriche, sismica a rifrazione), analisi di laboratorio su campioni indisturbati, prove di carico su piastra ed altre ancora.

Da questa casistica notevolmente ampia si ricava che in generale l'incremento dei parametri di resistenza risulta inversamente proporzionale ai valori di resistenza iniziale.

Gli spessori di terreno consolidato, ovviamente dipendenti dalla geometria del sistema di iniezione, risultano coerenti col modello qualitativo verificato. L'area consolidata a maggiore consolidazione risulta interposta tra il bulbo di invasione (zona dove si localizza la resina) e la zona a maggiori tensioni (contrasto).

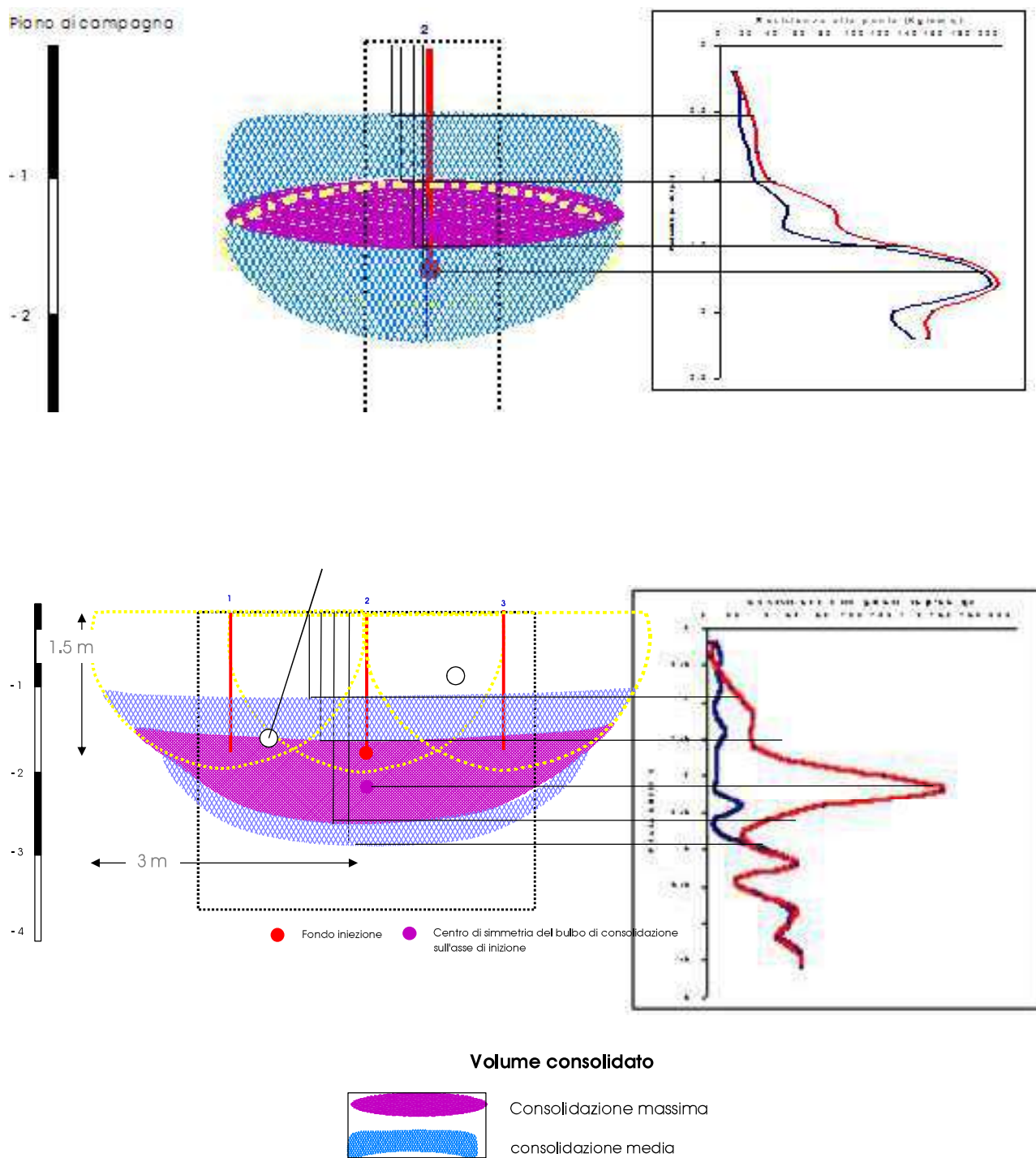


Fig. 13 – Areali di consolidazione e di iniezione dei due campi prova di iniezione contrastata (a) ed iniezione libera (b) e relativi diagrammi delle prove CPT pre e post iniezione

