

Politecnico di Milano
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Piazza Leonardo da Vinci,32
20133 Milano



Relazione preliminare

“Analisi preliminari per la caratterizzazione meccanica ed idraulica del materiale iniettato nel primo lotto e relativa stima dei cedimenti e dei tempi di collasso dei pilastri”



Relatore:
Prof. Ing. Roberto Nova



*Analisi preliminari per la caratterizzazione meccanica ed idraulica
del materiale iniettato nel primo lotto*

1. Prove sul materiale estratto

Nella presente sezione vengono riportati i risultati di prove geomeccaniche effettuate sul materiale estratto dal livello più basso della Cava Carale di Santa Brigida (BG) a valle del primo lotto dell'intervento di messa in sicurezza del sistema minerario abbandonato.

Il materiale è stato estratto nel mese di Ottobre 2006 (Fig. 1), mediante carotaggio in continuo, utilizzando in alcuni tratti carotieri Shelby al fine di minimizzare il disturbo del materiale.

In particolare verranno presentati i risultati delle prove di:

- a) caratterizzazione geomeccanica (granulometrie e limiti di Atterberg)
- b) prove di compressione monoassiale
- c) prove edometriche

Per ciascun provino si riporta il Sondaggio da cui è stato estratto e relativa profondità.



Fig. 1: Operazioni di estrazione del materiale iniettato

1.1. Curva Granulometrica e Limiti di Atterberg

Le curve granulometriche sono state eseguite utilizzando la serie dei setacci per la frazione con diametro superiore a 0.075mm e l'aereometria (con densimetro) per la frazione fine. Si riporta anche la curva granulometrica per il terreno residuale alterato recuperato tra la miscela iniettata ed il fondo della galleria scavata nel gesso.

a) Miscela iniettata

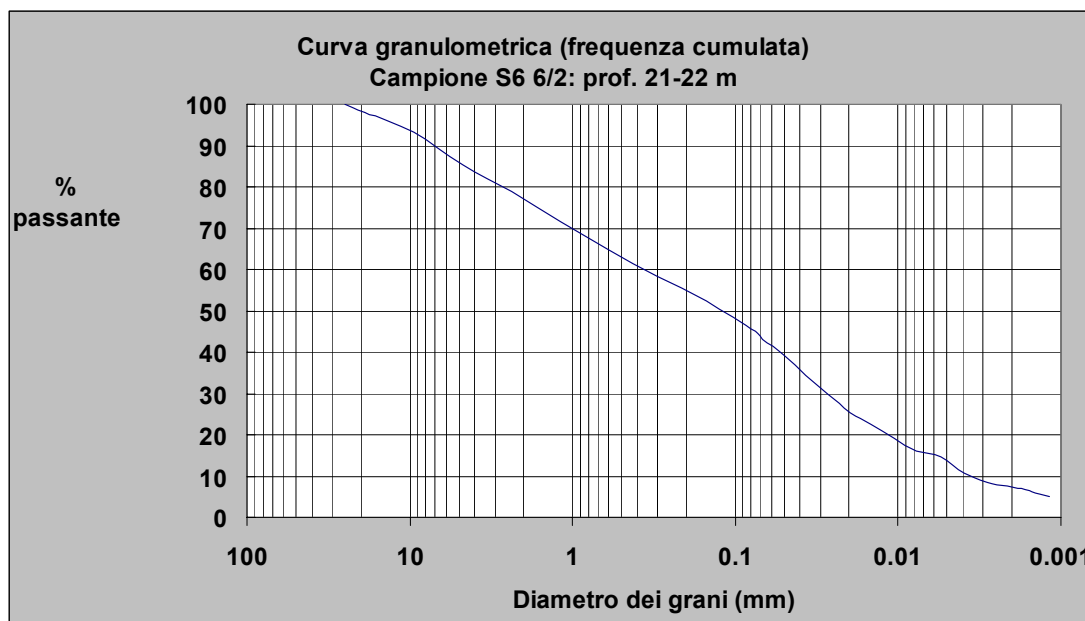


Fig. 2: Curva granulometrica miscela iniettata: Sondaggio S6 spezzone 6/2 prof. 21-22 m

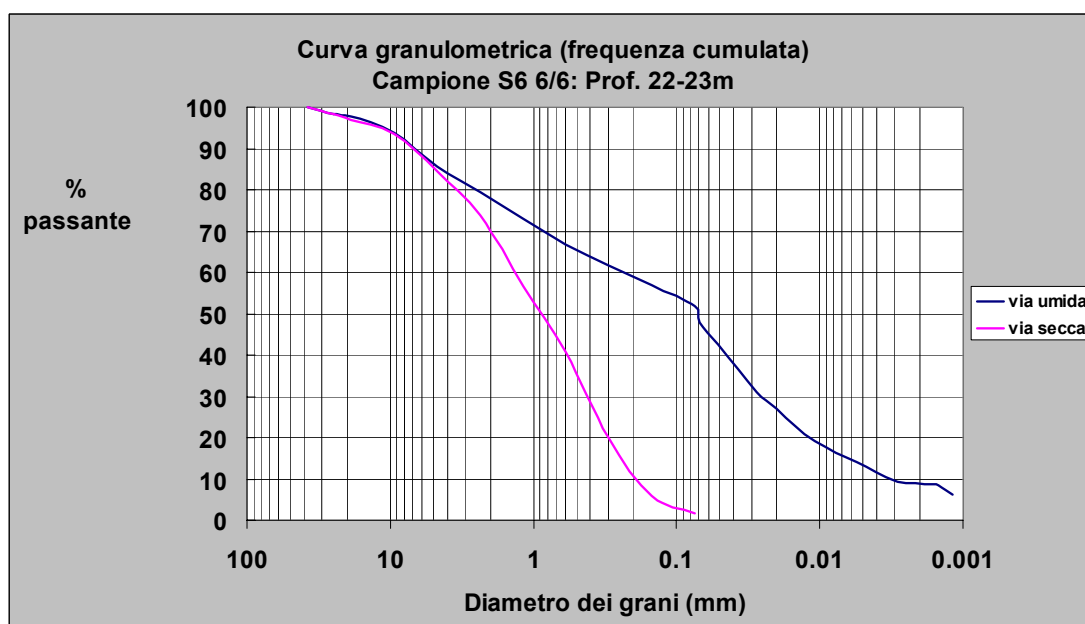


Fig. 3: Curva granulometrica miscela iniettata: Sondaggio S6 spezzone 6/6 prof. 22-23 m



Limite liquido	
P.L.U. [g]	12.49
P.L.S. [g]	9.97
Tara [g]	2.53
P.N.S. [g]	7.44
Peso Acqua [g]	2.52
contenuto d'acqua	0.33871
Limite liquido [%]	33.9
Limite plastico	
P.L.U. [g]	4.39
P.L.S. [g]	3.94
Tara [g]	2.35
P.N.S. [g]	1.59
Peso Acqua [g]	0.45
contenuto d'acqua	0.283019
Limite plastico [%]	28.3
Indice di Plasticità	5.6

Fig. 4: Limiti di Atterberg: Sondaggio S6 spezzone 6/6 prof. 22-23 m

b) Fanghi di gesso (terreno residuale di alterazione)

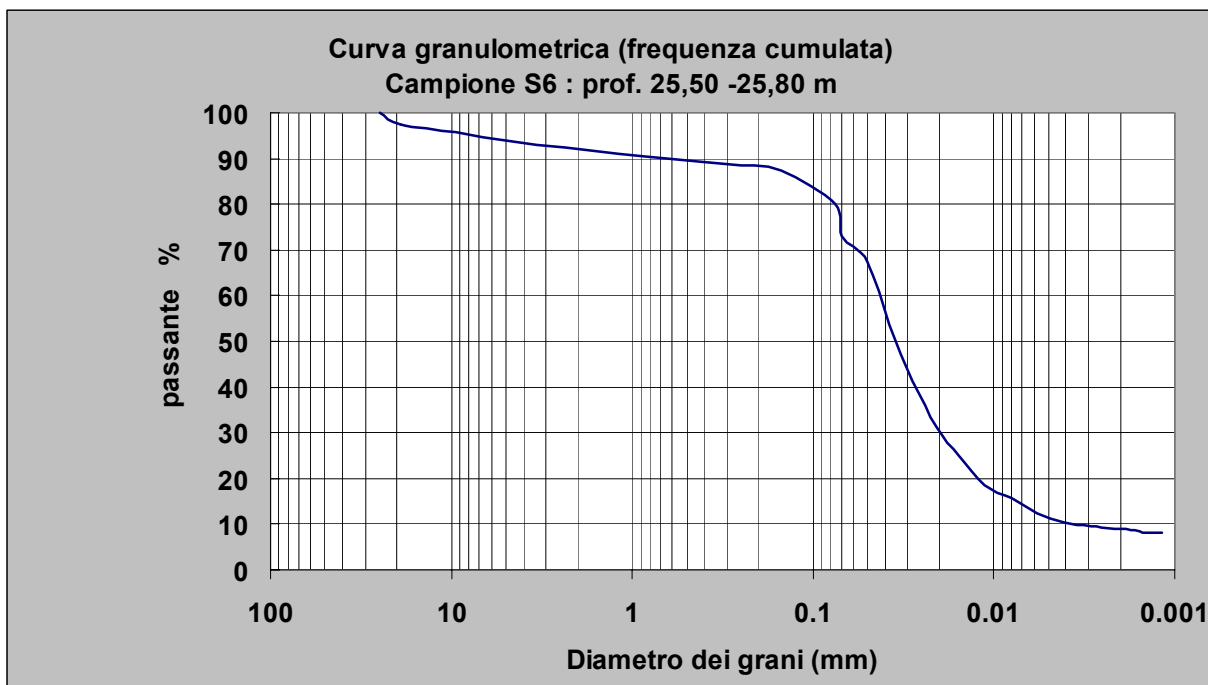


Fig. 5: Curva granulometrica fanghi di gesso: Sondaggio S6 prof. 25,50-25,80 m

Limite liquido	
P.L.U. [g]	32.08
P.L.S. [g]	27.04
Tara [g]	2.45
P.N.S. [g]	24.59
Peso Acqua [g]	5.04
contenuto d'acqua	0.204961
Limite liquido [%]	20.5
Limite plastico	
P.L.U. [g]	4.45
P.L.S. [g]	4.3
Tara [g]	2.43
P.N.S. [g]	1.87
Peso Acqua [g]	0.15
contenuto d'acqua	0.080214
Limite plastico [%]	8.0
Indice di Plasticità	12.5

