



Esperienze di stabilizzazione a calce di rilevati ferroviari: linea Bologna - Verona e linea Parma - La Spezia

23 Aprile 2015

Stefano Ciufegni
Francesco Sacchi

La stabilizzazione a calce

La stabilizzazione con calce dei terreni plastici è un'ottima alternativa all'impiego dei materiali pregiati tradizionali, specie nelle opere in cui ne sono richieste notevoli quantità

Le prime applicazioni del mondo ferroviario risalgono alla fine degli anni 80.

Risalgono infatti a quegli anni i rilevati del quadruplicamento tra la Stazione di Firenze Campo di Marte e la Linea Direttissima, così come la stabilizzazione in sito del piano di imposta del rilevato su cui è stato costruito l'impianto polifunzionale dinamico di Osmannoro sempre nell'area Fiorentina.

La stabilizzazione a calce

Nel 2011 è uscita la nuova specifica «Trattamento delle terre con calce» che recepisce, sostanzialmente quanto fatto nella costruzione della linea Bologna - Verona.

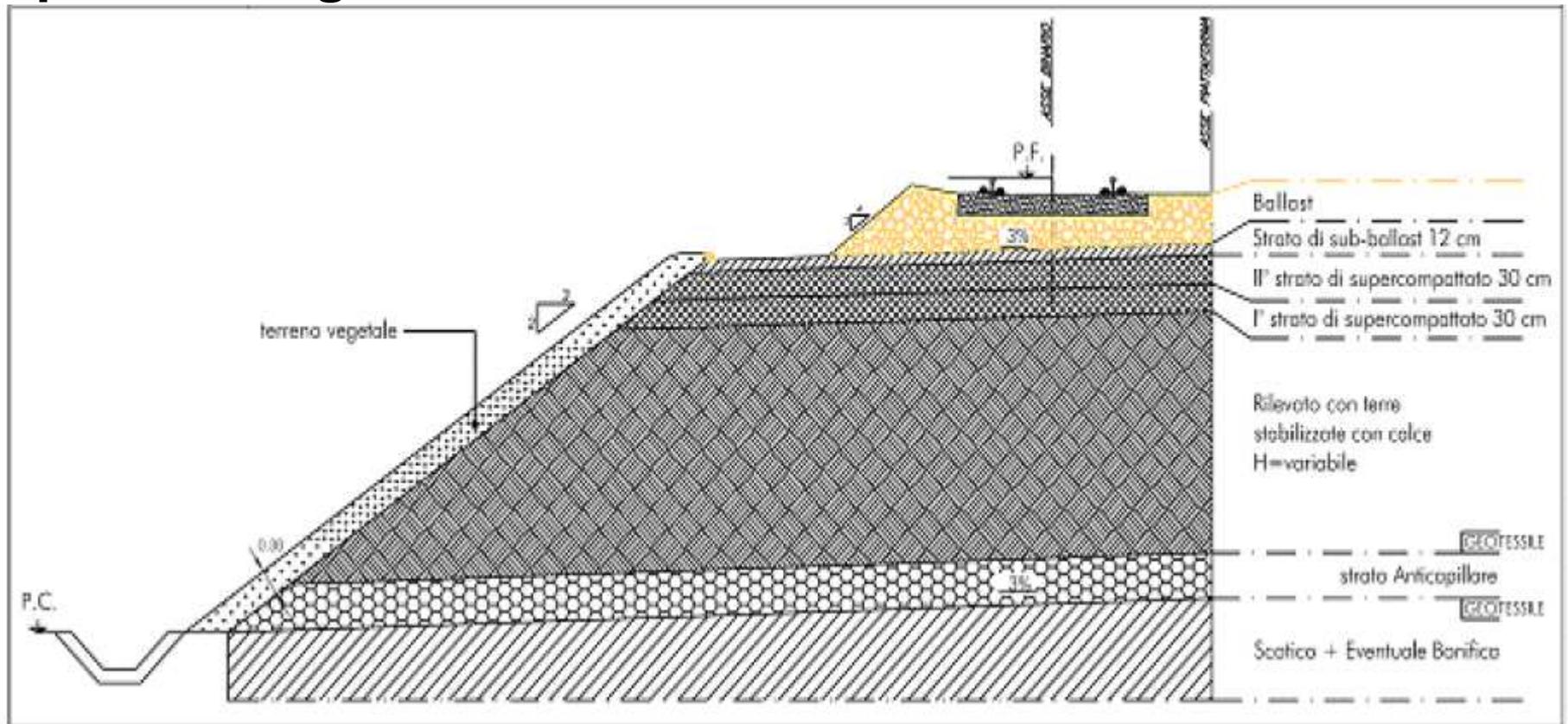
	SPECIFICA	
	Codifica: RFI DTC INC SP IF5 008 A	FOGLIO 1 di 19

TRATTAMENTO DELLE TERRE CON CALCE	
Parte	Titolo
PARTE I	I.1 GENERALITA' I.2 SCOPO DELLA SPECIFICA I.3 CAMPO DI APPLICAZIONE I.4 DOCUMENTAZIONE CORRELATA I.5 DEFINIZIONI
PARTE II	II.1 PRESCRIZIONI GENERALI II.2 MATERIALI II.3 PROGETTO DEL TRATTAMENTO DELLE TERRE CON CALCE II.4 MODALITA' DI ESECUZIONE E PRESCRIZIONI II.5 CONTROLLI IN CORSO D'OPERA
PARTE III	MATRICE DELLE RESPONSABILITA' (p.m.)
PARTE IV	ALLEGATI (p.m.)

Rev.	Data	Descrizione	Verifica Tecnica	Autorizzazione
A	27/04/11	Emissione per applicazione	F. Iacobini S. Gorelli R. Esposito	P. Firmi

La stabilizzazione a calce

Questo è lo schema della nuova sezione tipo, la novità maggiore è data dal fatto che tutto il rilevato ferroviario può essere eseguito utilizzando terre stabilizzate a calce mentre la precedente normativa stabiliva che la stabilizzazione terminasse ad almeno 2 metri dal piano di regolazione



La stabilizzazione a calce

Sono impiegabili i seguenti tipi di calce sfusa:

- a) calce aerea idrata in polvere;**
- b) calce aerea viva macinata.**

appartenenti alle classi CL 80 e CL 90 (UNI-EN 459)

Il trattamento deve essere eseguito con lo stesso prodotto con cui sono stati sviluppati gli studi preliminari.

La stabilizzazione a calce

Controlli durante l'esecuzione

<i>Sui materiali</i>	
Requisiti della calce	ogni 1000 ton.
Verifica delle caratteristiche del terreno in cumulo	ogni 4.000 mc
Misura del contenuto d'acqua della terra prima dell'aggiunta di calce	Giornaliera
Verifica della quantità di calce in fase di stesa	Giornaliera ⁽¹⁾
Controllo omogeneità granulometrica dopo l'aggiunta di calce e la miscelazione	ogni 1.000 mq
Verifica del contenuto d'acqua della miscela prima della compattazione	Giornaliera
<i>Sugli strati realizzati</i>	
Determinazione del modulo di deformazione con piastra da 30 cm,	ogni 2.000 mq
Determinazione del grado di costipamento, n° 1 al centro + n° 1 sul bordo del rilevato	
Verifica dello spessore dello strato finito.	ogni 2.000 mq

La stabilizzazione a calce

***Linea Bologna – Verona
Rilevati tra Crevalcore e Nogara***

Linea ferroviaria **Bologna - Verona**

Il tratto tra Crevalcore e Nogara, della nuova linea ferroviaria ha una lunghezza di circa 50 Km, la cui gran parte realizzata su rilevato.

Il volume di terreno necessario tra bonifica del piano di posa e corpo rilevato supera il **milione di m³, mentre il terreno da portare a discarica sarebbe stato di circa **600.000 m³****

Per le quantità mancanti sono state recuperate terre provenienti dalla vecchia sede ferroviaria e da scavi eseguiti per la costruzione di altre nuove opere nei pressi del cantiere della linea ferroviaria, compresi quelli provenienti dalle opere di fondazione dei manufatti e quindi con la presenza di fanghi bentonitici

Gli studi preliminari

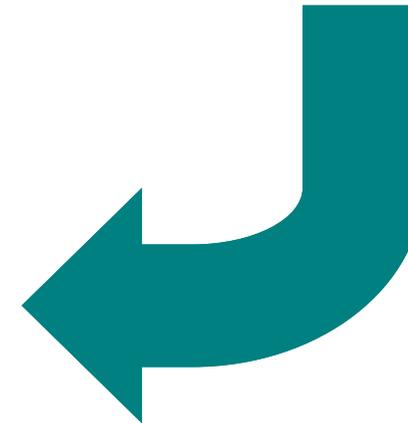
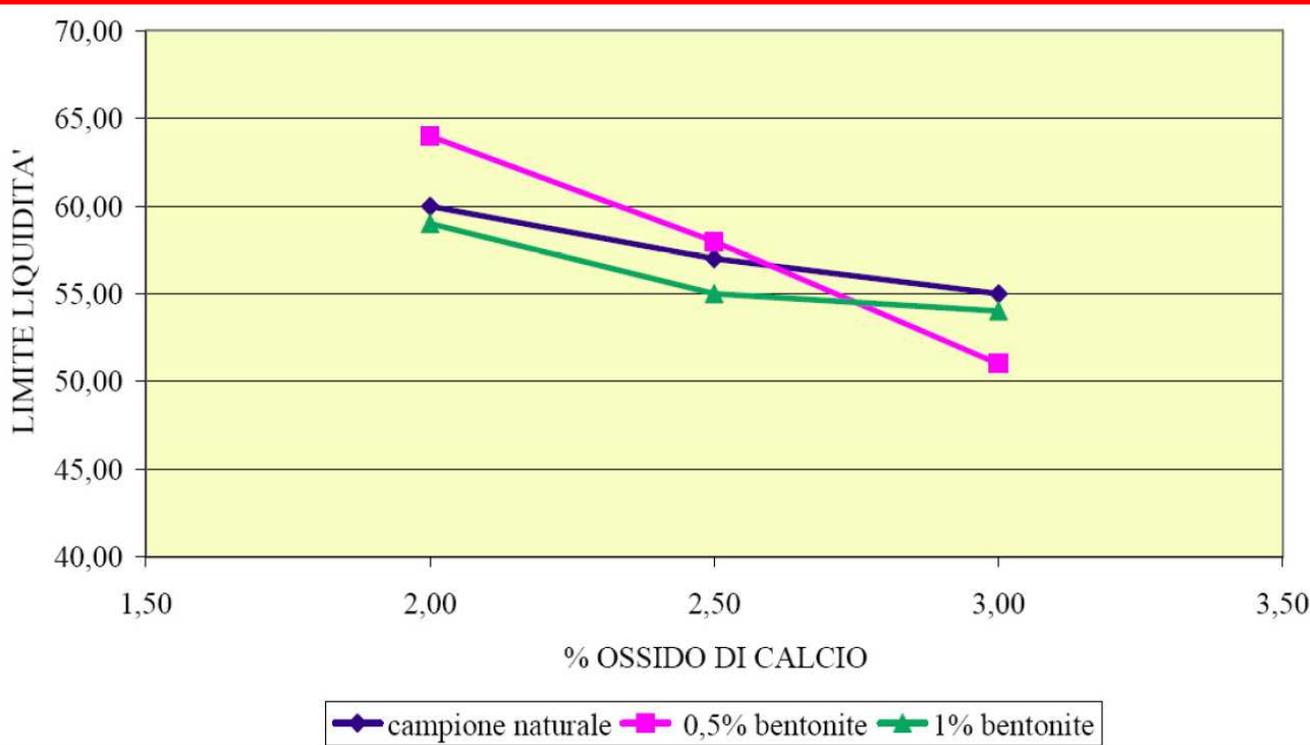
Lo studio del riutilizzo dei materiali provenienti dagli scavi è stato eseguito in fase di **progettazione**

Lo studio di laboratorio, preliminare, è stato eseguito miscelando con **diverse percentuali** di ossido di calcio sia i terreni tali e quali, simulando i materiali di risulta degli scavi superficiali come plinti di fondazione, sia quelli **“inquinati”** dalla presenza di varie percentuali di bentonite utilizzata per la perforazione dei pali di fondazione, verificando con prove successive il loro comportamento.