Si rileva inoltre che la variazione della resistenza risulta funzione della distanza dalla base dell'iniezione

Allo scopo di verificare meglio questa affermazione è stata elaborata la diagrammazione successiva (fig. 14) che grafica la variazione della resistenza

penetrometrica in funzione della distanza dalla base dell'iniezione su di una iniezione "confinata" condotta al di sotto del piano di appoggio di una sovrastruttura..

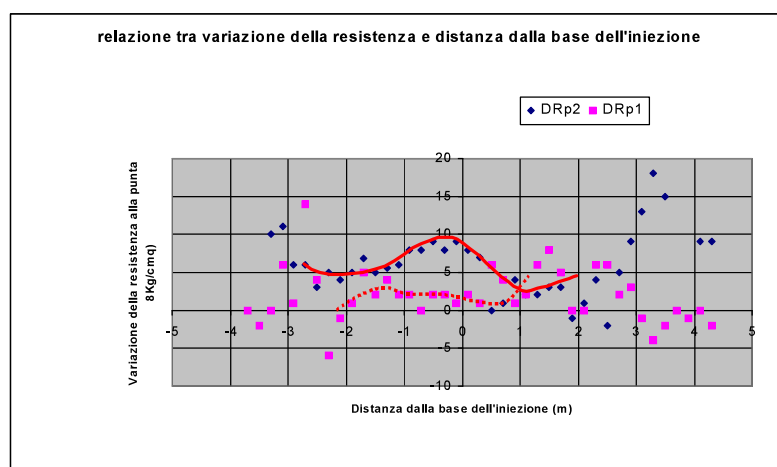


Fig. 14 –variazione di resistenza penetrometrica–distanza base iniezione -

Risultano abbastanza bene visibili, sebbene in forma variamente pronunciata, i due bulbi di consolidazione. La distanza alla quale il massimo di consolidazione si azzerava ($\lambda/2$ della sinusoide) risulta pari a $\lambda=1.5$ m.

Anche dagli esempi illustrati sulle due figure successive emerge che su litologie fini e medio-fini i valori di incremento ed incremento percentuale di resistenza possono anche risultare molto elevati (300%) laddove però i valori di resistenza iniziale risultano scarsi.