Fig. 6: Limiti di Atterberg: fanghi di gesso: Sondaggio S6 prof. 25,50-25,80 m

1.2. Prove monoassiale

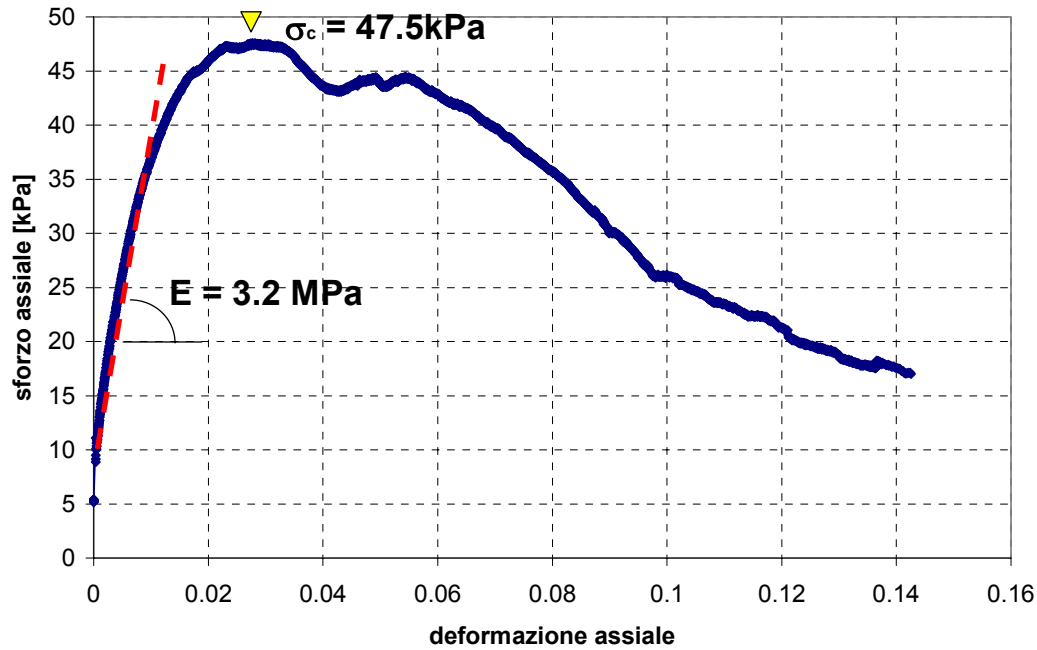
Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle prove monoassiali eseguite su campioni cilindrici ricavati direttamente dalle carote (Fig. 7)