Gli studi preliminari – i risultati

Variazione limite di liquidità

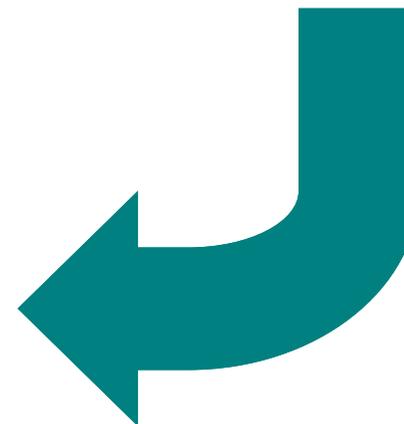
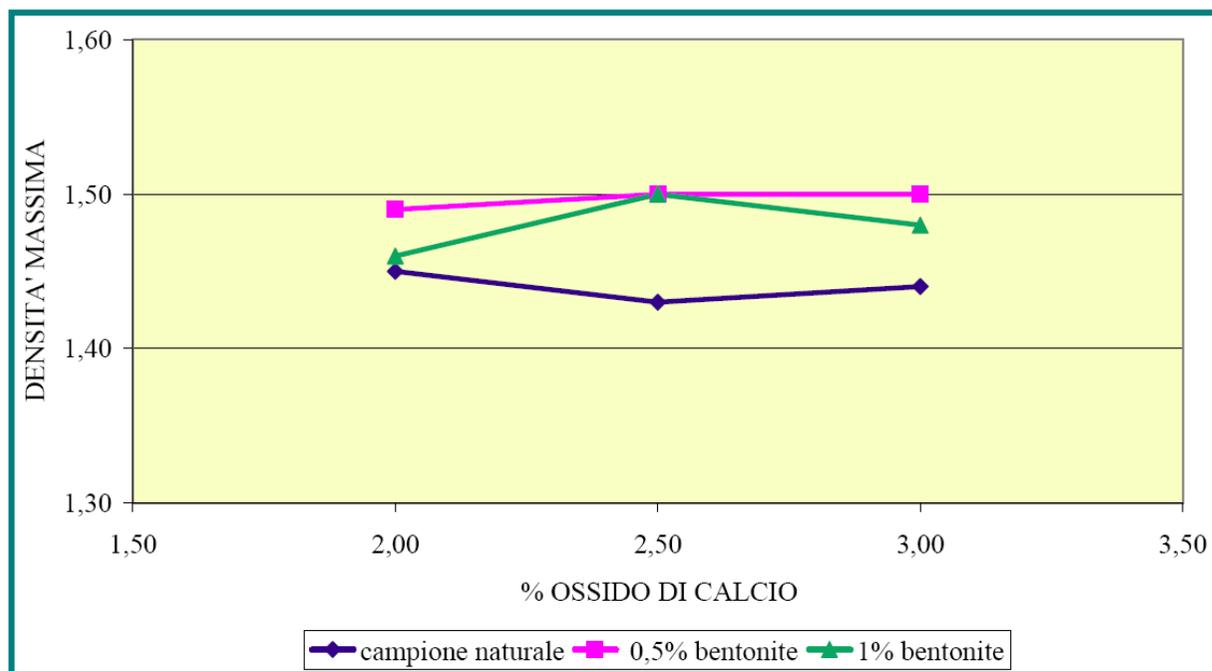
CaO(%)	campione naturale	0,5% bentonite	1% bentonite
2,00	60,00	64,00	59,00
2,50	57,00	58,00	55,00
3,00	55,00	51,00	54,00



Gli studi preliminari – i risultati

Variazione densità (t/m³)

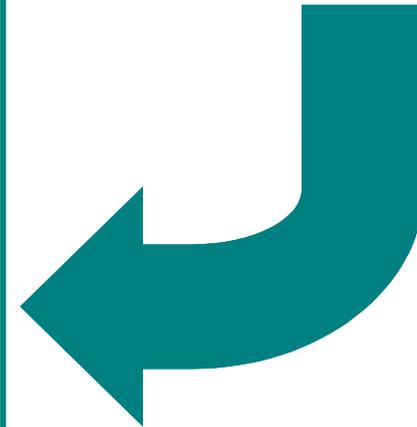
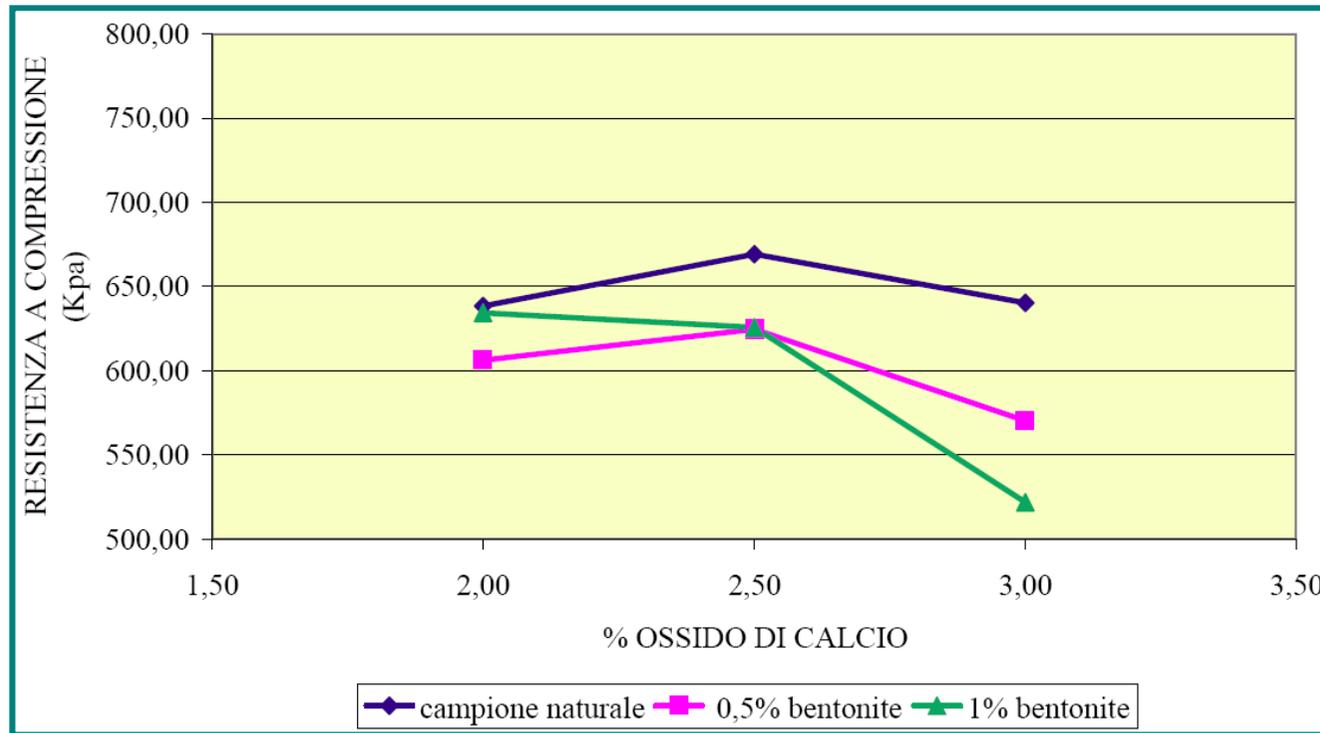
CaO(%)	campione naturale	0,5% bentonite	1% bentonite
2,00	1,45	1,49	1,46
2,50	1,43	1,50	1,50
3,00	1,44	1,50	1,48



Gli studi preliminari – i risultati

Variazione della resistenza a compressione (Kpa)

CaO(%)	campione naturale	0,5% bentonite	1% bentonite
2,00	638,26	606,26	634,22
2,50	669,25	624,57	625,62
3,00	640,35	570,21	521,92



Gli studi preliminari – i risultati

- ❑ L'aggiunta di calce al terreno **“inquinato” con bentonite** porta ad una **diminuzione** dei valori del limite di liquidità e dell'indice di plasticità e contemporaneamente la frazione fine diminuisce notevolmente.
- ❑ I valori della **densità** secca massima tendono ad **aumentare** con la presenza di bentonite nella miscela, così come i valori del **contenuto ottimale in acqua**
- ❑ All'**aumentare** del contenuto in bentonite i valori della resistenza a compressione presentano una **modesta diminuzione**, di circa il 10% tale da non inficiare i risultati del trattamento a calce

Linea Bologna – Verona **lo studio delle miscele**

Verificata la fattibilità dell' uso dei terreni provenienti da scavi, compresi quelli **“inquinati” con bentonite**, sono state modificate e adattate al progetto le specifiche allora tecniche esistenti in funzione dell' idea di utilizzare le terre stabilizzate con calce anche per la realizzazione del corpo del rilevato

Tenendo conto dei risultati degli studi preliminari i terreni provenienti dallo scavo dei pali sono stati utilizzati solo per la bonifica del piano di posa o quando il rilevato era confinato tra muri

Lo studio delle miscele è stato in 2 fasi:

- Studio in laboratorio
- Verifica su scala reale per mezzo di campi prova

Linea Bologna – Verona **lo studio delle miscele**

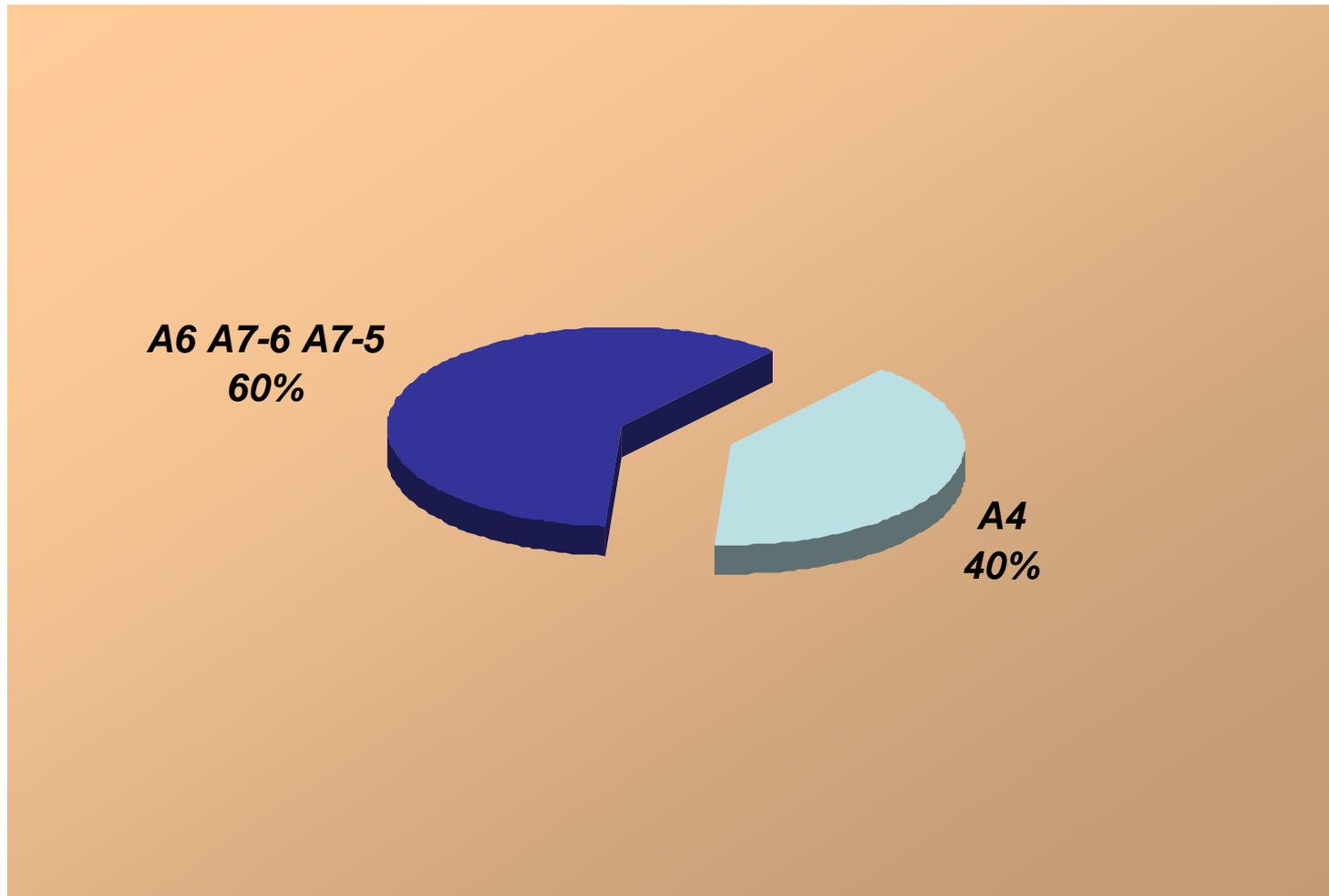
Per la caratterizzazione dei terreni di imposta dei rilevati, lungo il tracciato della nuova linea ferroviaria, sono stati eseguiti circa 150 pozzetti geognostici, profondi fino a 4 metri e sono stati prelevati campioni a varie altezze

Su questi campioni sono state eseguite le seguenti prove per la loro classificazione:

- ❖ *analisi granulometrica per via umida ai setacci con aperture da 2.00 mm – 0.425 mm – 0.075 mm [ASTM D422-63(R02)];*
- ❖ *determinazione dei limiti di liquidità e di plasticità [CNR-UNI 10014];*
- ❖ *classificazione [CNR-UNI 10006];*
- ❖ *contenuto in sostanze organiche [ASTM D 2974 – (00)].*

Linea Bologna – Verona **lo studio delle miscele**

Dai risultati è emerso che:



La realizzazione dei rilevati – lo studio delle miscele

Per le prove successive sono stati miscelati tutti i terreni prelevati per i 2 gruppi al fine di avere campioni omogenei su cui sviluppare le successive prove per verificare il loro trattamento con calce

Le prove eseguite sui campioni di terreno naturale sono state

- ❖ determinazione dei limiti di Atterberg;
- ❖ analisi granulometrica per via umida con setacci e con aerometro;
- ❖ determinazione del contenuto in sostanze organiche;
- ❖ determinazione del contenuto in solfati;
- ❖ determinazione del contenuto in nitrati;
- ❖ determinazione del consumo iniziale di calce (CIC);
- ❖ prova di costipamento AASHTO Modificato;
- ❖ determinazione dell'indice di portanza immediata (IPI);
- ❖ determinazione dell'indice CBR postsaturazione

La realizzazione dei rilevati – **lo studio delle miscele**

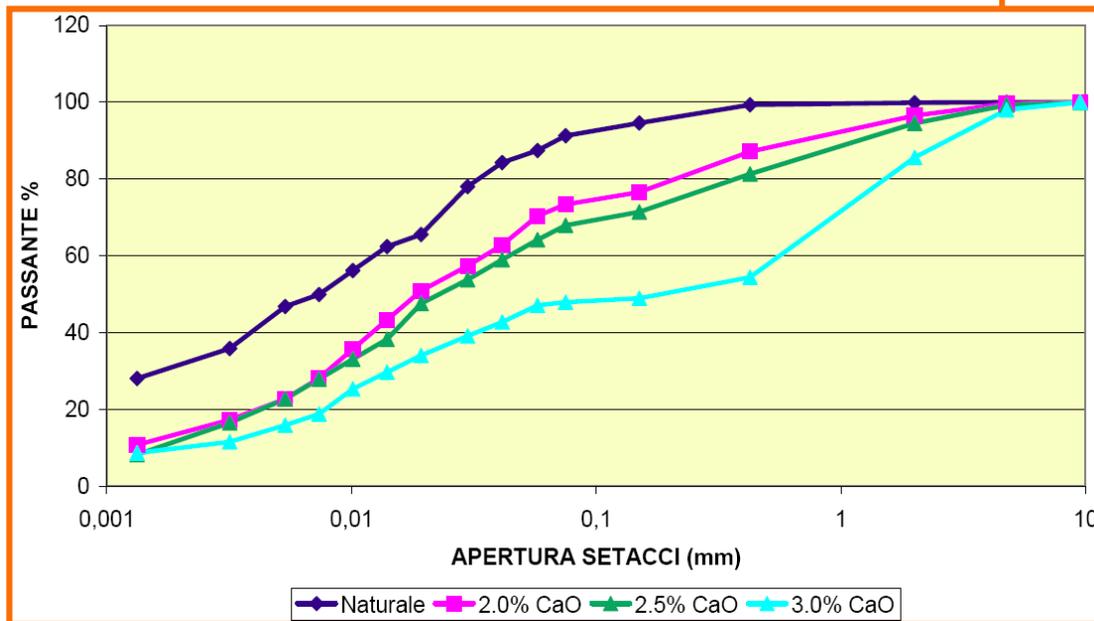
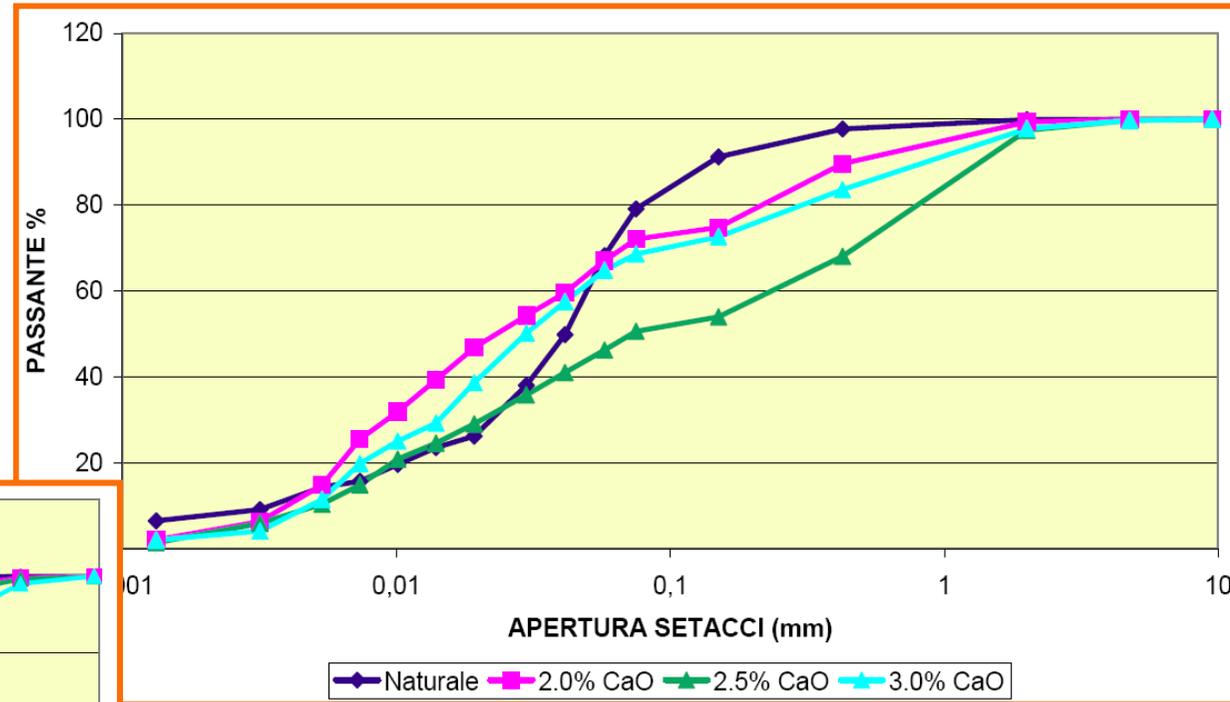
Verificato che i terreni erano adatti ad essere miscelati con calce, si è provveduto, per ciascuno dei due campioni, a realizzare tre diverse miscele con contenuto di ossido di calce crescente (2.0% - 2.5% - 3.0%); sulle quali si sono eseguite le seguenti prove

- ❖ determinazione dei limiti di Atterberg;
- ❖ analisi granulometrica per via umida con setacci e con aerometro;
- ❖ prova di costipamento AASHTO Modificata;
- ❖ determinazione dell'indice di portanza immediata (IPI);
- ❖ determinazione dell'indice CBR postsaturazione a 7 e 28 giorni di maturazione;
- ❖ determinazione del rigonfiamento;
- ❖ determinazione della resistenza a compressione dopo 24 ore, 7 e 28 giorni di maturazione;
- ❖ prove triassiali CD con diversi tenori di umidità (W_{ott}, W_{ott}+2%, W_{ott}-2%) a 28 giorni di maturazione su campioni "tal quali" e dopo completa immersione per 7 giorni in acqua.

Linea Bologna - Verona i risultati dello studio delle miscele

Analisi granulometrica

A₄



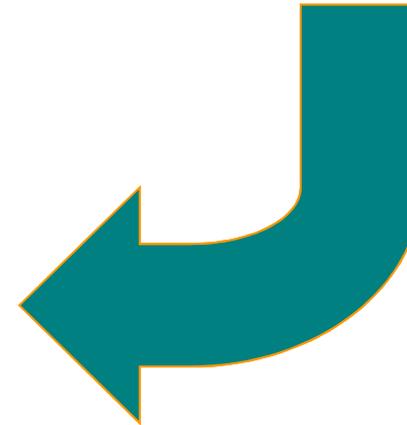
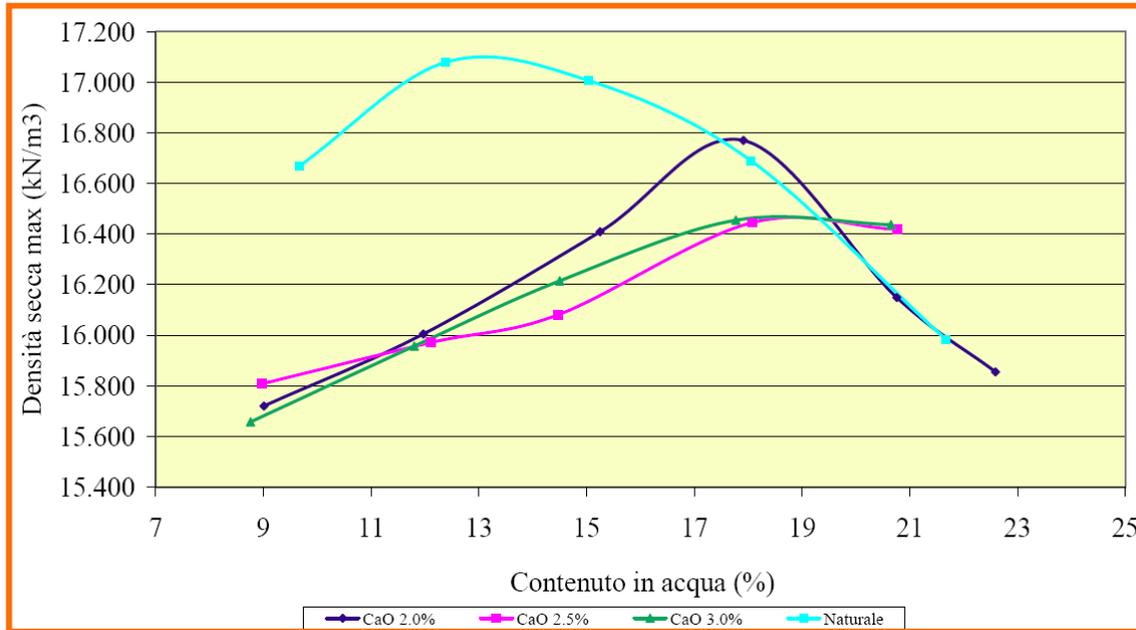
A₆ - A₇₋₆ - A₇₋₅