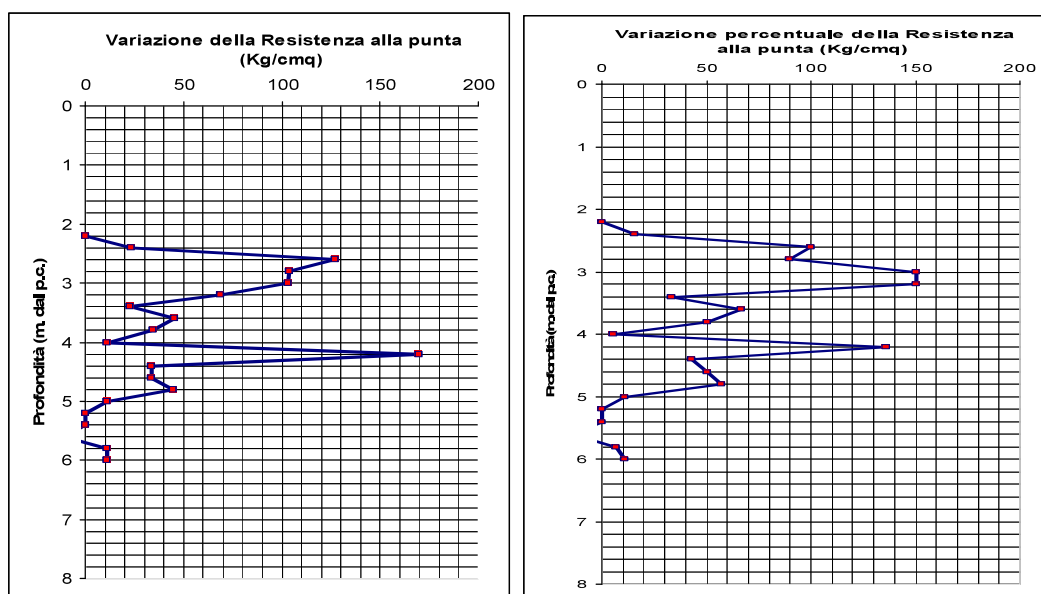


Fig. 15 – Variazione della resistenza alla punta e variazione percentuale di prove CPT pre e post iniezione sul cantiere di Colle Val d'Elsa

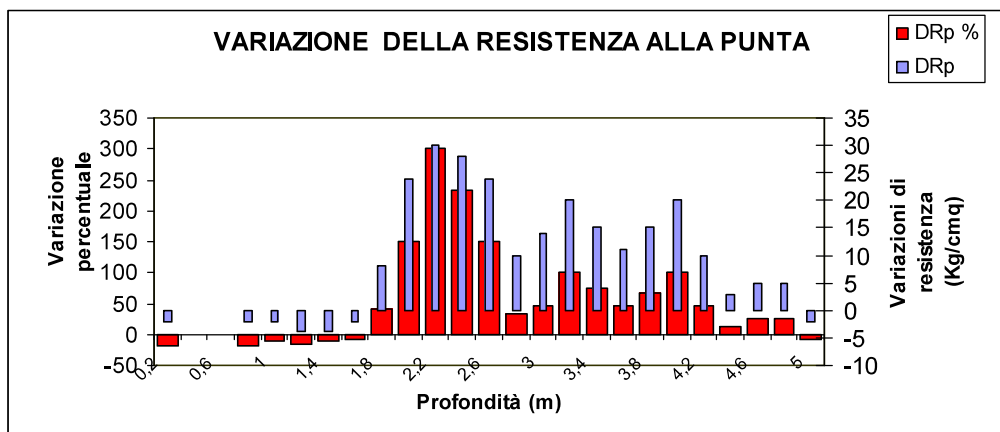


Fig. 16– Variazione della resistenza alla punta e variazione percentuale di prove CPT pre e post iniezione sul cantiere di Castellarano (RE)

Interessante risulta l'esame della prova edometrica eseguita su un campione prima e dopo il consolidamento. Il campione risulta riferito al un litotipo limo argilloso sovra consolidato appartenente ad una formazione del Pliocene.