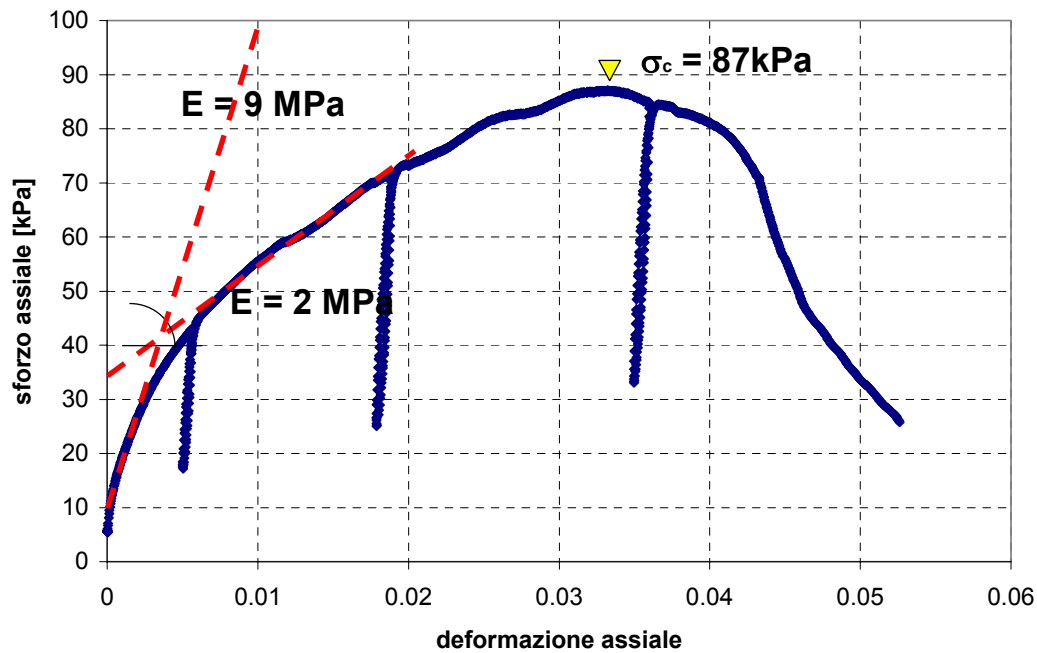


Fig. 7: Prove monoassiali su miscela iniettata

Prova monoassiale Provino T1_6A: Sondaggio 6 Spezzone 1

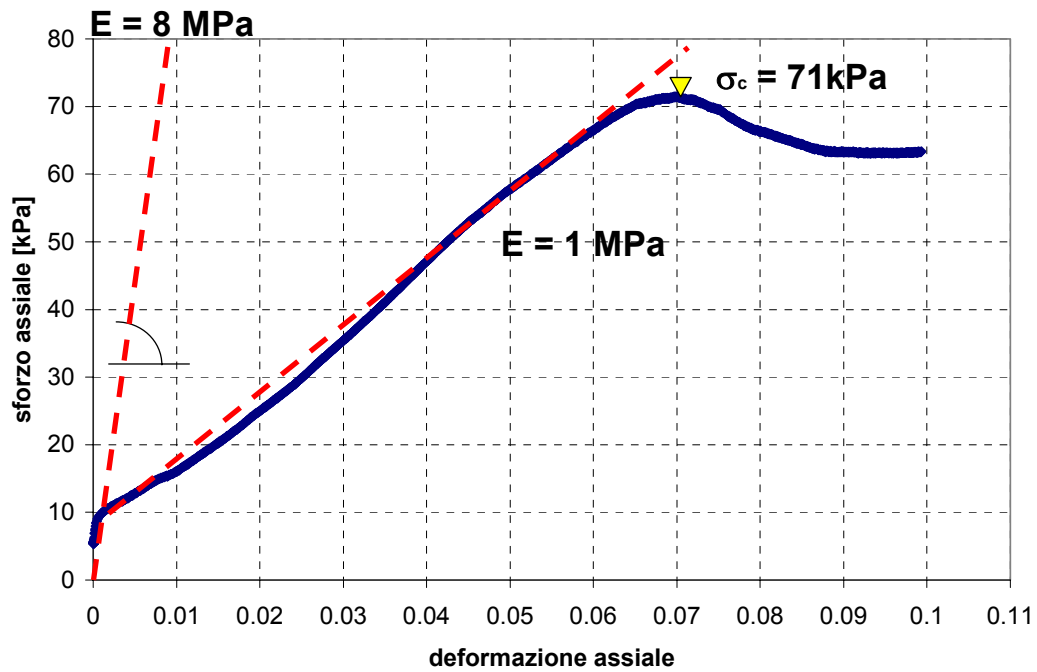


Prova monoassiale Provino T 7_6: Provino T1_6A: Sondaggio 6 Spezzone 7

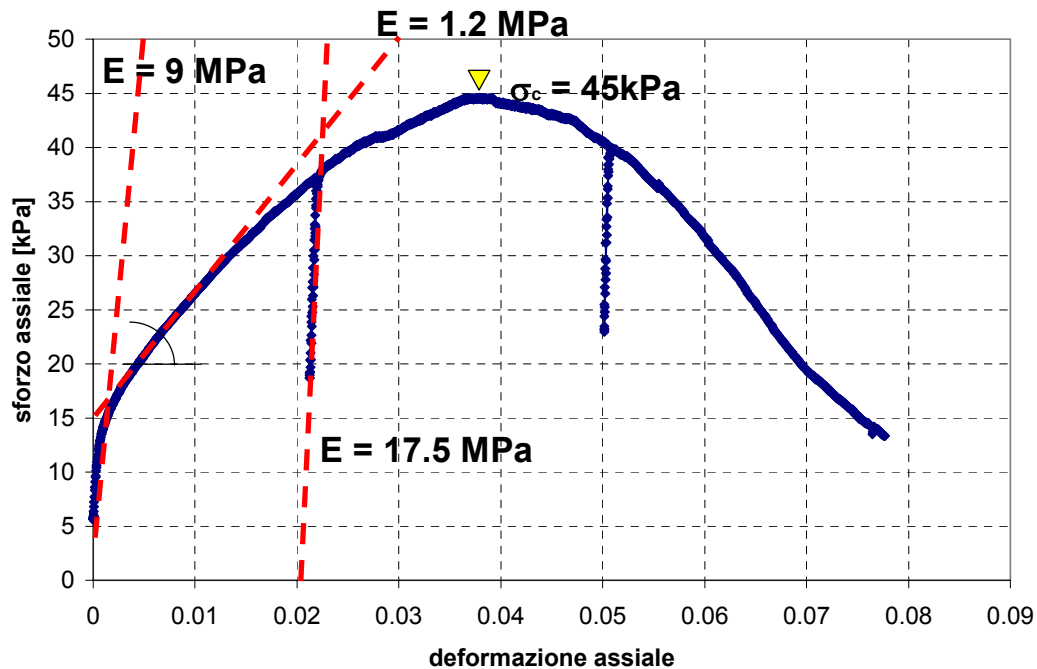




Prova monoassiale Provino T 11_S5 : Sondaggio 5 Spezzone 11

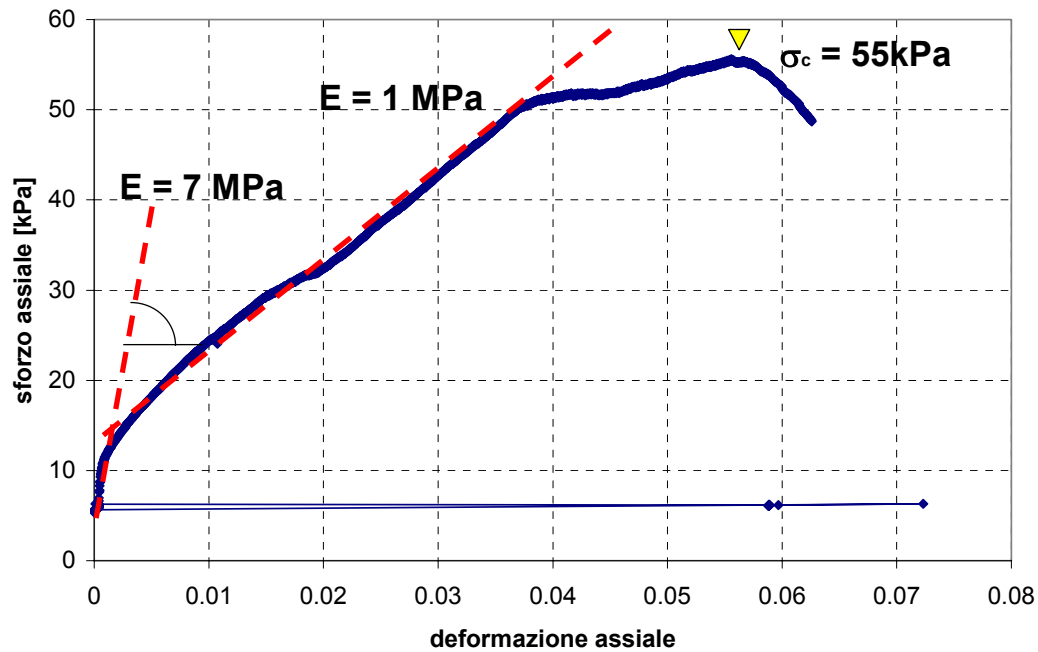


Prova monoassiale Provino T 13_5: Sondaggio 5 Spezzone 13

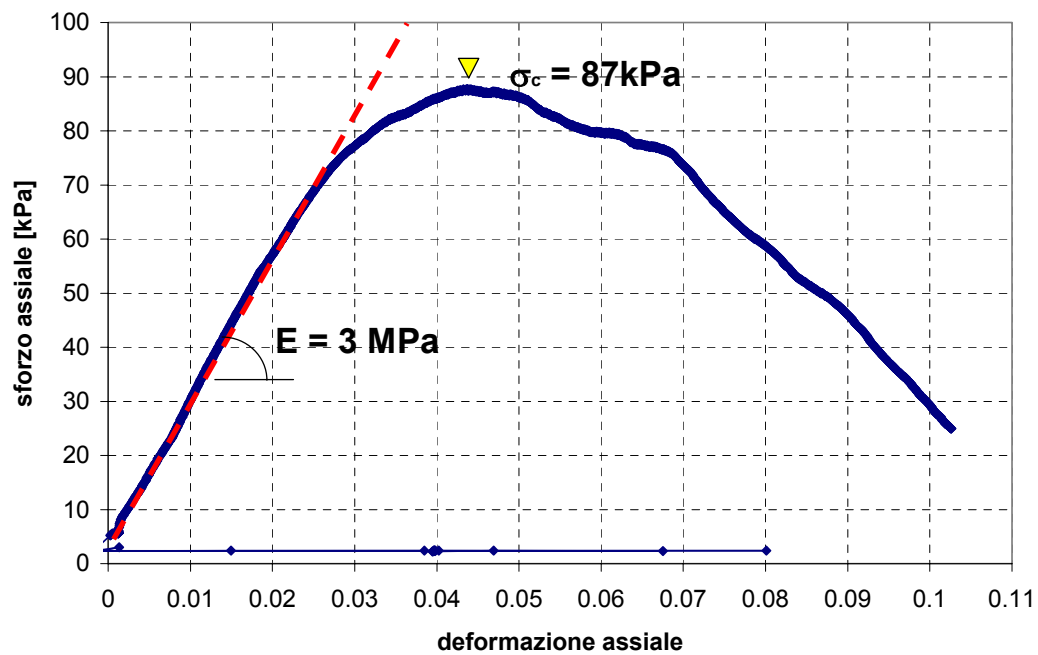


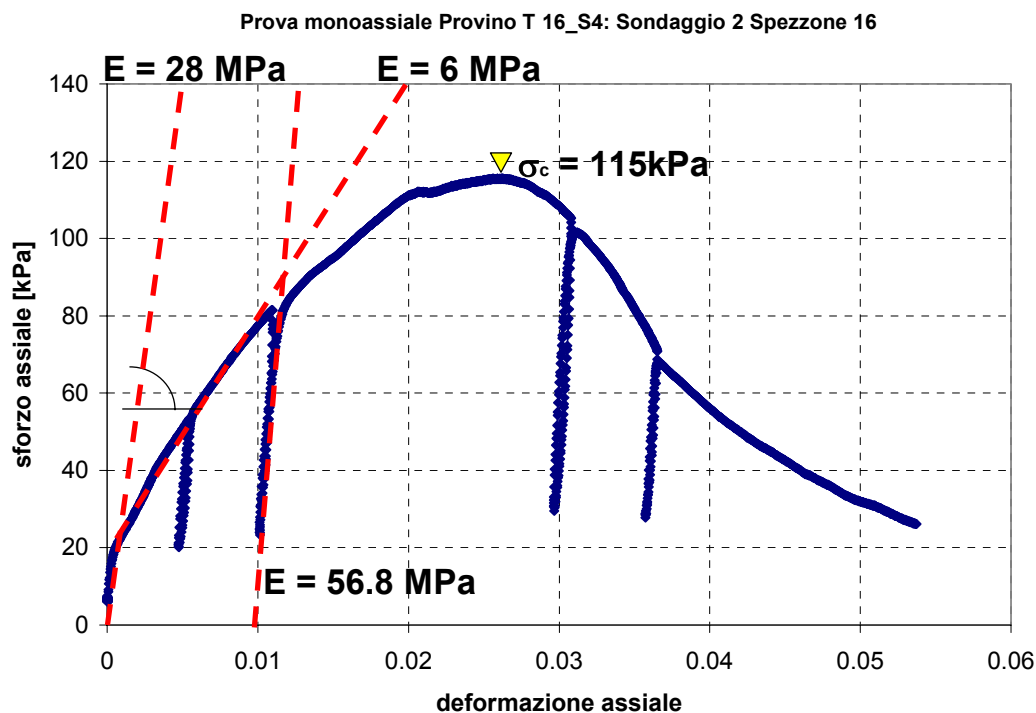


Prova monoassiale Provino T 13_6 : Sondaggio 6 Spezzone 13



Prova monoassiale Provino T 14_S4 : Sondaggio 4 Spezzone 14





1.3. Prove Edometriche

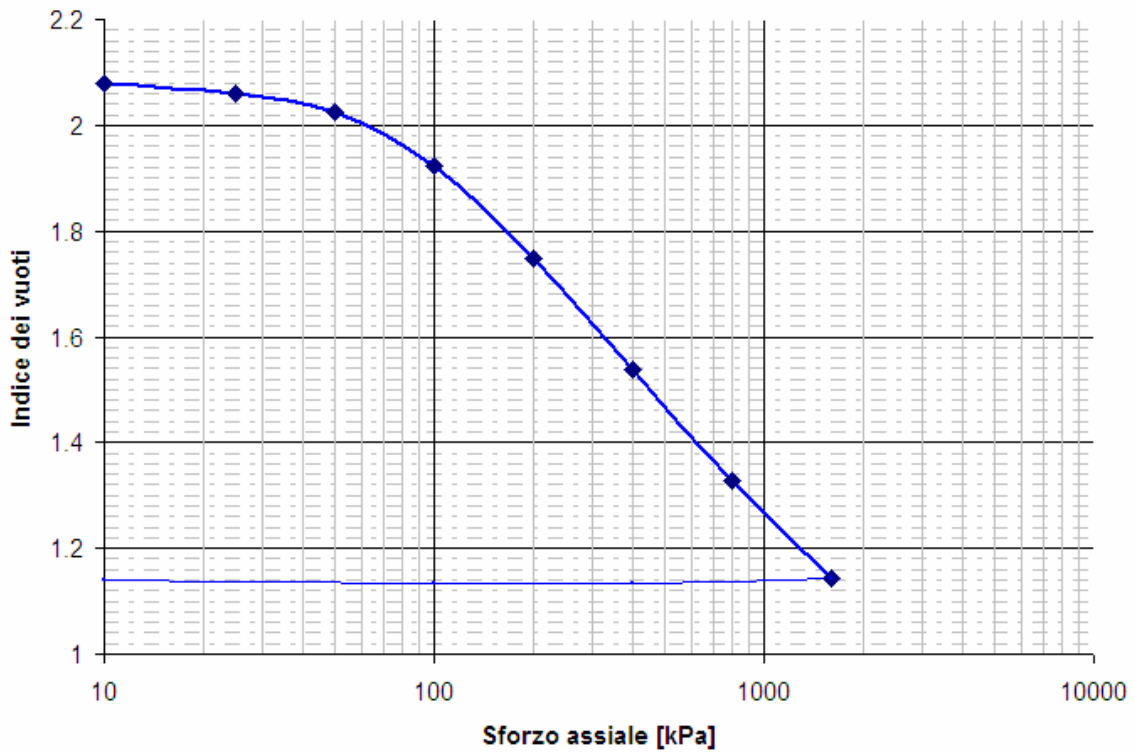
Nel presente sezione si riportano i risultati di due prove edometriche eseguite su provini indisturbati di miscela iniettata. Da tali prove è possibile ricavare utili informazioni per applicare il modello teorico per la predizione dei tempi di collasso e dei cedimenti così come proposto nell'ambito del primo lotto.

a) Prova edometrica miscela iniettata Sondaggio 2 Prof. 20.90-21.10m

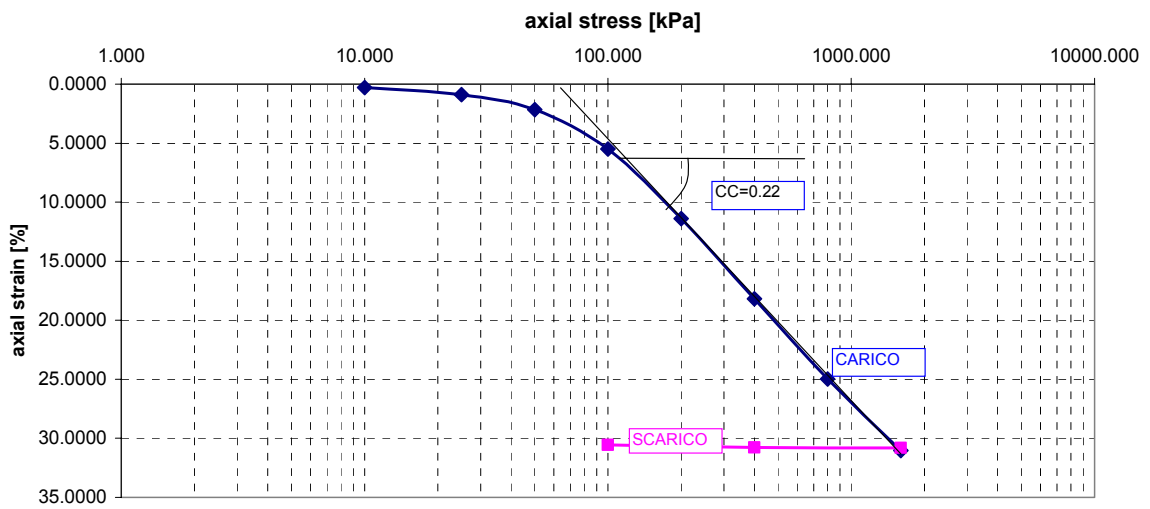
DATI MATERIALE		Sondaggio S2 prof. 20.90-21.10m	
γ_s [g/cm ³]	2.7	γ_w [g/cm ³]	1
volume solido [mm ³]	31266.67	Wf [g]	35.06
volume vuoti [mm ³]	35665.59	w	0.415304
		volume acqua [mm ³]	35060
		S (grado di saturazione)	0.98302