Linea Bologna - Verona **i risultati dello studio delle miscele**

PROVA DI COSTIPAMENTO CON AASHTO MODIFICATA

A₆ - A₇₋₆ - A₇₋₅

Naturale		CaO 2.0%		CaO 2.5%		CaO 3.0%	
W(%)	γ _d						
9,67	16.669	9,01	15.720	8,97	15.808	8,76	15.657
12,38	17.079	11,97	16.005	12,11	15.971	11,8	15.957
15,03	17.007	15,25	16.409	14,47	16.081	14,5	16.215
18,05	16.690	17,91	16.770	18,07	16.445	17,77	16.455
21,67	15.983	20,76	16.149	20,77	16.418	20,65	16.437
		22,59	15.855	23,4	15.784	23,02	15.941

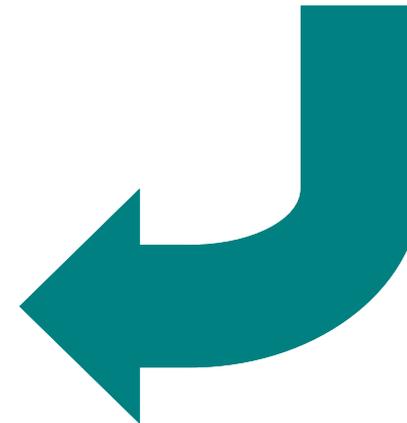
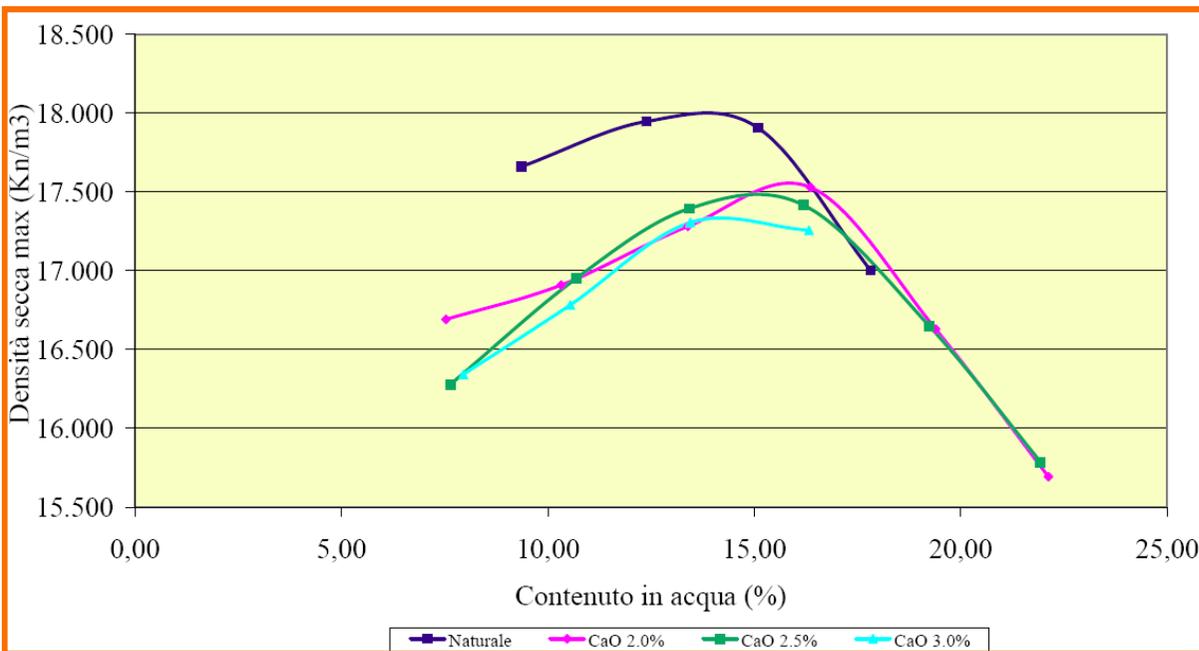


Linea Bologna - Verona **i risultati dello studio delle miscele**

PROVA DI COSTIPAMENTO CON AASHTO MODIFICATA

A₄

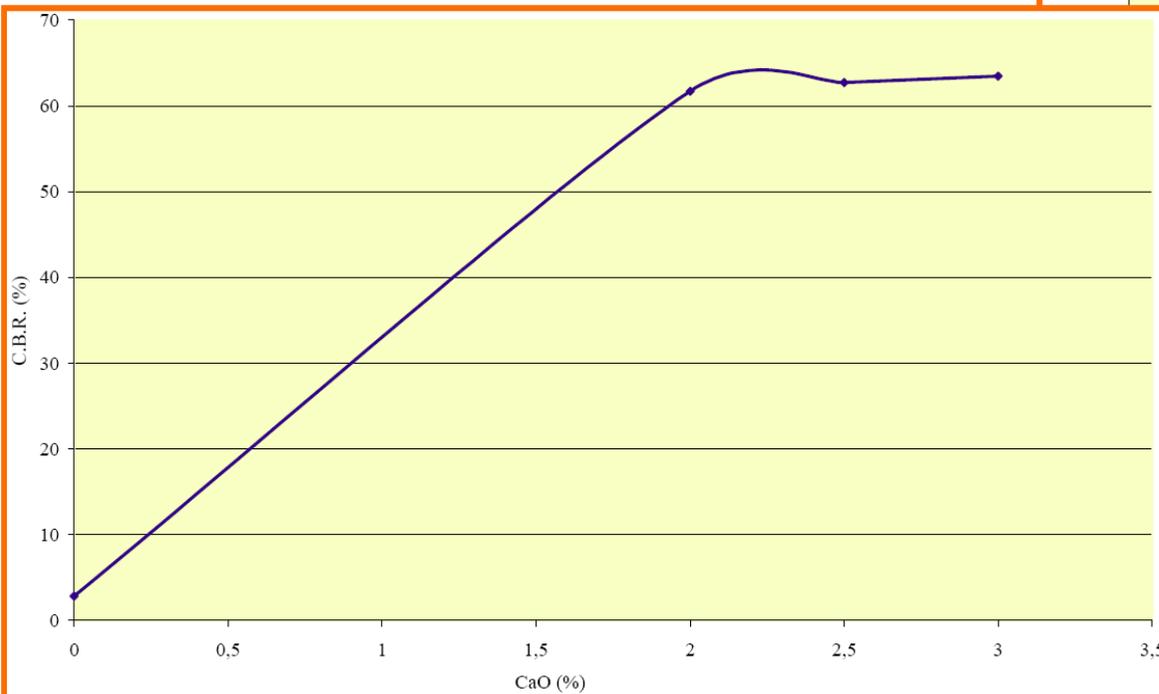
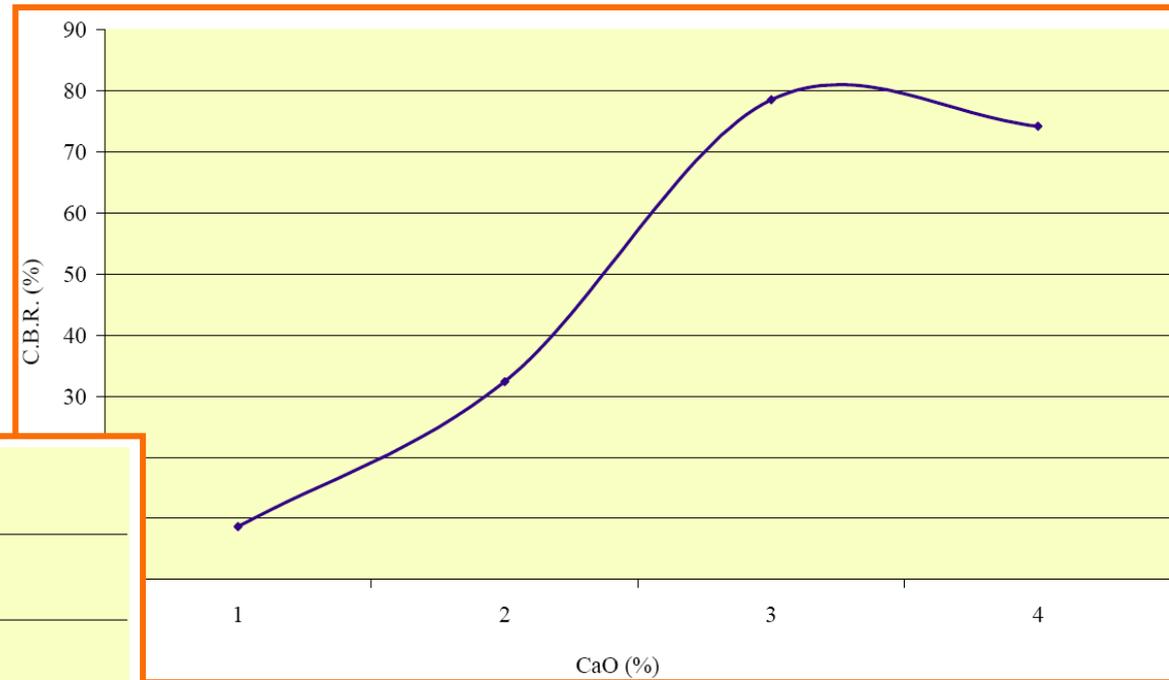
Naturale		CaO 2.0%		CaO 2.5%		CaO 3.0%	
W(%)	γ_d	W(%)	γ_d	W(%)	γ_d	W(%)	γ_d
9,36	17.660	7,53	16.691	7,64	16.279	7,95	16.342
12,38	17.946	10,32	16.909	10,68	16.950	10,54	16.782
15,09	17.905	13,39	17.281	13,42	17.393	13,45	17.306
17,81	17.004	16,36	17.528	16,19	17.416	16,32	17.256
		19,39	16.629	19,24	16.648	19,3	16.605
		22,12	15.693	21,93	15.786	21,91	15.760