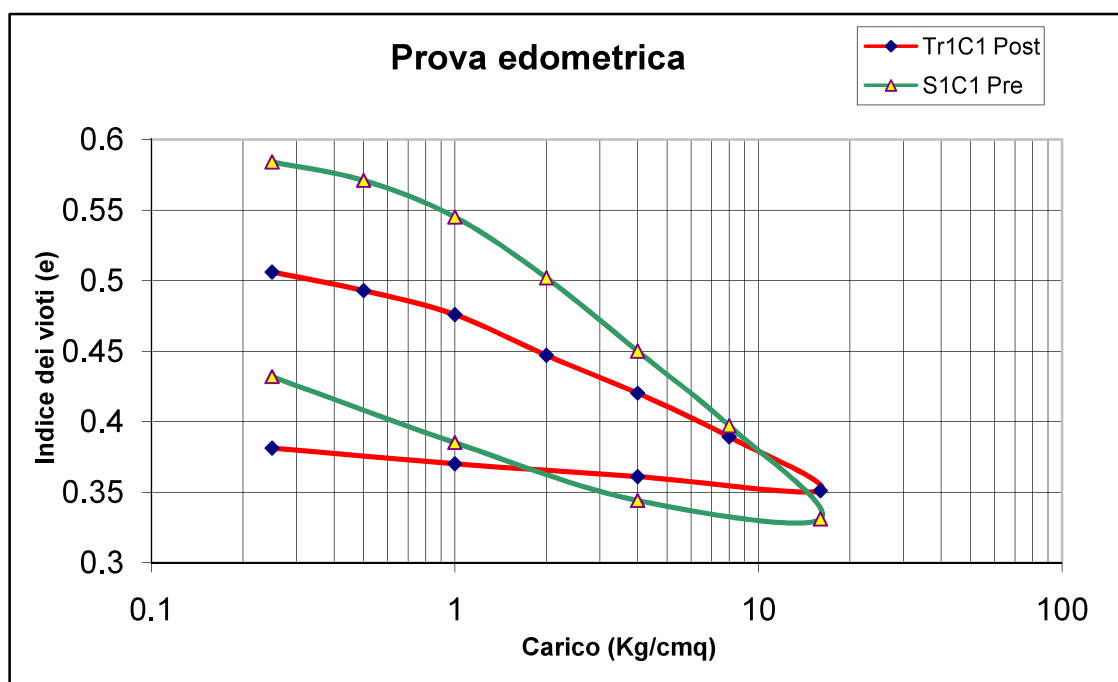


Fig. 17– Prova di consolidazione edometrica su campione pre e post iniezione sul caniere di Casaglia – Montecatini V/C (Pi)

Si nota una discreta riduzione dell'indice dei vuoti iniziale: e_0 passa da 0,72 a 0,517; La pendenza della curva di consolidazione diminuisce sensibilmente con una diminuzione dell'indice di compressione C_c da 0,17 a 0,126.

Il rapporto di sovra consolidazione OCR passa da 4,5 a 10.

Le analisi di laboratorio condotte sui campioni hanno consentito di rilevare anche che nel volume di terreno consolidato il peso di volume aumenta in ragione del fatto che i vuoti diminuiscono aumentando l'addensamento ed ugualmente come abbiamo visto diminuisce l'indice dei vuoti per diminuzione del volume dei vuoti.

Nel volume di terreno iniettato il peso di volume invece diminuisce.

La diminuzione del peso di volume medio della zona invasa determina una diminuzione delle tensioni verticali efficaci al di sotto dei bulbi di consolidazione. Infatti la percentuale del volume di resina sul volume totale del bulbo di iniezione risulta massimo del 6,5% (0,22 mc/3,37 mc) per cui il peso di volume nella zona invasa risulta pari a $\gamma_{nat}=1,89$ t/mc (tale valore, ottenuto per via di calcolo, risulta abbastanza in linea con quello misurato in laboratorio di 1,7 t/mc), considerando un $\gamma_{nat}=2$ T/mc, un volume medio del bulbo di iniezione di 3,37 mc ed un volume medio di resina iniettata di 0,22 mc)

Il rapporto tra le tensioni verticali efficaci nei due stati risulta:

$$s'v(OC)/s'v(NC)=1,89/2=0,945$$

per cui la tensione verticale efficace diminuisce di un fattore 0,94

Questo effetto risulta comunque abbastanza trascurabile nel complesso delle azioni sulle tensioni litostatiche totali ed efficaci verticali anche perché come abbiamo visto il peso di volume del bulbo di consolidazione, esterno e parzialmente sovrapposto al bulbo di invasione, aumenta per cui in buona sostanza la variazione delle tensioni litostatiche verticali non risulta eccessiva. Tale fatto risulta in pieno accordo con i valori sperimentali misurati di tensioni desunti dalle prove penetrometriche pre e post iniezioni analizzati in raffronto ai risultati del modello matematico di iniezione.

L'incremento del rapporto di sovraconsolidazione del terreno consolidato determina una variazione del coeff. di spinta a riposo secondo la relazione:

$$K_0(OC) = K_0(NC) \times OCR \exp 0.58IP^{-0.12}$$

Considerando un $OCR_{medio}=3$; $K_0(OC) = K_0(NC) \times 1.7$

La tensione orizzontale data dalla $\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$ aumenta di un fattore 1,7 e maggiore per $OCR>3$. Ne consegue un discreto aumento delle tensioni citostatiche orizzontali. Tale risultato risultato, desunto per via analitica dai risultati delle prove di laboratorio risulta in pieno accordo con i risultati del modello matematico esposto ai paragrafi precedenti.