curva edometrica: $\log(\sigma'_a - e)$: Sondaggio 2, Prof. 20.90-21.10m

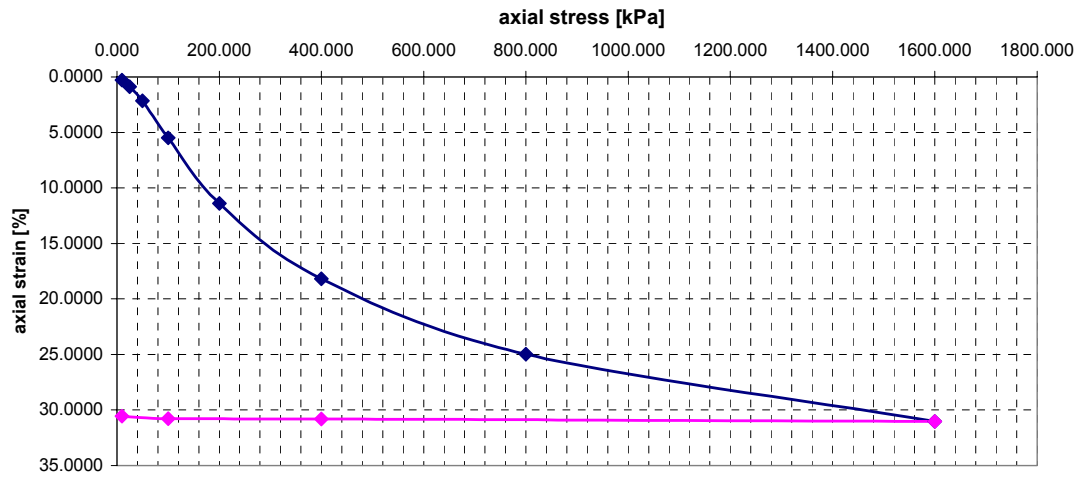


Curva di compressione edometrica Sondaggio 2, Prof. 20.90-21.10m

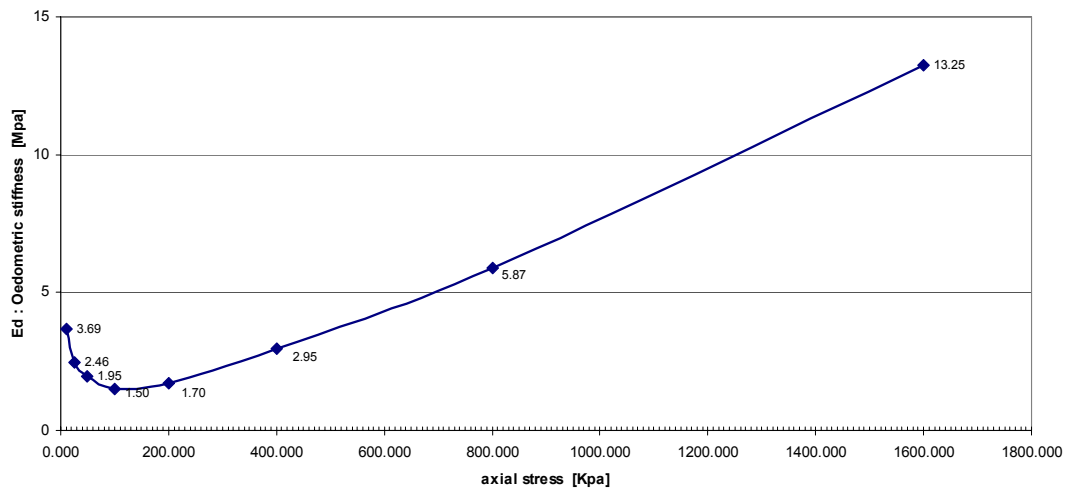




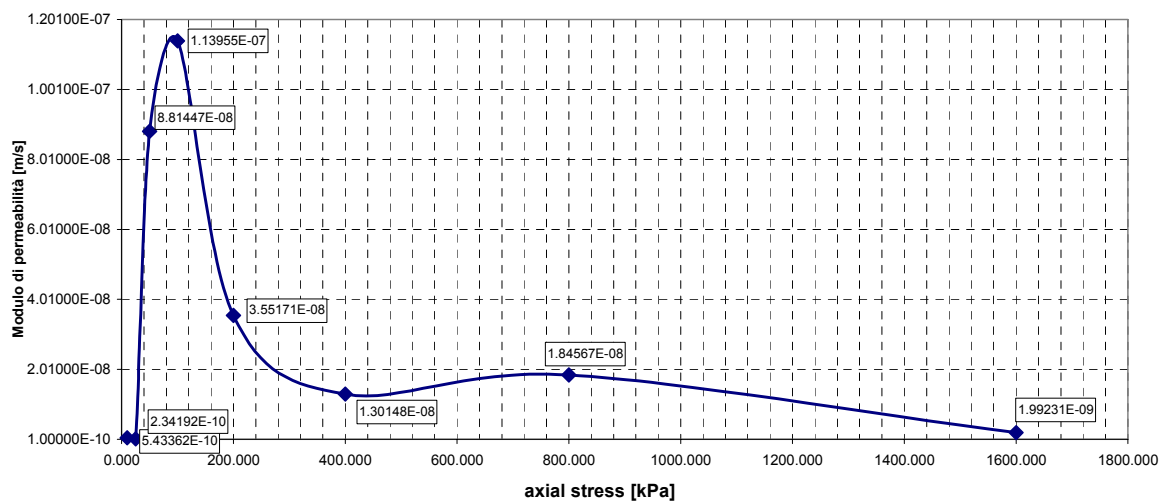
Curva di compressione edometrica: Sondaggio 2, Prof. 20.90-21.10m