Linea Bologna - Verona **i risultati dello studio delle miscele**

Indice di Portanza Immediata

A₄



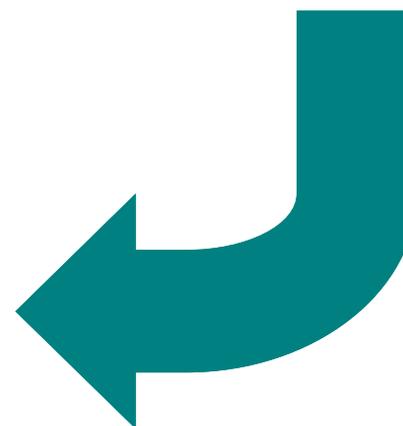
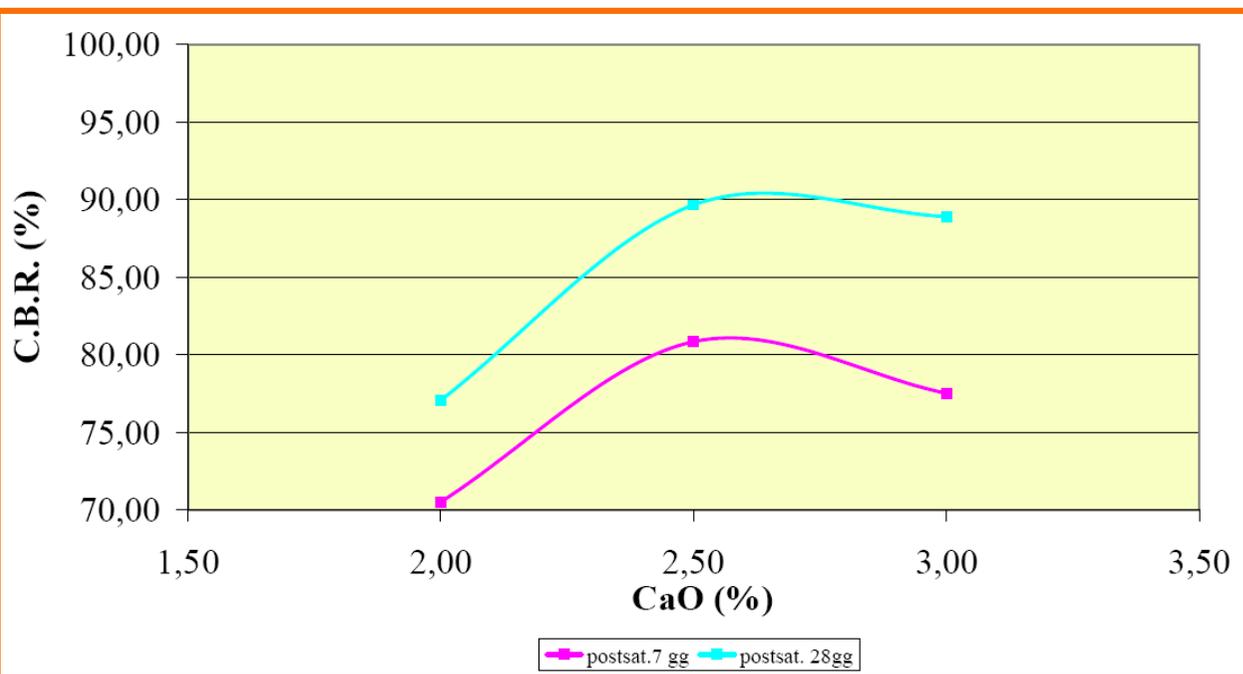
A₆ - A₇₋₆ - A₇₋₅

Linea Bologna - Verona **i risultati dello studio delle miscele**

INDICE CBR

A₆ - A₇₋₆ - A₇₋₅

Postsatur. - 7 gg + 4 gg		Postsatur. - 28 gg + 4 gg	
C.B.R. (%)	CaO(%)	C.B.R. (%)	CaO(%)
70,50	2,00	77,05	2,00
80,83	2,50	89,64	2,50
77,50	3,00	88,89	3,00

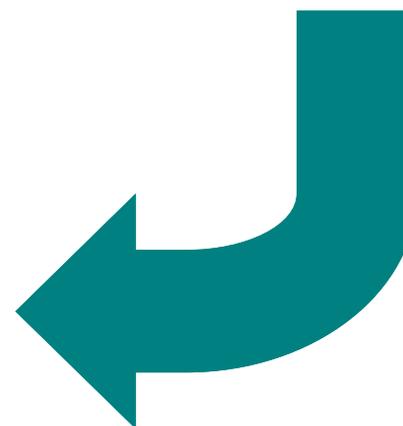
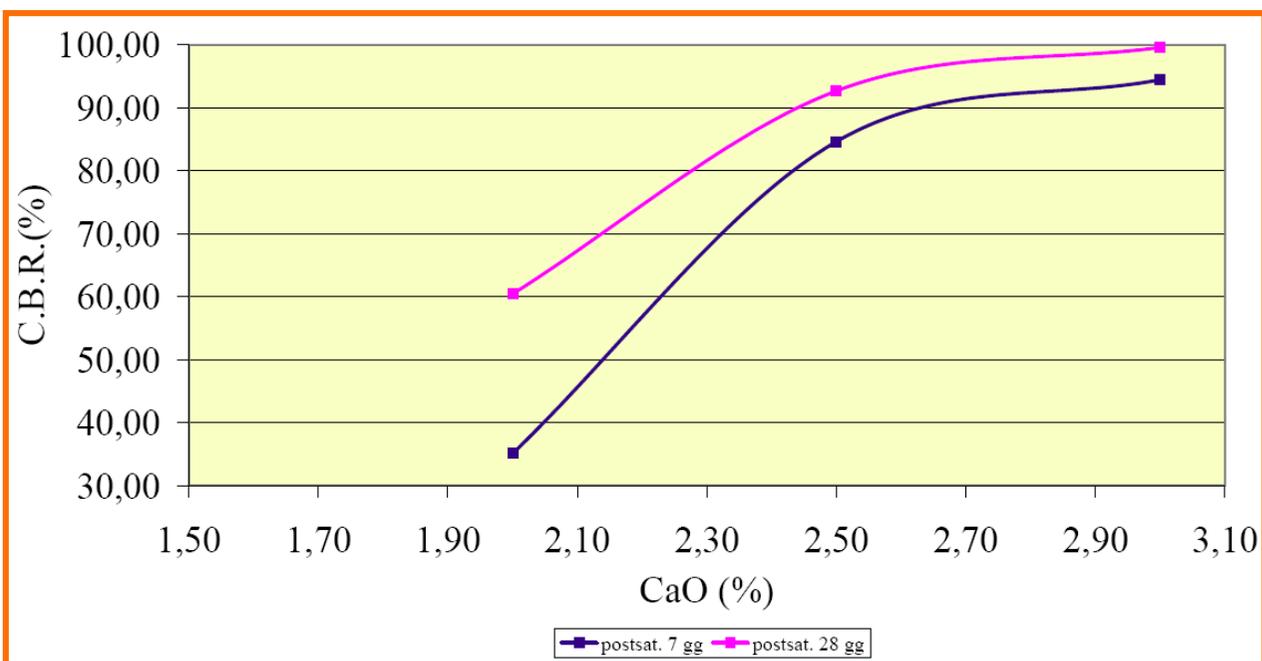


Linea Bologna - Verona **i risultati dello studio delle miscele**

INDICE CBR

A₄

Postsatur. - 7 gg + 4 gg		Postsatur. - 28 gg + 4 gg	
C.B.R. (%)	CaO(%)	C.B.R. (%)	CaO(%)
35,08	2,00	60,43	2,00
84,60	2,50	92,66	2,50
94,42	3,00	99,54	3,00

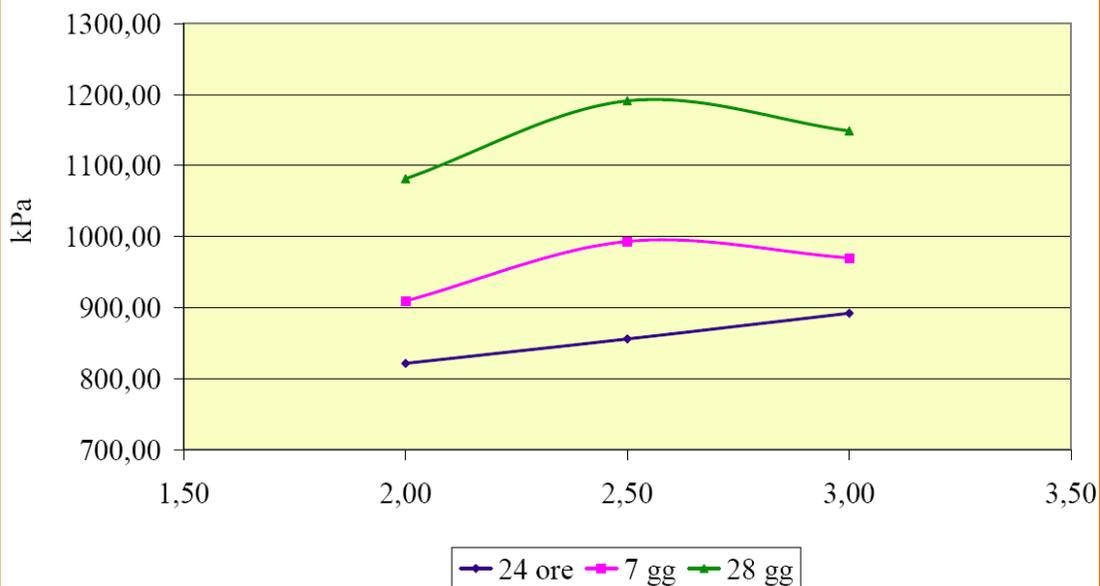


Linea Bologna - Verona i risultati dello studio delle miscele

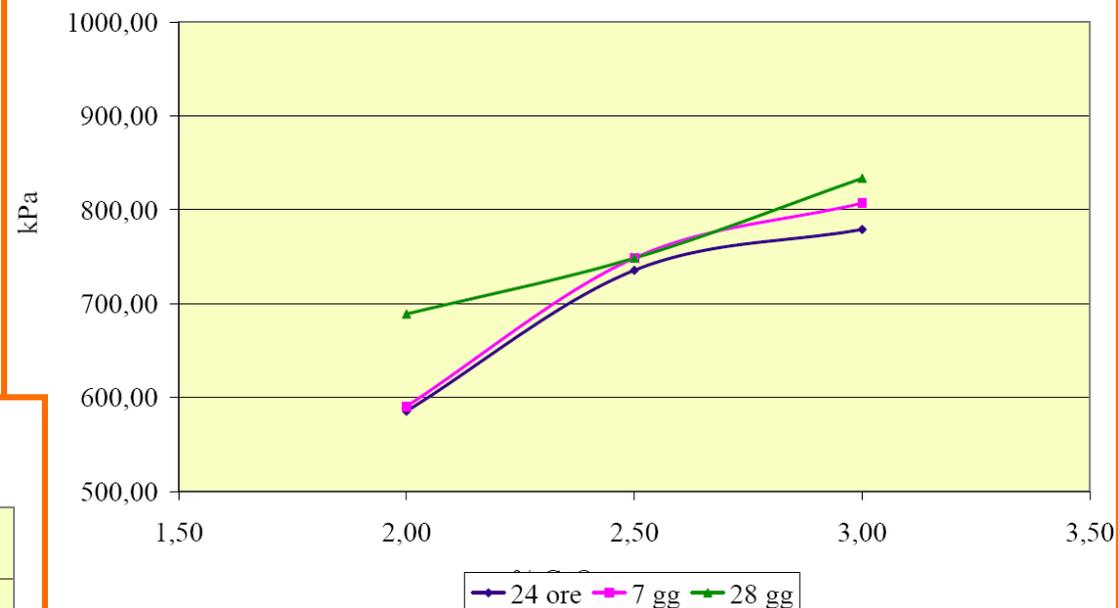
Resistenza a compressione

A₄

COMPRESSIONE SEMPLICE



COMPRESSIONE SEMPLICE



A₆ - A₇₋₆ - A₇₋₅

Linea Bologna - Verona **i campi prova**

Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio sono stati eseguiti 2 campi prova, uno per ognuno dei due tipologie di terreno

In entrambi i casi le percentuali di ossido di calce utilizzate sono (% in peso):

➤ **2,0 %**

➤ **2,5 %**

Linea Bologna - Verona **i campi prova**

Per la realizzazione del campo prova sono state eseguite le stesse operazioni previste per la successiva realizzazione dei rilevati:

- **scotico del terreno interessato dal campo per una profondità di 30 cm ed allontanamento del terreno di risulta**
- **fresatura del terreno di base per una profondità di 50 cm, fino a che le zolle abbiano una dimensione tale che tutto il terreno risulti passante al setaccio con aperture da 40 mm**
- **controllo dell'umidità del terreno fresato**
- **taratura della spandicalce al fine di ottenere il dosaggio di calce voluto**
- **determinazione degli schemi di rullatura in area adiacente al campo prova**
- **spandimento della calce ed ulteriore fresatura del terreno al fine di ottenere una miscelazione omogenea e comunque fino a che tutto il terreno miscelato non risulti passante al setaccio da 25 mm**

Linea Bologna - Verona **i campi prova**

- **controllo dell'umidità della miscela terra-calce**
- **compattazione dello strato di terreno in sito così ottenuto, con passaggi di rullo a piastre e successivi passaggi di rullo liscio sia in conformazione statica che vibrante, così come previsto dallo schema precedentemente determinato**
- **esecuzione delle prove di controllo previste**
- **realizzazione del secondo strato del cassonetto di bonifica e degli altri 3 strati successivi, dello spessore di 30 cm, con terreno miscelato con ossido di calcio in un' area adiacente al campo prova**

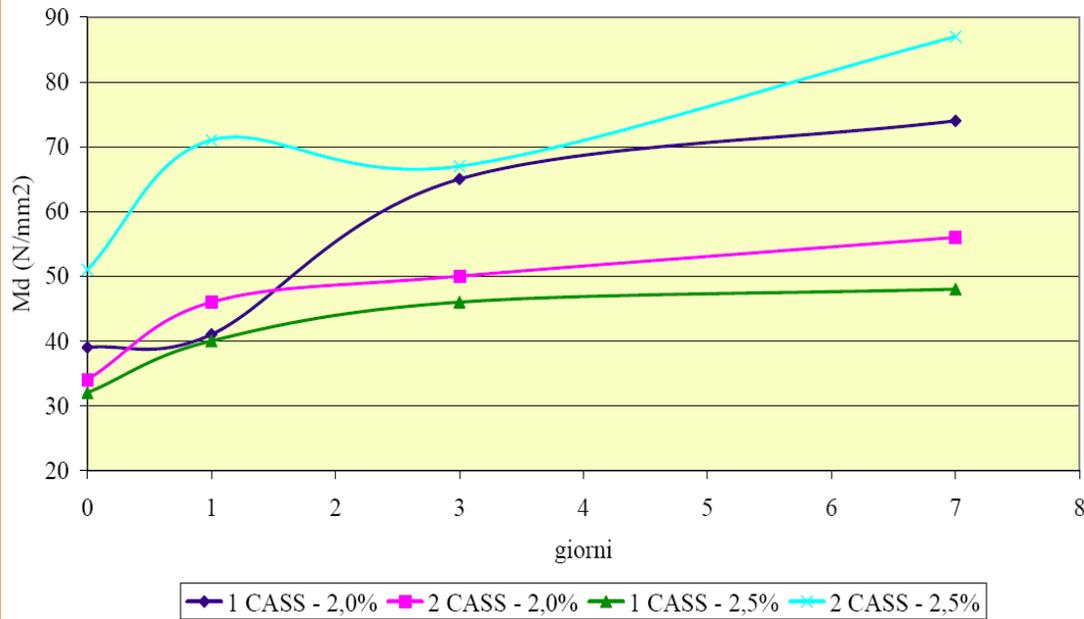
Appare evidente che dovendo eseguire le prove di controllo in giorni successivi alla messa in opera del terreno stabilizzato gli strati successivi a quello di bonifica in sito avevano una larghezza decrescente lasciando una striscia dello strato sottostante accessibile per l' esecuzione delle prove.

I risultati dei campi prova – Piano di imposta

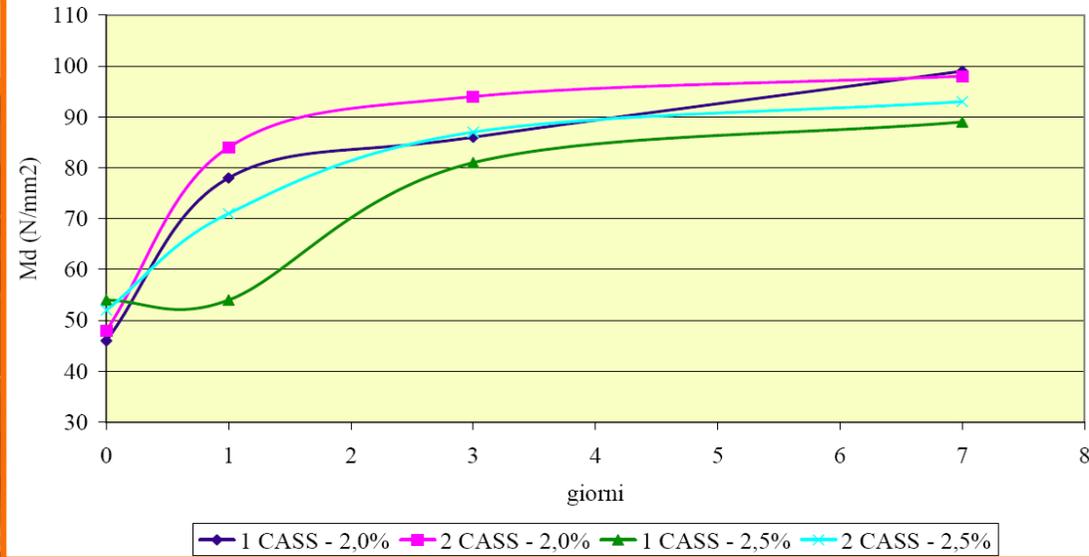
Densità in sito

> 90%

ANDAMENTO MODULO PIANO DI IMPOSTA



ANDAMENTO MODULO PIANO DI IMPOSTA



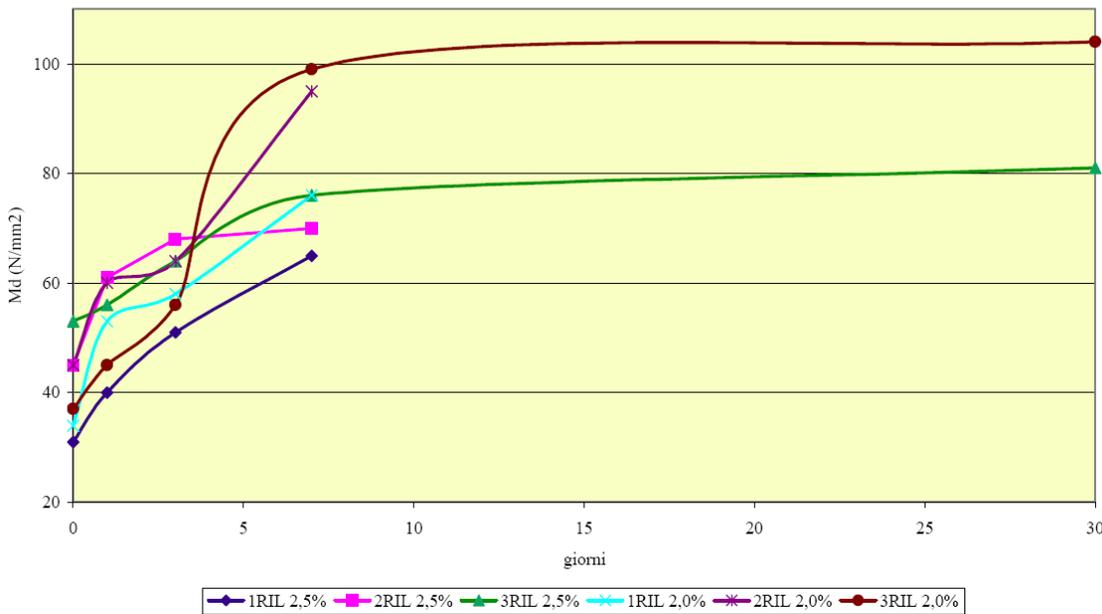
I risultati dei campi prova – **Corpo rilevato**

Densità in sito

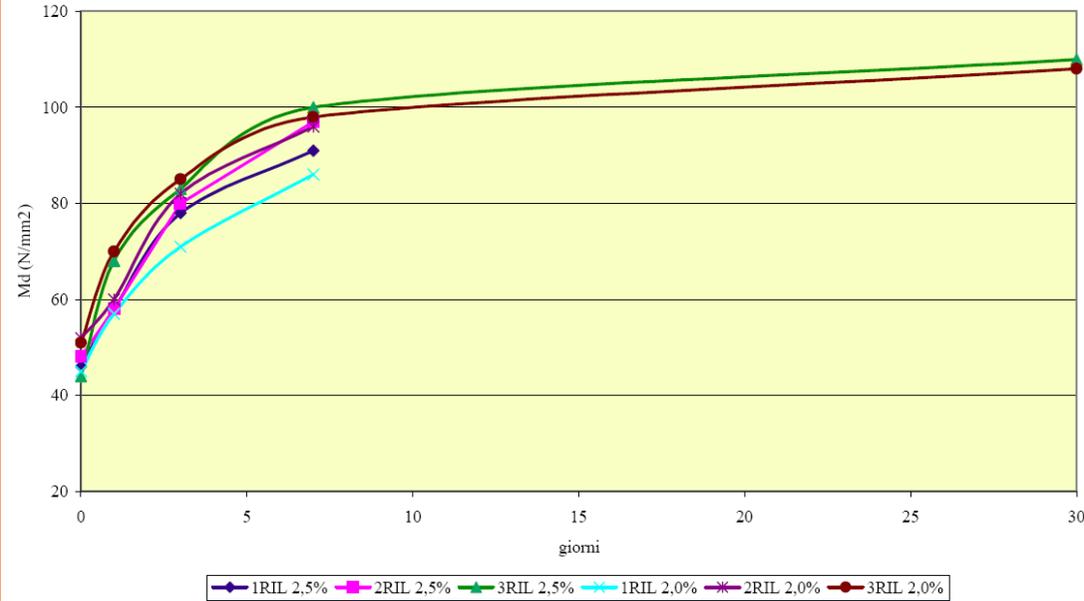
> 95%

COZZI-PONTELLO

ANDAMENTO MODULO CORPO RILEVATO



ANDAMENTO MODULO CORPO RILEVATO



I risultati dei campi prova – Prove triassiali

Dall' ultimo strato si sono prelevati dei blocchi di terreno stabilizzato e sono stati ricavati diversi provini per prove triassiali UU e CD

Le prove sono state eseguite su provini:

➤ **Tali e quali (TQ)**

- ❑ Sottoposti a 5 cicli di imbibizione ed essiccamento (completa imbibizione in acqua per 4 giorni ed essiccamento in forno a 105° per 24 ore) e successiva saturazione in acqua per 7 giorni (R)