Elaborazioni statistiche

Allo scopo di approfondire l'analisi sugli effetti dell'impiego di tale tecnica nell'azione di miglioramento delle caratteristiche del terreno sotto il profilo dei parametri fisici, di resistenza al taglio e di compressibilità sono state eseguite una serie di elaborazioni statistiche sui cantieri di consolidamento che abbiamo seguito negli anni. L'analisi eseguita non risulta sicuramente esaustiva dell'intero panorama delle condizioni geologiche, geotecniche, stratigrafiche, strutturali e tecnologiche esistenti pur tuttavia può rappresentare un buono spunto per i tecnici del settore sui risultati della tecnica.

Allo scopo di verificare in forma più analitica le variazioni percentuali della resistenza penetrometrica in funzione dei valori iniziali di resistenza è stata presa una serie significativa di dati a loro volta mediati e corretti in funzione della profondità (v. fig.18)

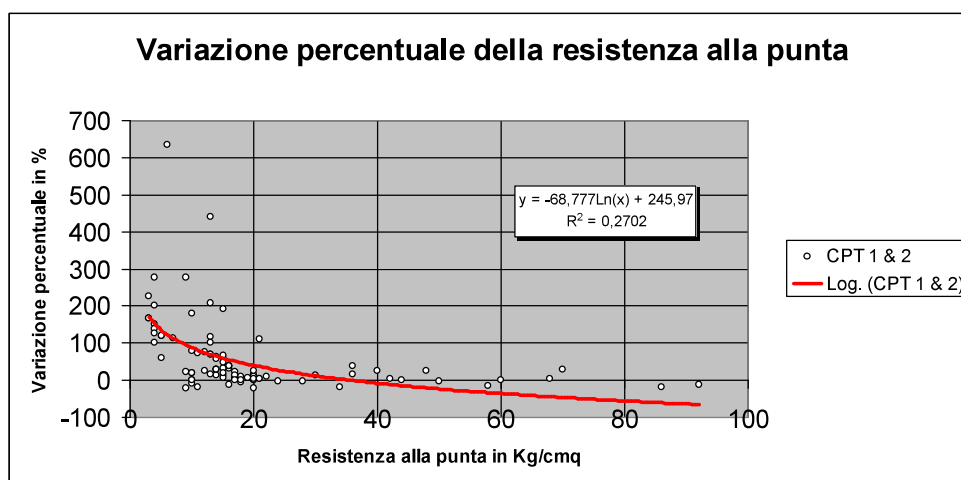


Fig. 18 –Correlazione variazione percentuale resistenza alla punta-resistenza alla punta -

Come si nota, sebbene i valori risultino abbastanza dispersi (deviazione standard $R^2=0.27$), è evidenziabile un trend generale di correlazione logaritmica tra la variazione percentuale ed i valori di resistenza.

L'equazione ricavata relativa al singolo strato iesimo risulta la seguente:

$$\Delta R_{pi} (\%) = - 68.777 \ln(R_{pi}) + 245.97$$

Tale relazione mostra valori negativi e quindi può essere ritenuta valida per $R_p < 40 \text{ Kg/cm}^2$

Un'analisi più approfondita e critica del case history della distribuzione dei valori ha condotto alla redazione della tabella 4, riportata sotto:

	Variazione percentuale della resistenza ΔR_p
Resistenza alla punta $R_p < 5 \text{ Kg/cm}^2$	100÷300
Resistenza alla punta $5 < R_p < 15 \text{ Kg/cm}^2$	40÷150
Resistenza alla punta $15 < R_p < 25 \text{ Kg/cm}^2$	5÷60
Resistenza alla punta $25 < R_p < 40 \text{ Kg/cm}^2$	0÷30
Resistenza alla punta $R_p > 40 \text{ Kg/cm}^2$	0÷20

Tab. 4 – Variazione percentuale della resistenza CPT in funzione della resistenza iniziale

I valori di resistenza al taglio (τ), valutati in termini del solo incremento di coesione (C_u) non drenata ricavata da prove Vane test su carote di sondaggi e da prove ELL, risultano variabili tra 5% e 40% sui bulbi di consolidazione, con valori bene superiori (50%-200%) là dove esiste la presenza di orizzonti incompressibili di appoggio (espansione confinata della resina).

L'analisi dei valori di compressibilità ha condotto alla valutazione di un incremento dei valori di modulo edometrico (M_o nell'intervallo di carico 100-200 Kpa) compresi tra 10% ed il 50%

Kg/cm², anche in questo caso con valori ben superiori (50-200 %) in caso di espansione confinata della resina.