modulo di rigidità edometrica : Sondaggio 2, Prof. 20.90-21.10m

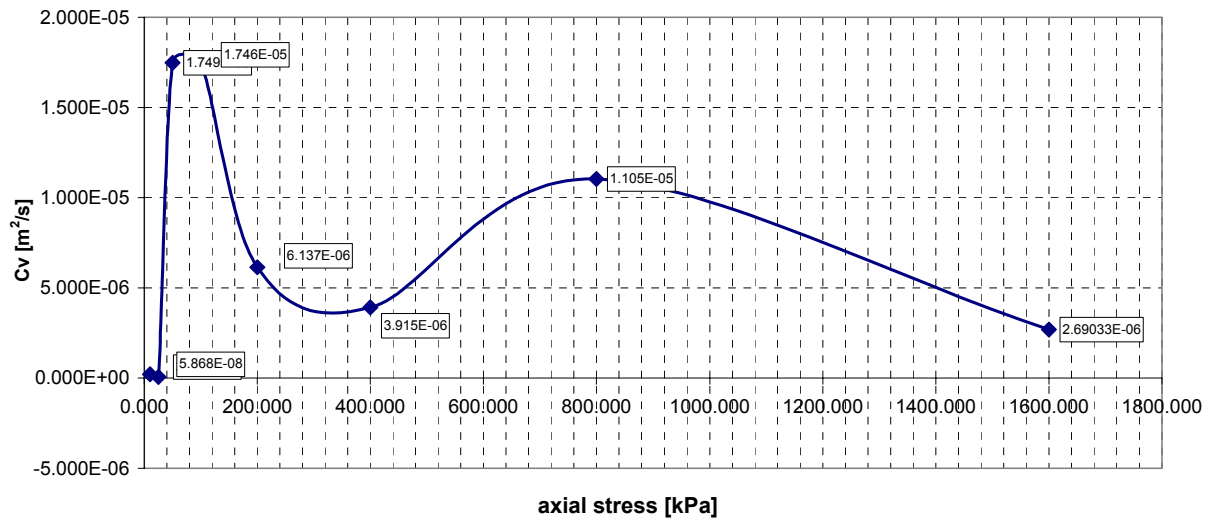


Modulo di permeabilità : Sondaggio 2, Prof. 20.90-21.10m



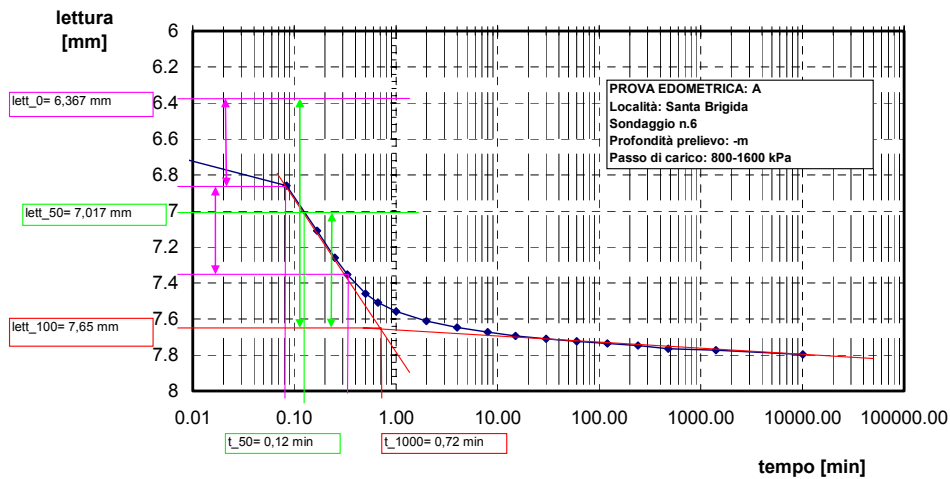


Coefficiente di Consolidazione C_v [m^2/s] : Sondaggio 2, Prof. 20.90-21.10m

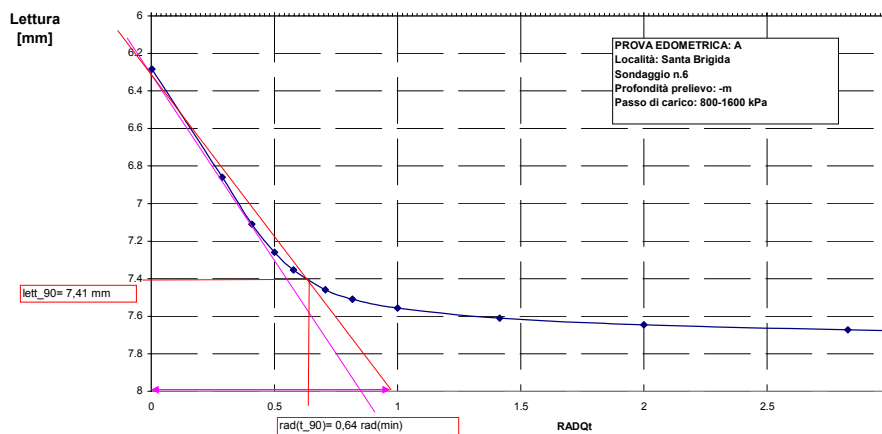


Esempio di rielaborazione passi : Sondaggio 2 Prof. 20.90-21.10m

Metodo di Casagrande



Metodo di Taylor





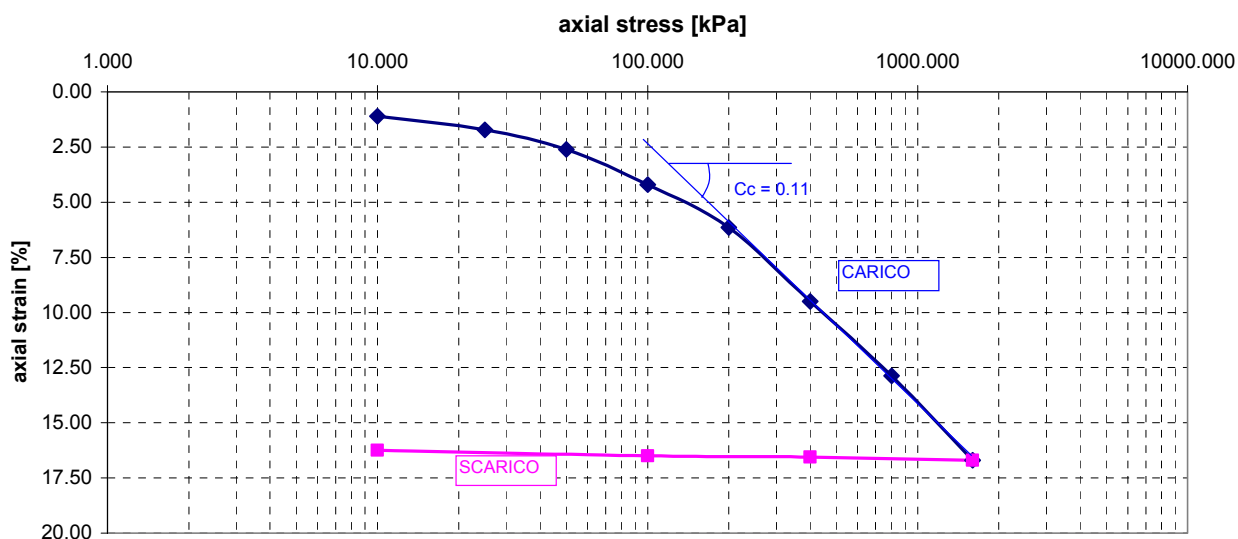
100-200 Kpa			200-400 Kpa			400-800 Kpa			800-1600 Kpa		
tempo [min]	lettura [mm]	RADq(TIME)	tempo [min]	lettura [mm]	Rad(Tempo)	tempo [min]	lettura [mm]	RADq(TIME)	tempo [min]	lettura [mm]	RADq(TIME)
0.00001	1.378	0.003	0.00001	2.857	0.0032	0.00001	4.575	0.003	0.00001	6.283	0.00316228
0.0833	1.450	0.289	0.1167	3.732	0.3416	0.0833	5.724	0.289	0.0833	6.859	0.28861739
0.1667	2.185	0.408	0.2000	4.030	0.4472	0.1667	5.861	0.408	0.1667	7.11	0.40828911
0.2500	2.523	0.500	0.2833	4.168	0.5323	0.2500	5.935	0.500	0.2500	7.26	0.5
0.3333	2.618	0.577	0.4500	4.305	0.6708	0.3333	5.987	0.577	0.3333	7.353	0.5773214
0.5000	2.670	0.707	0.6167	4.354	0.7853	0.5000	6.053	0.707	0.5000	7.459	0.70710678
0.6667	2.703	0.817	1	4.396	0.9747	0.6667	6.059	0.817	0.6667	7.509	0.81651699
1	2.721	1.000	2	4.440	1.3964	1	6.1	1.000	1	7.557	1
2	2.754	1.414	4	4.466	1.9875	2	6.137	1.414	2	7.611	1.41421356
4	2.775	2.000	8	4.488	2.8196	4	6.163	2.000	4	7.646	2
8	2.790	2.828	15	4.499	3.8665	8	6.186	2.828	8	7.673	2.82842712
15	2.802	3.873	30	4.511	5.4727	15	6.198	3.873	15	7.693	3.87298335
30	2.813	5.477	60	4.522	7.7427	30	6.212	5.477	30	7.709	5.47722558
60	2.822	7.746	120	4.530	10.9522	60	6.221	7.746	60	7.724	7.74598669
120	2.829	10.954	240	4.540	15.4903	120	6.233	10.954	120	7.736	10.9544512
240	2.836	15.492	480	4.556	21.9078	240	6.244	15.492	240	7.747	15.4919334
480	2.844	21.909	1516	4.561	38.93584467	420	6.252	20.494	480	7.766	21.9089023
1400	2.857	37.417	2850	4.575	53.38539126	4340	6.278	65.879	1408	7.772	37.5233261
						5526	6.283	74.337	10086	7.797	100.429079
defv(%)= 5.899481452			defv(%)= 6.77702433			defv(%)= 6.812923813			defv(%)= 6.039090546		
Casagrande			Casagrande			Casagrande			Casagrande		
t_50	0.87	min	t_50	0.25	min	t_50	0.125	min	t_50	0.12	min
lett_50	1.515	mm	lett_50	3.81	mm	lett_50	5.818	mm	lett_50	7.02	mm
H50	23.555		H50	21.26		H50	19.252		H50	18.05	
cv=Tv*H^2/t	31.24949796	mm ² /min	cv=Tv*H^2/t	88.5896856	mm ² /min	cv=Tv*H^2/t	145.2906856	mm ² /min	cv=Tv*H^2/t	133.08025	mm ² /min
cv=Tv*H^2/t	5.20825E-07	m ² /sec	cv=Tv*H^2/t	1.4765E-06	m ² /sec	cv=Tv*H^2/t	2.42151E-06	m ² /sec	cv=Tv*H^2/t	2.218E-06	m ² /s
lett_100	2.74	mm	lett_100	4.45	mm	lett_100	6.165	mm	lett_100	7.65	mm
defv(%)= 10.92939769			defv(%)= 17.7502992			defv(%)= 24.59114479			defv(%)= 30.51455923		
Taylor			Taylor			Taylor			Taylor		
AC=1.15AB	0.62675		AC=1.15AB	0.943		AC=1.15AB	0.552		AC=1.15AB	0.9775	
radQ(t90)	0.54		radQ(t90)	0.625		radQ(t90)	0.345		radQ(t90)	0.64	
t90	0.2916		t90	0.390625		t90	0.119025		t90	0.4096	
lett90	2.565		lett90	4.265		lett90	5.78		lett90	7.41	
cv	6.13699E-06	m ² /sec	cv	3.915E-06	m ² /sec	cv	1.10461E-05	m ² /sec	cv	2.69033E-06	m ² /sec
lett_100	2.85		lett_100	4.74		lett_100	6.42		lett_100	8.233333333	
defv(%)= 11.36816913			defv(%)= 18.9026282			defv(%)= 25.61716084			defv(%)= 32.84137748		



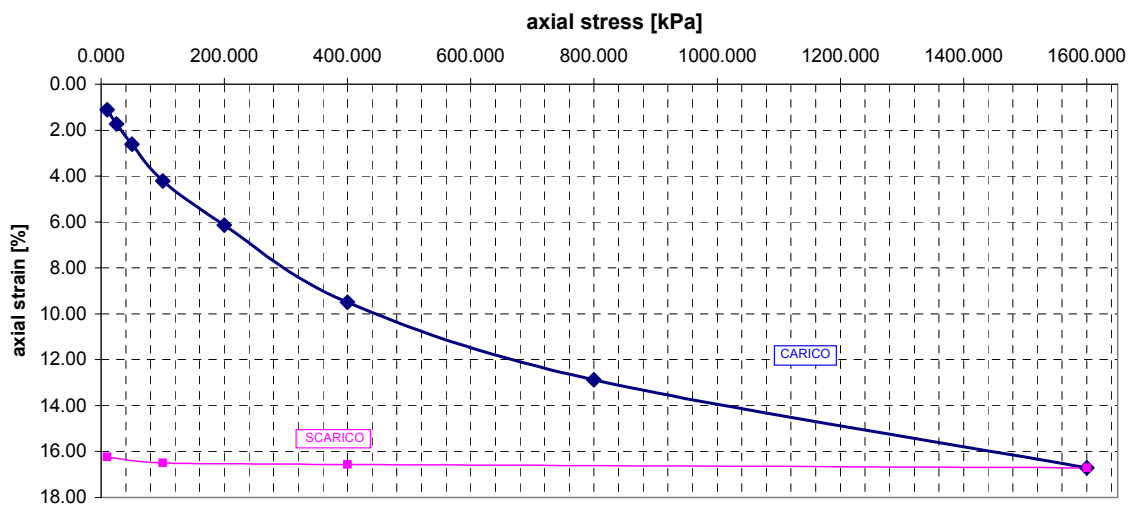
b) Prova edometrica miscela iniettata Sondaggio 5 Prof. 22.33-22.66m

DATI MATERIALE		Sondaggio S5 prof. 22.33-22.66m	
γ_s [g/cm ³]	2.7	γ_w [g/cm ³]	1
volume solido [mm ³]	45933.33	Wf (peso Acqua finale) [g]	33.32
volume vuoti [mm ³]	33641.64	w (contenuto d'acqua)	0.268666
		volume acqua [mm ³]	33320
		S (grado di saturazione)	0.990439