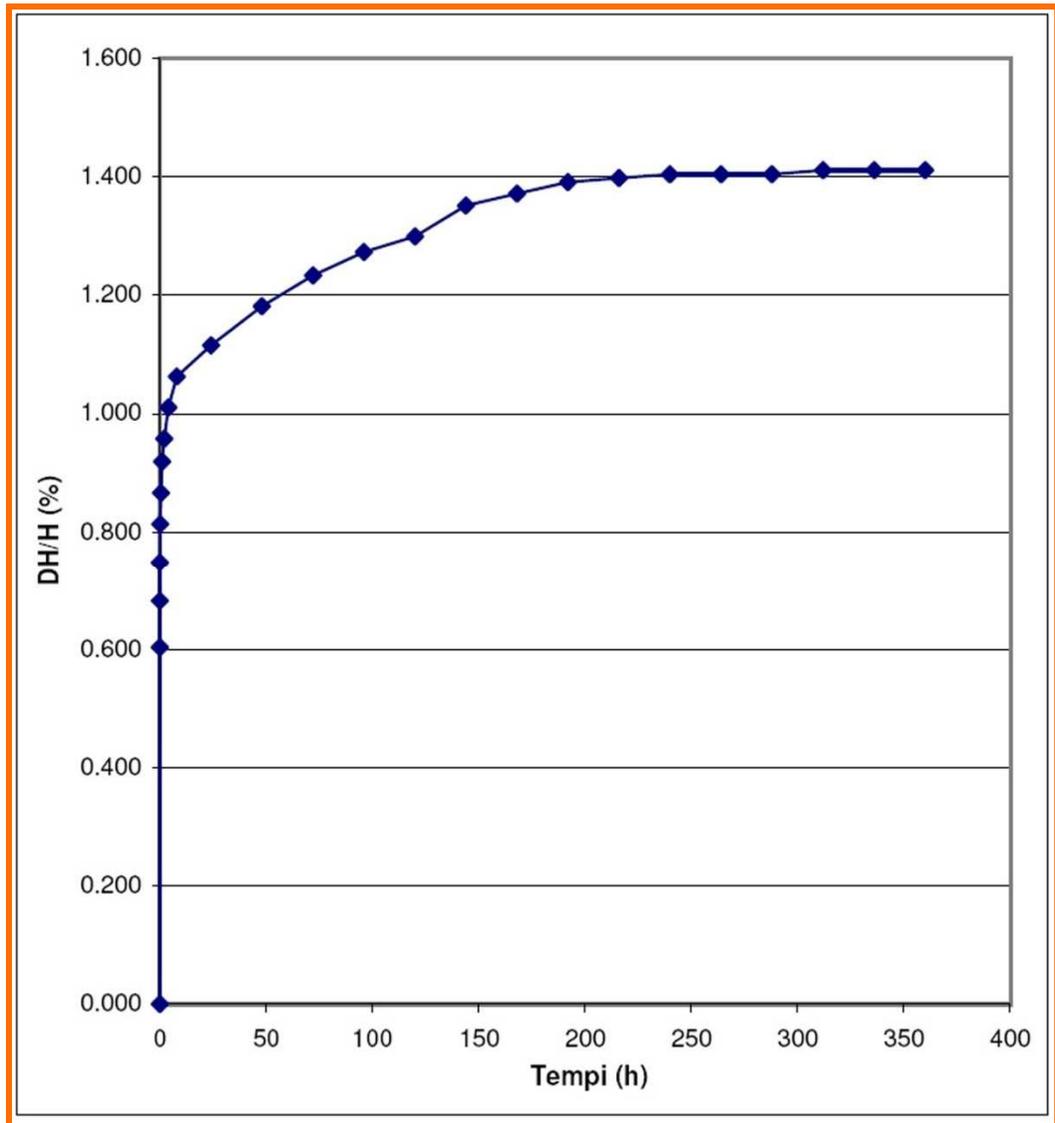
Campione	% CaO	c' (KPa)	φ' (° sess.)	c_u (KPa)
A ₄ TQ	2.0	57	34	672
A ₄ R	2.0	77	30	547
A ₈ -A ₇₋₆ -A ₇₋₅ TQ	2.0	32	35	446
A ₈ -A ₇₋₆ -A ₇₋₅ R	2.0	75	34	332

I risultati dei campi prova – Prove di creep

A₄ Tal quale

Carico Verticale 650 KPa)

Deformazione Massima 1,075 mm

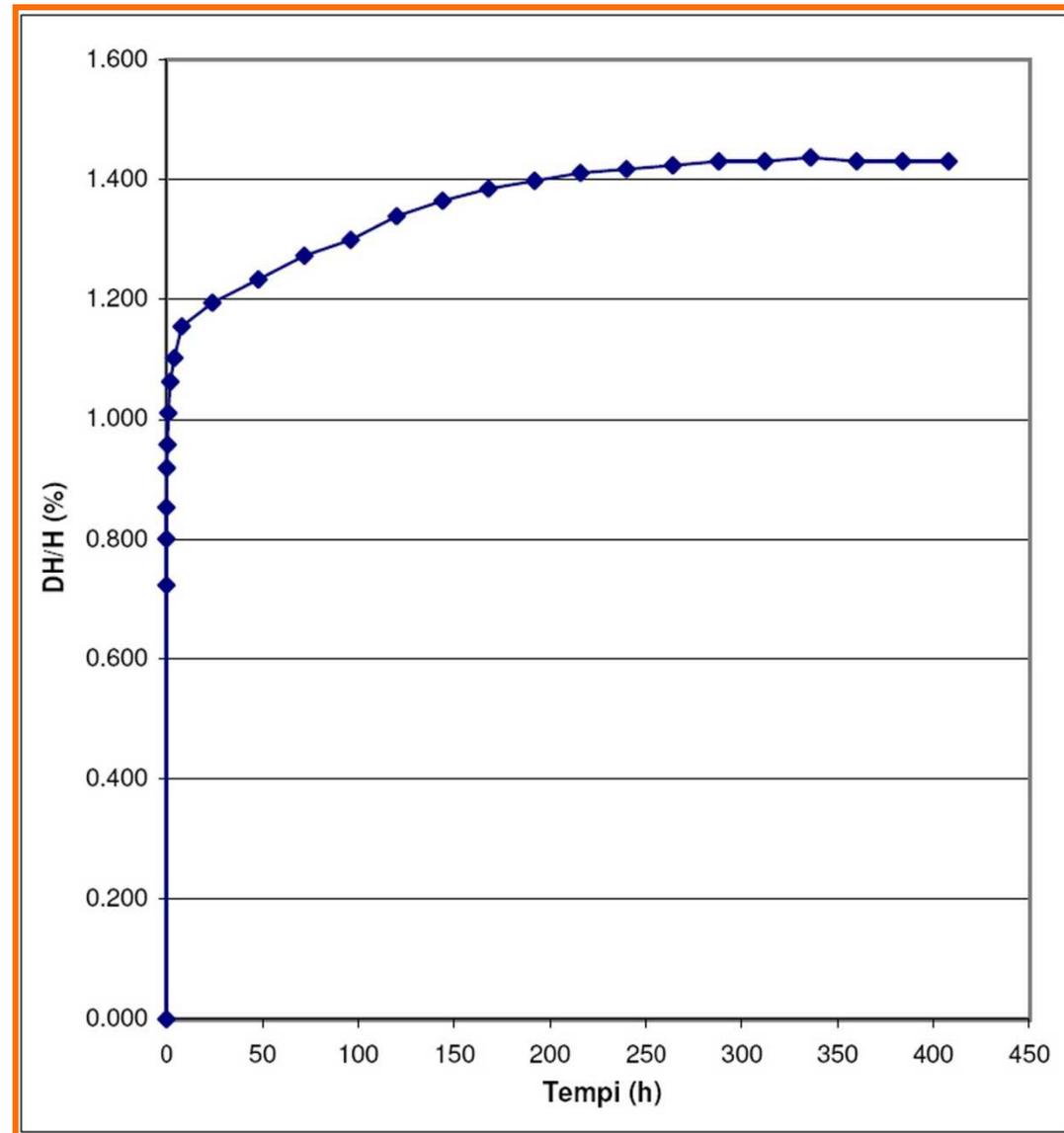


I risultati dei campi prova – Prove di creep

A₄ dopo cicli di imbibizione ed essiccamento e saturazione

Carico Verticale 600 KPa)

Deformazione Massima 1,090 mm

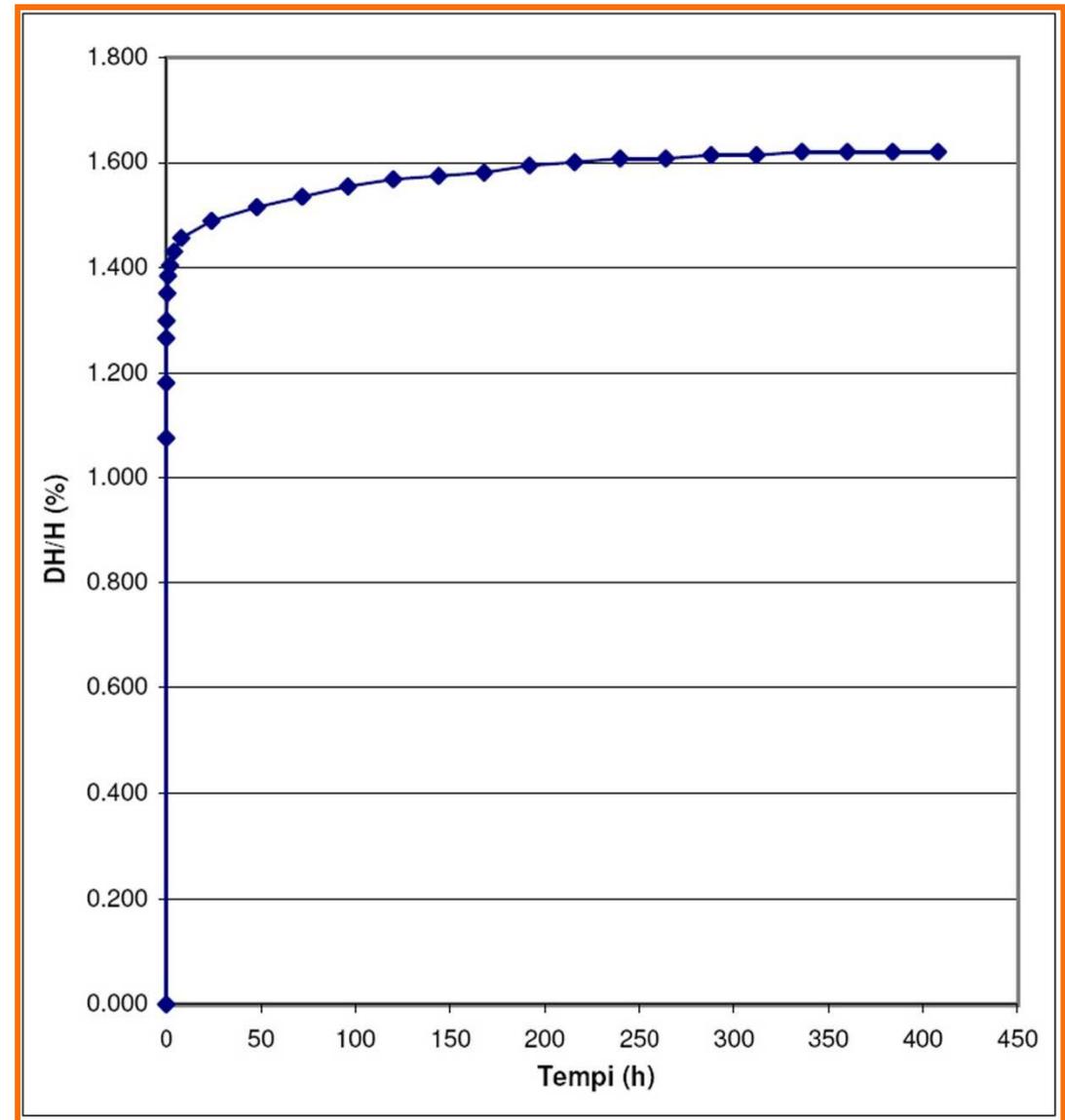


I risultati dei campi prova – Prove di creep

A₆ Tal quale

Carico Verticale 600 KPa)