Sulla base di quanto precedentemente esposto sulle variazioni dei parametri geotecnici, sia di resistenza al taglio che di compressibilità, sono state successivamente eseguite una serie di elaborazioni finalizzate alla verifica della variazione di grandezze derivate e più precisamente il carico di rottura ed i cedimenti. Tali grandezze, solo parzialmente connessi alla variazione delle caratteristiche geotecniche del terreno di appoggio e date dall'intervento di consolidamento, risultano in realtà di più immediata lettura per una analisi preliminare e qualitativa del problema.

Per le verifiche di resistenza si può rilevare un maggiore incremento percentuale del carico di rottura calcolato con i metodi che tengono conto solamente delle caratteristiche di resistenza al taglio del terreno (27%, - 35%).

La successiva analisi statistica condotta su 9 progetti di consolidamento, mostrata in tab. 5 è stata eseguita allo scopo di verificare la dispersione dei valori ottenuti determinando nel contempo il valore medio del calcolo che ammonta al 25% di incremento

<i>Dss(%)</i>	
Media	25,9601
Errore standard	6,113272
Mediana	20,4461
Moda	#N/D
Deviazione standard	18,33982
Varianza campionaria	336,3488
Curtosi	-0,010224
Asimmetria	0,730114
Intervallo	55,33898
Minimo	4,661017
Massimo	60
Somma	233,6409
Conteggio	9
Più grande(1)	60
Più piccolo(1)	4,661017
Livello di confidenza(95,0%)	14,09724

Tab. 5 Analisi statistica sulla variazione del carico di rottura

Le fenomenologie statisticamente più diffuse che determinano l'innescio di fessurazioni sulle strutture sono legate a elevati valori di compressibilità o a variazioni dei parametri di compressibilità del terreno di fondazione.

Allo scopo di verificare la bontà dell'intervento di consolidazione con le tecniche di iniezione di resine espandenti diviene quindi molto importante la determinazione delle variazioni dei valori di compressibilità dei terreni di fondazione.

L'analisi statistica riportata in Tab 6 è stata eseguita su un totale di 24 progetti di consolidamento eseguiti

<i>Ds</i>		<i>Ds%</i>	
Media	0,331917	Media	25,39881
Errore standard	0,04228	Errore standard	2,029291
Mediana	0,345	Mediana	19,55655
Moda	#N/D	Moda	#N/D
Deviazione standard	0,20713	Deviazione standard	9,941457
Varianza campionaria	0,042903	Varianza campionaria	98,83257
Curtosi	-0,515827	Curtosi	-1,777307
Asimmetria	0,532964	Asimmetria	0,32855
Intervallo	0,707	Intervallo	25,10612
Minimo	0,033	Minimo	14,51429
Massimo	0,74	Massimo	39,6204
Somma	7,966	Somma	609,5715
Conteggio	24	Conteggio	24
Più grande(1)	0,74	Più grande(1)	39,6204
Più piccolo(1)	0,033	Più piccolo(1)	14,51429
Livello di confidenza(95,0%)	0,087463	Livello di confidenza(95,0%)	4,197903

Tab. 6 – Analisi statistica sulla variazione e sulla variazione percentuale dei cedimenti

I valori della media e della mediana della distribuzione statistica ci indicano che la diminuzione del cedimento a seguito dell'azione di addensamento prodotta dall'iniezione può essere valutata pari al 25 % del cedimento calcolato prima dell'intervento. Per quanto concerne poi i valori di cedimento differenziale e distorsione angolare conseguenti, il miglioramento dipende molto dall'uniformità raggiunta nell'intervento di consolidazione. In generale si può affermare che un maggiore consolidamento, là dove si ha un terreno scadente, porta come conseguenza un appiattimento dei valori del cedimento e quindi un annullamento dei cedimenti differenziali, se non conseguenti a flessibilità della opere fondali.

Attualmente la tecnologia è ancora in fase di evoluzione. Sono in corso studi sperimentali finalizzati alla verifica dei risultati ottenuti da iniezioni combinate con più tipologie di resine che consentono di variarne la densità e la pressione di rigonfiamento.