Curva di compressione edometrica : Sondaggio S5 Prof 22.33-22.66m

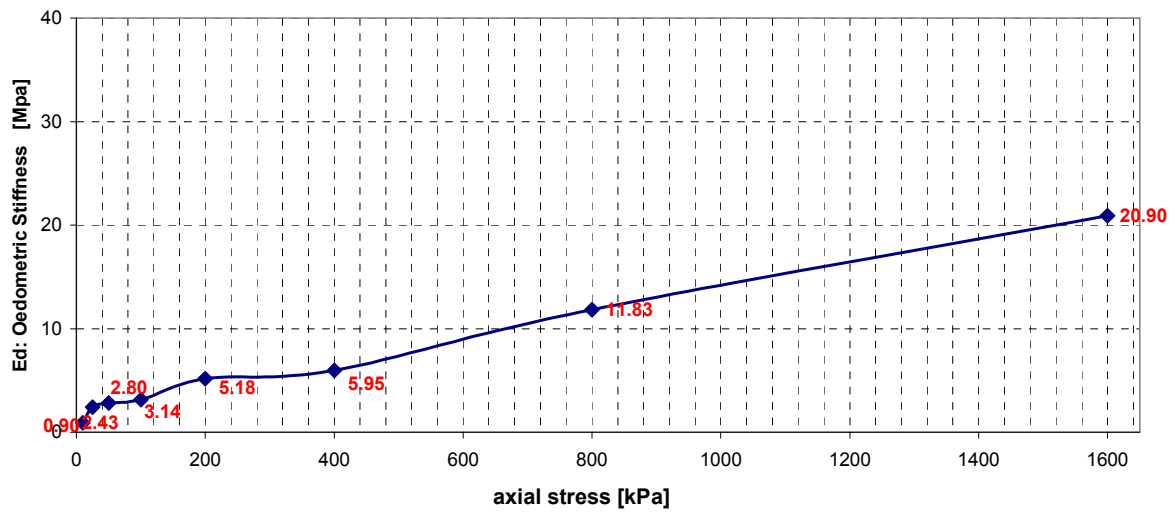


Curva di compressione edometrica : Sondaggio S5 Prof 22.33-22.66m

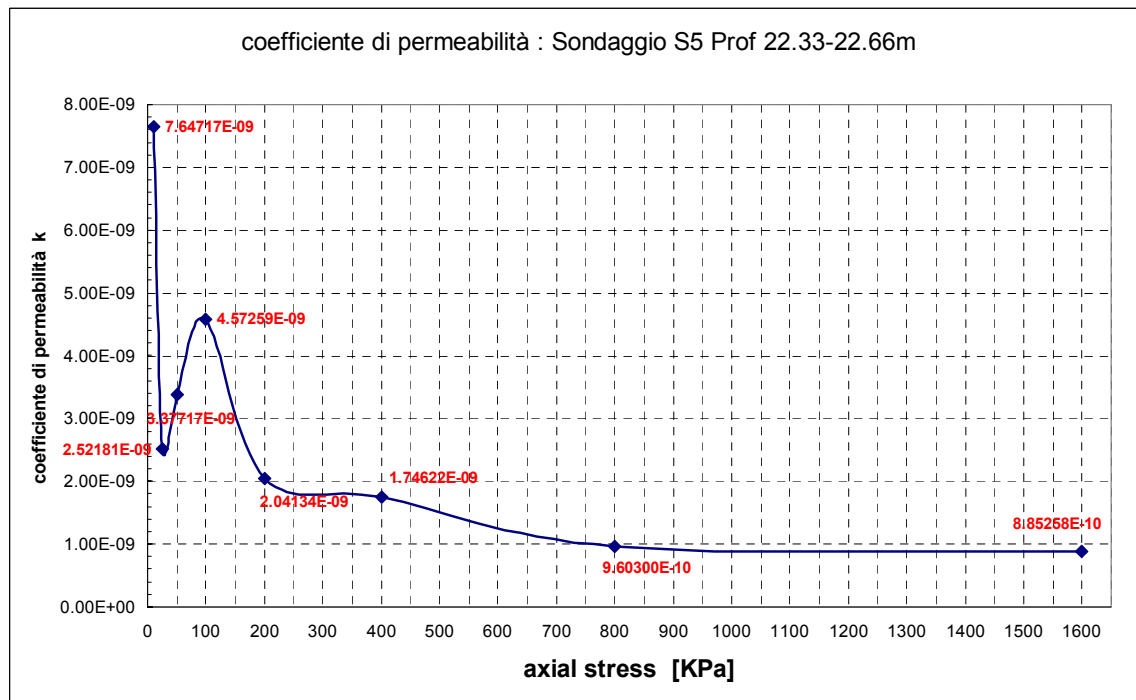




Modulo di rigidezza edometrica : Sondaggio S5 Prof 22.33-22.66m

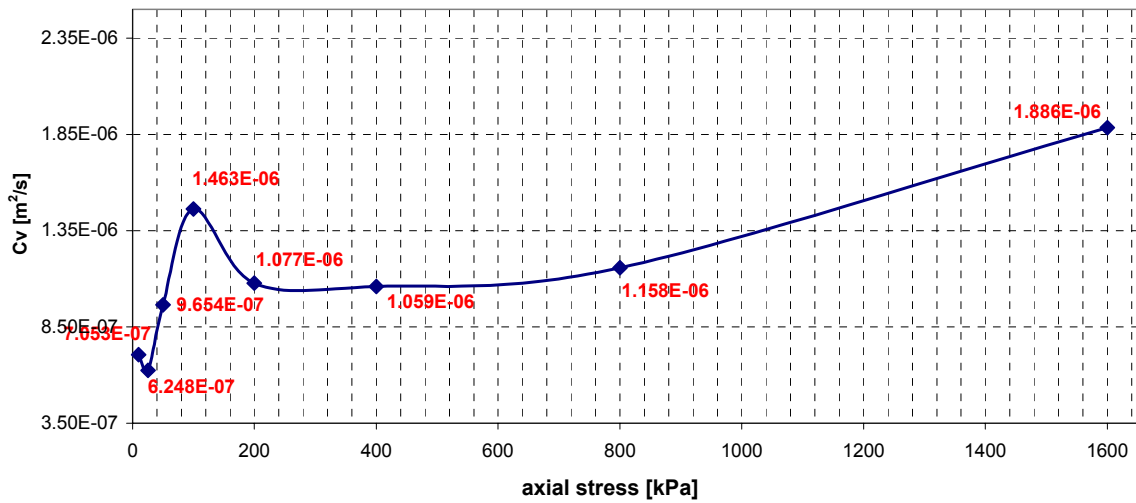


coefficiente di permeabilità : Sondaggio S5 Prof 22.33-22.66m



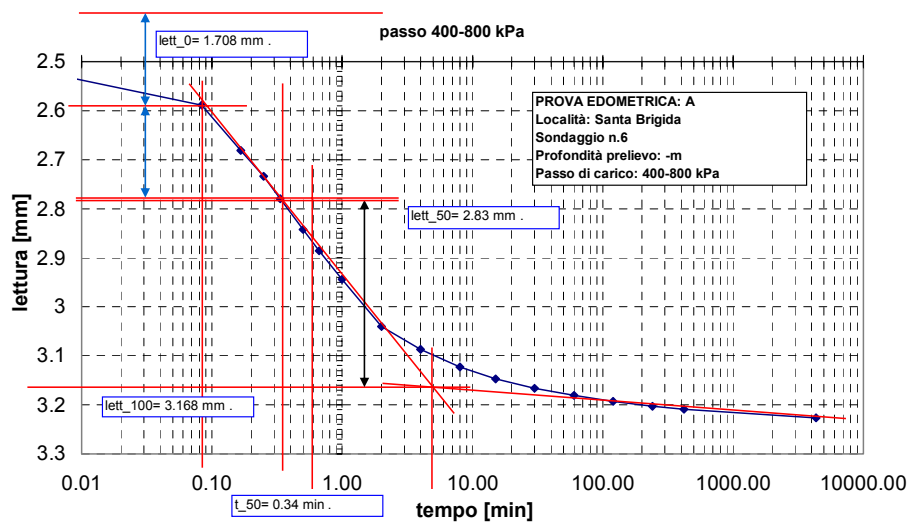


Coefficiente di Consolidazione C_v [m^2/s] : Sondaggio S5 Prof 22.33-22.66m

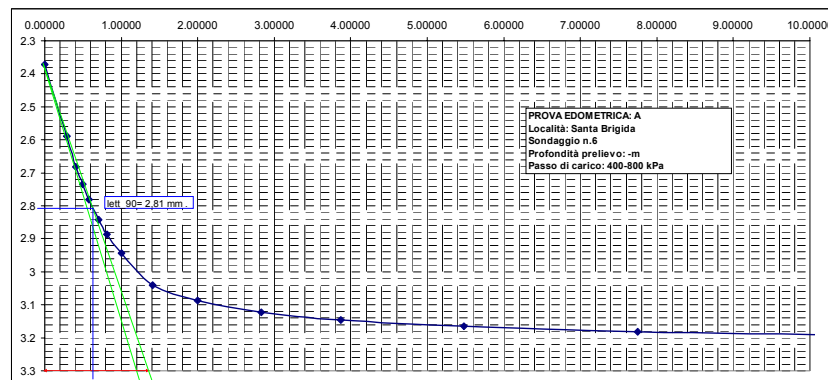


c) Esempio di rielaborazione passi : Sondaggio 5 Prof. 22.33-22.66m

Metodo di Casagrande



Metodo di Taylor





100-200 Kpa		
tempo [min]	rad(tempo)	lettura [mm]
0.00001	0.00316	1.045
0.0833	0.28862	1.153
0.1667	0.40829	1.192
0.2500	0.50000	1.220
0.3333	0.57732	1.235
0.5000	0.70711	1.263
0.6667	0.81652	1.290
1	1.00000	1.327
2	1.41421	1.381
4	2.00000	1.422
8	2.82843	1.452
15	3.87298	1.469
30	5.47723	1.484
60	7.74597	1.493
120	10.95445	1.501
240	15.49193	1.507
480	21.90890	1.513
1400	37.41657	1.524
defv(%)=	1.93223074	

200-400 Kpa		
tempo [min]	Rad(Tempo)	lettura [mm]
0.00001	0.0032	1.524
0.1167	0.3416	1.868
0.2000	0.4472	1.922
0.2833	0.5323	1.963
0.4500	0.6708	2.028
0.6167	0.7853	2.066
1	0.9747	2.120
2	1.3964	2.220
4	1.9875	2.250
8	2.8196	2.287
15	3.8665	2.306
30	5.4727	2.325
60	7.7427	2.336
120	10.9522	2.342
240	15.4903	2.351
480	21.9078	2.357
1516	38.935845	2.367
2850	53.385391	2.371
defv(%)=	3.3602259	

400-800 Kpa		
tempo [min]	Rad(Tempo)	lettura [mm]
0.00001	0.00316	2.371
0.0833	0.28862	2.589
0.1667	0.40829	2.681
0.2500	0.50000	2.734
0.3333	0.57732	2.78
0.5000	0.70711	2.842
0.6667	0.81652	2.886
1	1.00000	2.944
2	1.41421	3.04
4	2.00000	3.087
8	2.82843	3.123
15	3.87298	3.147
30	5.47723	3.166
60	7.74597	3.181
120	10.95445	3.193
240	15.49193	3.203
420	20.49390	3.209
4340	65.87868	3.227
5526	74.33707	3.233
defv(%)=	3.3803953	

800-1600 Kpa		
tempo [min]	Rad(Tempo)	lettura [mm]
0.00001	0.00316	3.233
0.0833	0.28862	3.47
0.1667	0.40829	3.561
0.2500	0.50000	3.616
0.3333	0.57732	3.664
0.5000	0.70711	3.729
0.6667	0.81652	3.774
1	1.00000	3.838
2	1.41421	3.929
4	2.00000	3.992
8	2.82843	4.041
15	3.87298	4.072
30	5.47723	4.094
60	7.74597	4.114
120	10.95445	4.128
240	15.49193	4.137
480	21.90890	4.146
1410	37.54997	4.157
10087	100.43406	4.182
defv(%)=	3.8281565	

Casagrande	
t_50	0.42 min
lett_50	1.256 mm
H50	23.534
cv=Tv*H^2/t	64.6157349 mm2/min
cv=Tv*H^2/t	1.0769E-06 m/sec
lett_100	1.47 mm
defv(%)=	5.92981041

Casagrande	
t_50	0.4 min
lett_50	2.01 mm
H50	22.78
cv=Tv*H^2/t	63.568729 mm2/min
cv=Tv*H^2/t	1.059E-06 m2/sec
lett_100	2.31 mm
defv(%)=	9.3182735

Casagrande	
t_50	0.34 min
lett_50	2.83 mm
H50	21.96
cv=Tv*H^2/t	69.499525 mm2/min
cv=Tv*H^2/t	1.158E-06 m/sec
lett_100	3.168 mm
defv(%)=	12.779347

Casagrande	
t_50	0.195 min
lett_50	3.57 mm
H50	21.22
cv=Tv*H^2/t	113.14939 mm2/min
cv=Tv*H^2/t	1.886E-06 m^2/sec
lett_100	4.08 mm
defv(%)=	16.458249

Taylor	
AC=1.15AB	1.254
radQ(t90)	0.8
t90	0.64
lett90	1.287
cv	3.05E-06
lett_100	1.4300
defv(%)=	5.768455

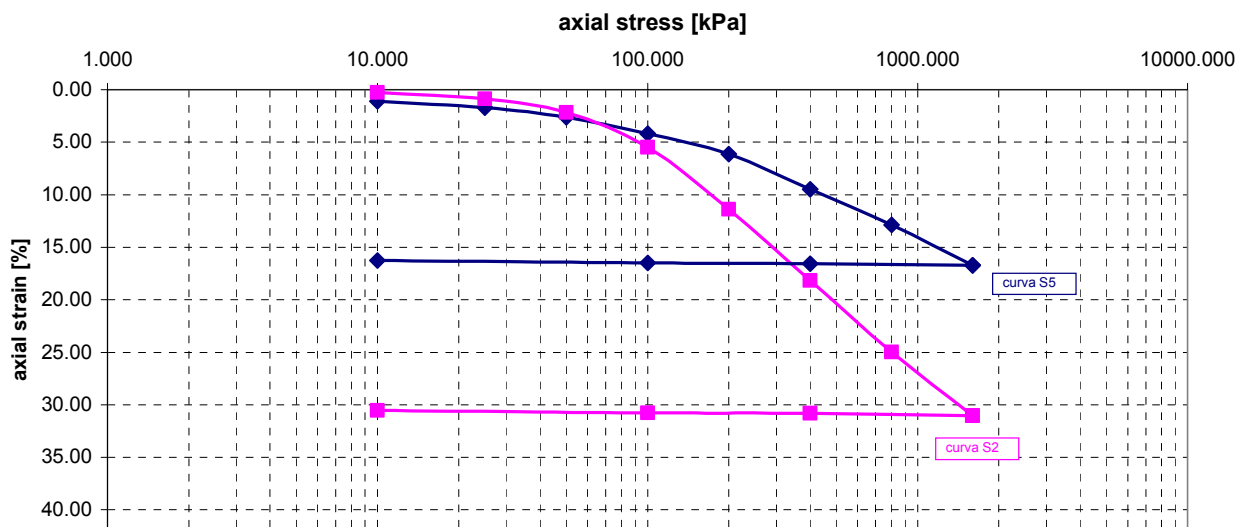
Taylor	
AC=1.15AB	0.9775
radQ(t90)	0.475
t90	0.225625
lett90	1.936
cv	8.18E-06
lett_100	2.151111
defv(%)=	8.677334

Taylor	
AC=1.15AB	1.38
radQ(t90)	0.635
t90	0.403225
lett90	2.81
cv	4.23E-06
lett_100	3.122222
defv(%)=	12.59468

Taylor	
AC=1.15AB	1.5525
radQ(t90)	0.5
t90	0.25
lett90	3.615
cv	6.34E-06
lett_100	4.016667
defv(%)=	16.20277

Confronto tra le due curve edometriche

Curva di compressione edometrica





**Stima dei cedimenti e dei tempi di collasso dei pilastri sulla base
dei dati delle prove effettuate sul materiale iniettato**

2. Inquadramento del problema

I pilastri di miniere abbandonate sono frequentemente soggetti a processi di alterazione che riducendo nel tempo la resistenza meccanica ne possono indurre il collasso. Nel caso della miniera della Cava Carale di Santa Brigida è in corso un processo di dissoluzione dei pilastri di gesso e di anidrite per effetto dell'acqua che ha allagato i due livelli più profondi; come si osserva in Fig. 8a l'acqua è soggetta ad un ricambio per effetto delle infiltrazioni a monte del sistema minierario. Pertanto è ragionevole assumere che il processo di alterazione continui ad avvenire nel tempo.

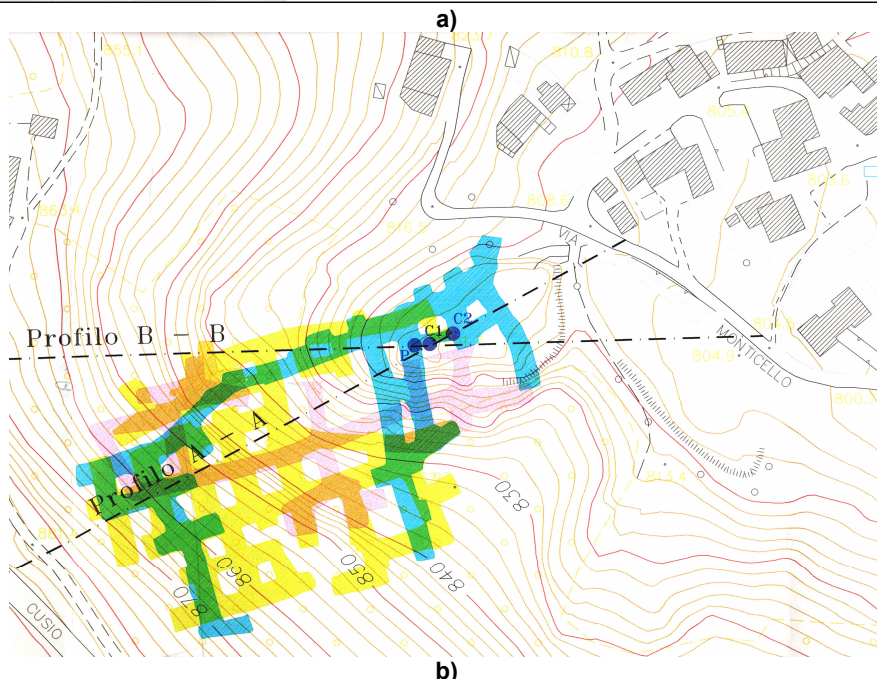
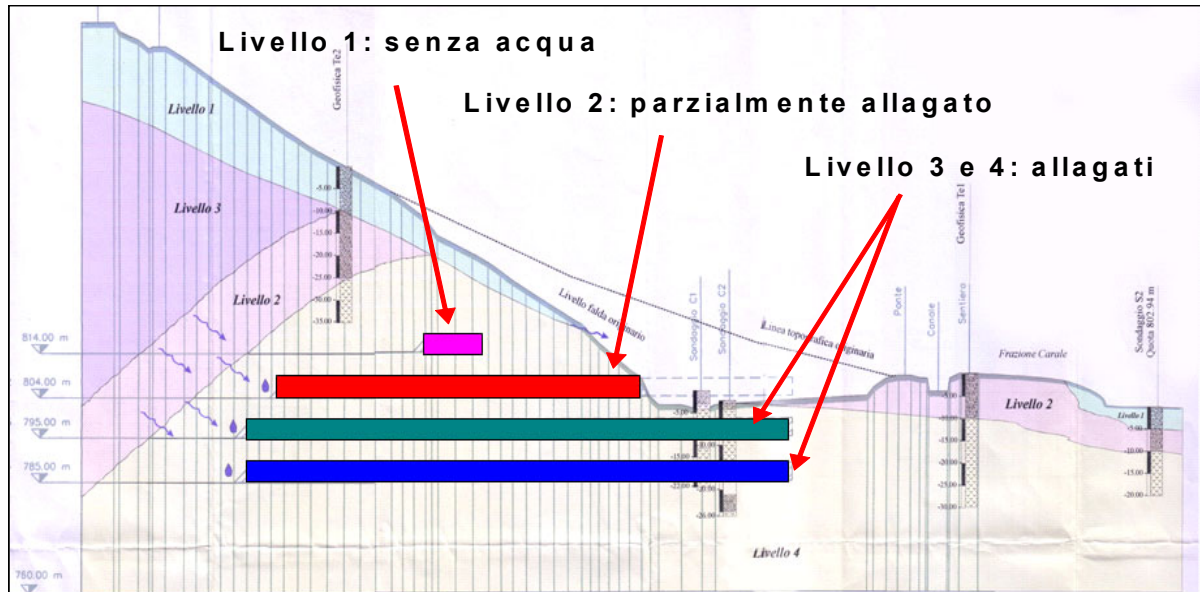


Fig. 8: a) sezione della Cava Carale; b) pianta dei 4 livelli della Cava Carale

Come si osserva dalla pianta (Fig. 8b e Fig. 9) la miniera della Cava Carale è costituita da pilastri prevalentemente rettangolari. Analizzando più in dettaglio la pianta del livello 3 è possibile stimare un raggio equivalente medio compreso tra 2.5 e 4.5 metri ed un raggio equivalente dell'area di influenza che agisce sul singolo pilastro compreso tra 5 e 6 metri; Inoltre nota la profondità dei pilastri e le dimensioni dell'area di influenza del sovraccarico geostatico di ciascun pilastro è possibile stimare che lo sforzo verticale in sito agente sul singolo pilastro è compreso tra 1.2 e 8.4 MPa.

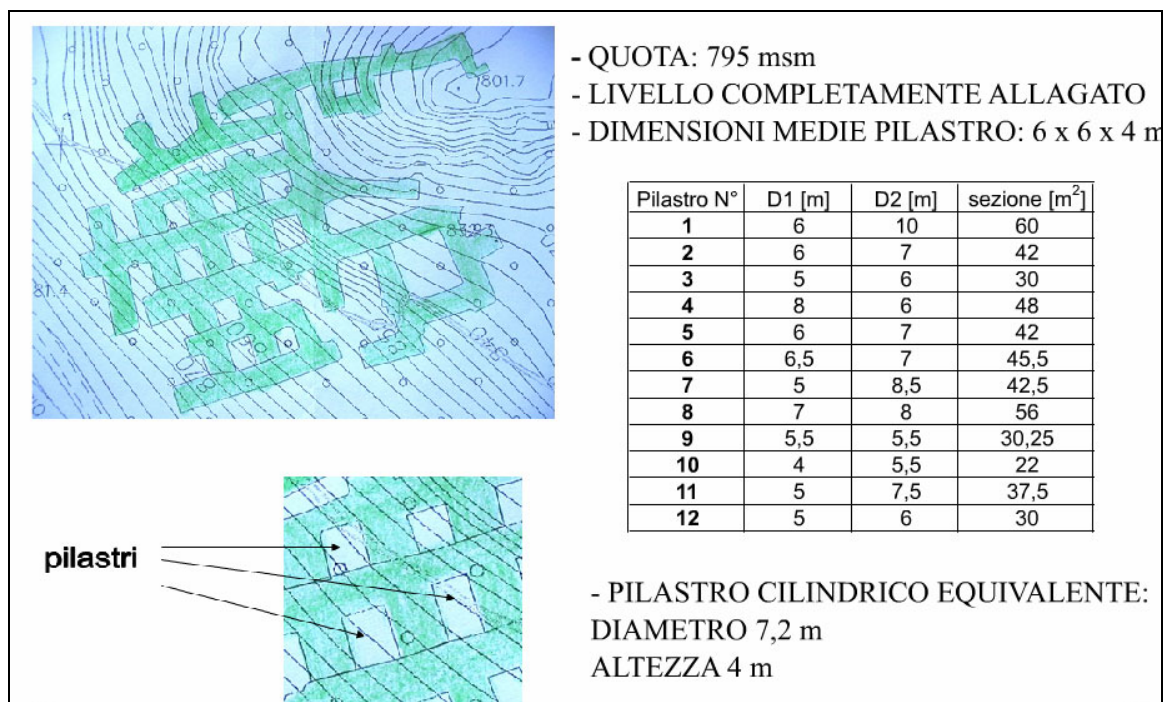


Fig. 9: pianta del 3 livello della Cava Carale e relativa tabella delle dimensioni dei pilastri

Al fine di predire il tempo di collasso dei pilastri di tale sistema minerario (assumendo pilastri circolari) è stato sviluppato un modello teorico che combina il processo di infiltrazione dell'acqua nei pilastri e la riduzione di resistenza indotta dal processo di alterazione. Tale modello è il contenuto della relazione denominata "Analisi preliminare per la stima dei tempi di collasso di pilastri di gesso interessati da fenomeni degradativi" presentata nell'ambito del primo lotto di intervento.

Nel paragrafo seguente si presentano i risultati in termini di stima dei cedimenti e tempo di collasso dei pilastri che il modello prevede utilizzando i parametri geomeccanici della miscela iniettata ricavati dalle prove edometriche. Per tutti i dettagli inerenti il modello si rimanda alla relazione citata.

Nel seguito si riportano i parametri utilizzati per la previsione effettuata

Parametri della miscela ricavati dalle prove edometriche:

- Composizione miscela :argilla 17.84 %, limo 23.78 %, sabbia 17.84 % cemento 8.11 %, acqua 32.43 % (percentuale di peso pe unità di volume.
- Cedevolezza verticale $m_v = 0.105 \cdot 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$



- Rigidezza edometrica $E_d = 10$ MPa
- Coefficiente di consolidazione verticale $C_v = 3.75 \cdot 10^{-6}$ m²/s;
- Permeabilità $k = 0.3958 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Parametri del Gesso e dei Pilastrini :

- Rigidezza uniassiale $E = 2.5$ GPa,
- Raggio Pilastrino = 2.5m
- Raggio della Camera = 6m

Parametri del modello di degrado (dedotti da prove di degradazione del gesso)

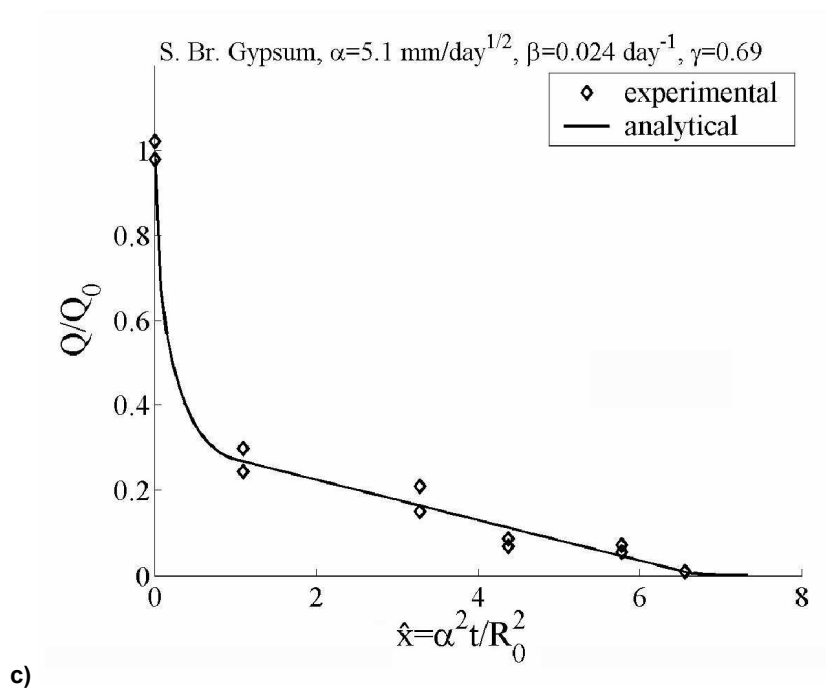


Fig. 10: Calibrazione del modello sui dati sperimentali ottenuti in prove di degradazione del gesso

Utilizzando i parametri sopra riportati si è svolta un'analisi preliminare dell'effetto di mitigazione della miscela iniettata considerando lo schema semplificato ideale riportato in Fig. 11. Si è scelto come processo di degradazione quello riprodotto in laboratorio immergendo dei provini in un flusso di acqua corrente (per tutti i dettagli ci si riferisca alle precedenti relazioni) che rappresentano il processo di degrado più rapido e quindi più sfavorevole.

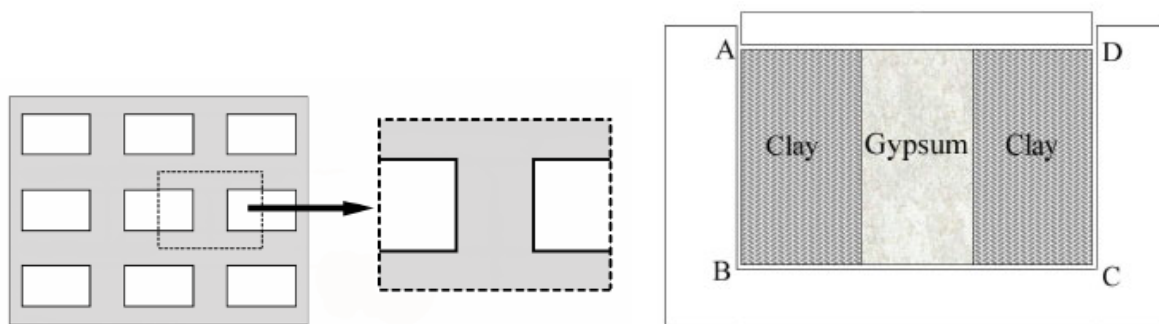


Fig. 11 Schema sistema camere pilastri .

E' così stato possibile predire gli effetti della miscela iniettata in termini di cedimento totale ed evoluzione nel tempo utilizzando il modello descritto nella relazione sopra citata, cui si rimanda per tutti i dettagli analitici ed applicativi del modello. In questa sede si ricordano che le principali criticità connesse al collasso dei pilastri della miniera sono:

- il valore assoluto del cedimento/subsidenza, il suo evolversi nel tempo
- la sovrappressione in eccesso che insorge nel materiale iniettato in conseguenza del trasferimento del carico dal pilastro al riempimento.

Le ipotesi assunte dal modello sono:

- il completo riempimento delle cavità
- una progressione costante del processo di degrado all'interno del pilastro nonostante la presenza del materiale di riempimento.

Considerando quanto detto sopra e i parametri e le dimensioni del sistema camere-pilastri sopra riportate, è stata svolta una predizione il cui risultato è riportato in Fig. 12 in termini di evoluzione del cedimento atteso.

Per quanto concerne la sovrappressione in eccesso il grafico non è riportato dal momento che per la permeabilità del materiale iniettato l'incremento di pressione in eccesso connesso al pilastro per effetto della consolidazione si mantiene inferiore ai 10 kPa.

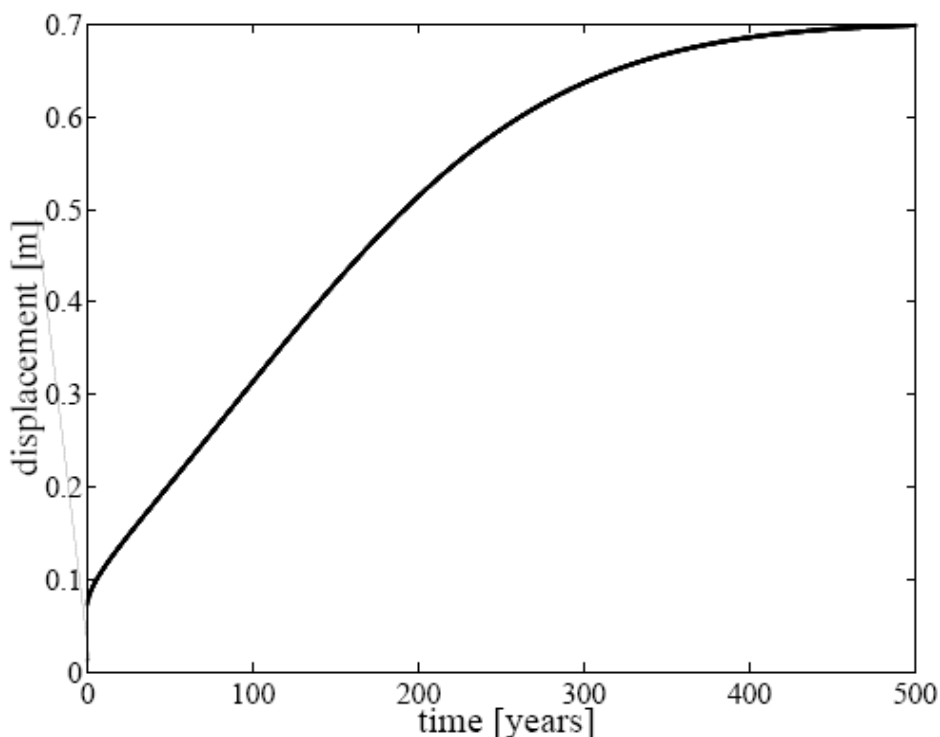


Fig. 12 Cedimenti in presenza del materiale di riempimento saturo in funzione del tempo ($t_0 = 0$: istante iniziale del processo di degradazione) con i parametri di permeabilità e rigidità ottenuti dalle prove edometriche.

Conclusioni

Dai risultati ottenuti emerge con chiarezza che il riempimento effettuato con la miscela iniettata nel primo lotto rallenta il collasso dei pilastri limitandone il cedimento finale e non induce alcun incremento della pressione in eccesso al momento del collasso.

Se da un lato si può affermare che il valore della permeabilità di questa miscela è ottimale, dall'altro predicendo un cedimento finale di 0.7 metri emerge che i parametri di rigidità E_d e di consolidazione c_v del materiale di riempimento non sono totalmente soddisfacenti.

Sarebbe dunque opportuno approfondire lo studio della miscela da iniettare per il nuovo lotto d'intervento rivedendo ad esempio la composizione del materiale di riempimento al fine di aumentare i parametri di rigidità E_d e di consolidazione c_v senza ridurre la permeabilità k .

La fluidità del materiale non dovrebbe essere grandemente modificata dal momento che è necessario riempire completamente le camere, come di fatto è accaduto in questo primo lotto; Ciò al fine di garantire il trasferimento del carico dal pilastro al materiale di riempimento minimizzandone il cedimento.

Si è dunque mostrato che le caratteristiche del materiale di riempimento andrebbero leggermente migliorate per quanto concerne i parametri di rigidità e di consolidazione per ridurre il cedimento assoluto (che peraltro si svilupperebbe in centinaia di anni) mantenendo però inalterate le proprietà idrauliche e di fluidità.

Milano, 28 Giugno 2007

Il relatore
Prof. Ing. Roberto Nova