Deformazione Massima 1,235 mm

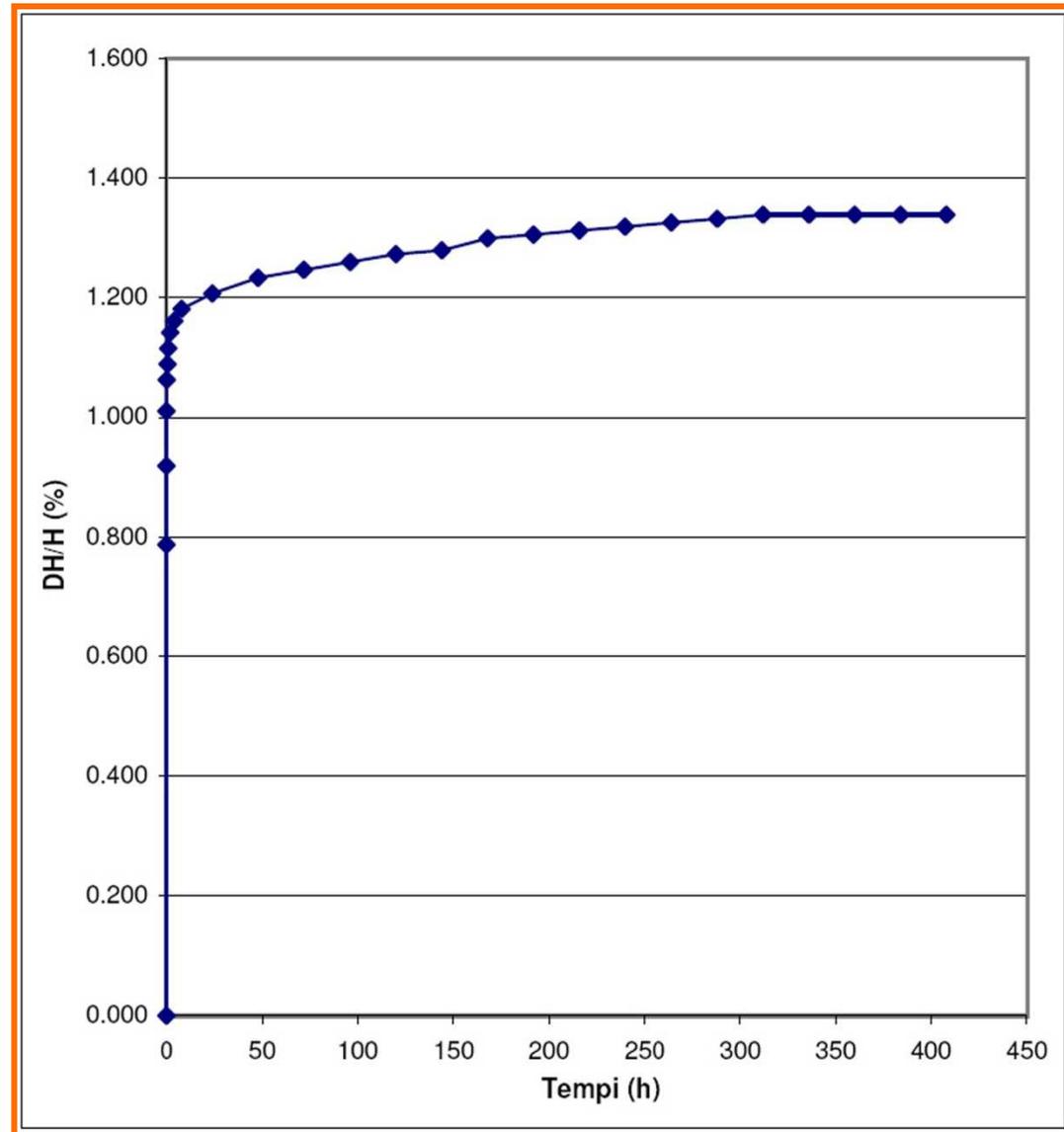


I risultati dei campi prova – Prove di creep

A₆ dopo cicli di imbibizione ed essiccamento e saturazione

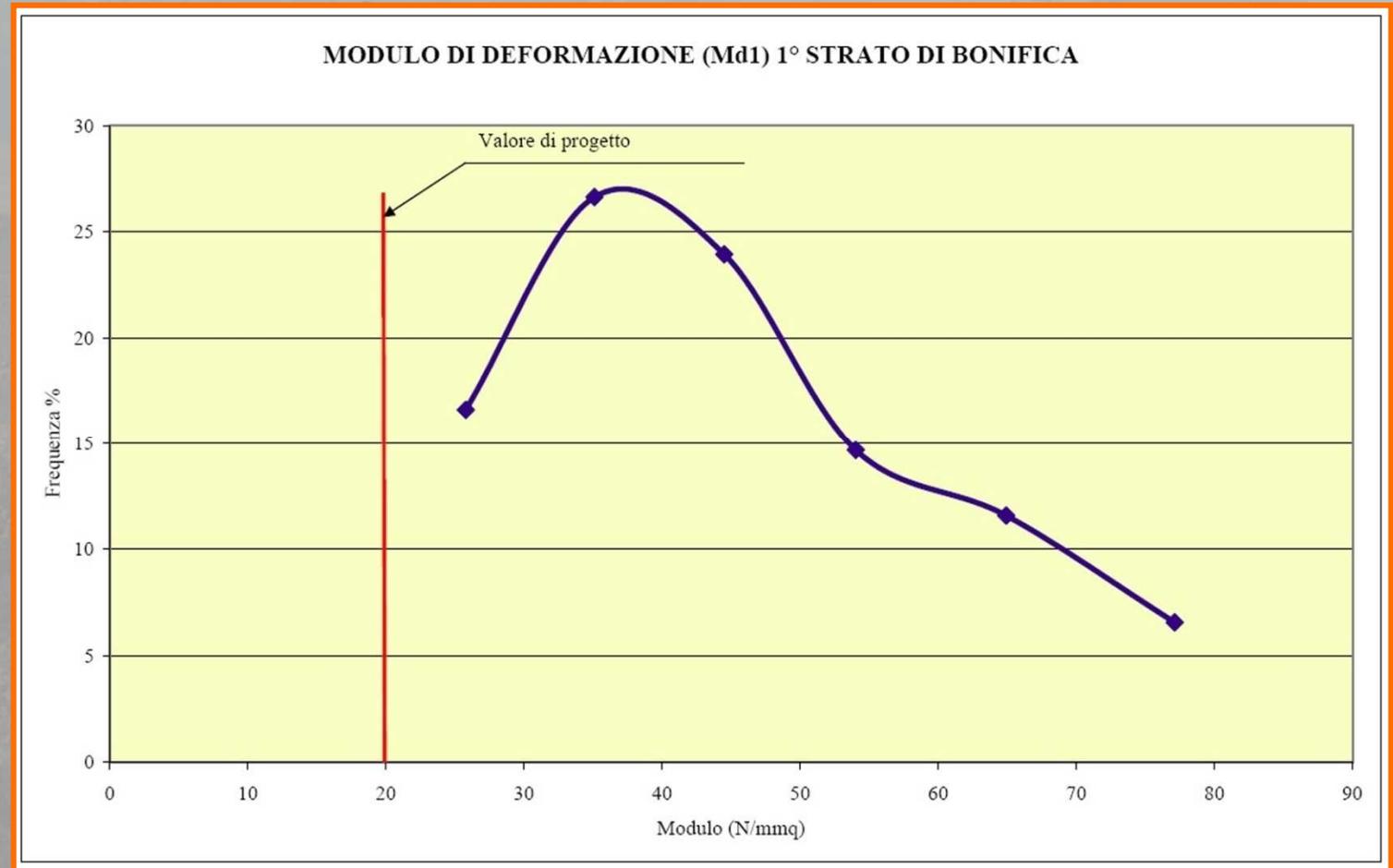
Carico Verticale 550 KPa)

Deformazione Massima 1,120 mm



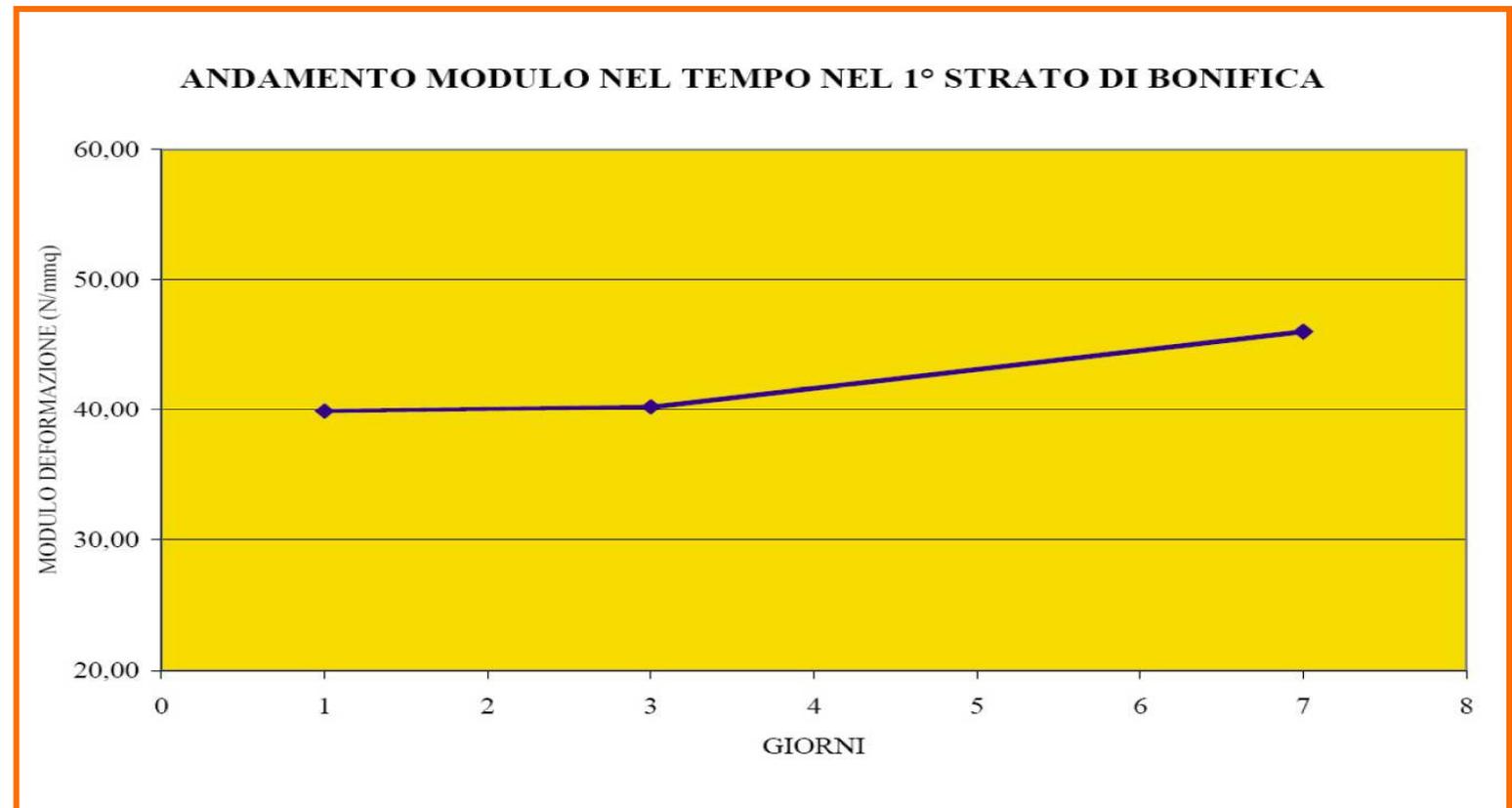
Rilevati – Prove di controllo 1° strato bonifica in sito

La media del Modulo di deformazione è stata di **44,69** N/mm² con una deviazione standard di **14,61** N/mm²



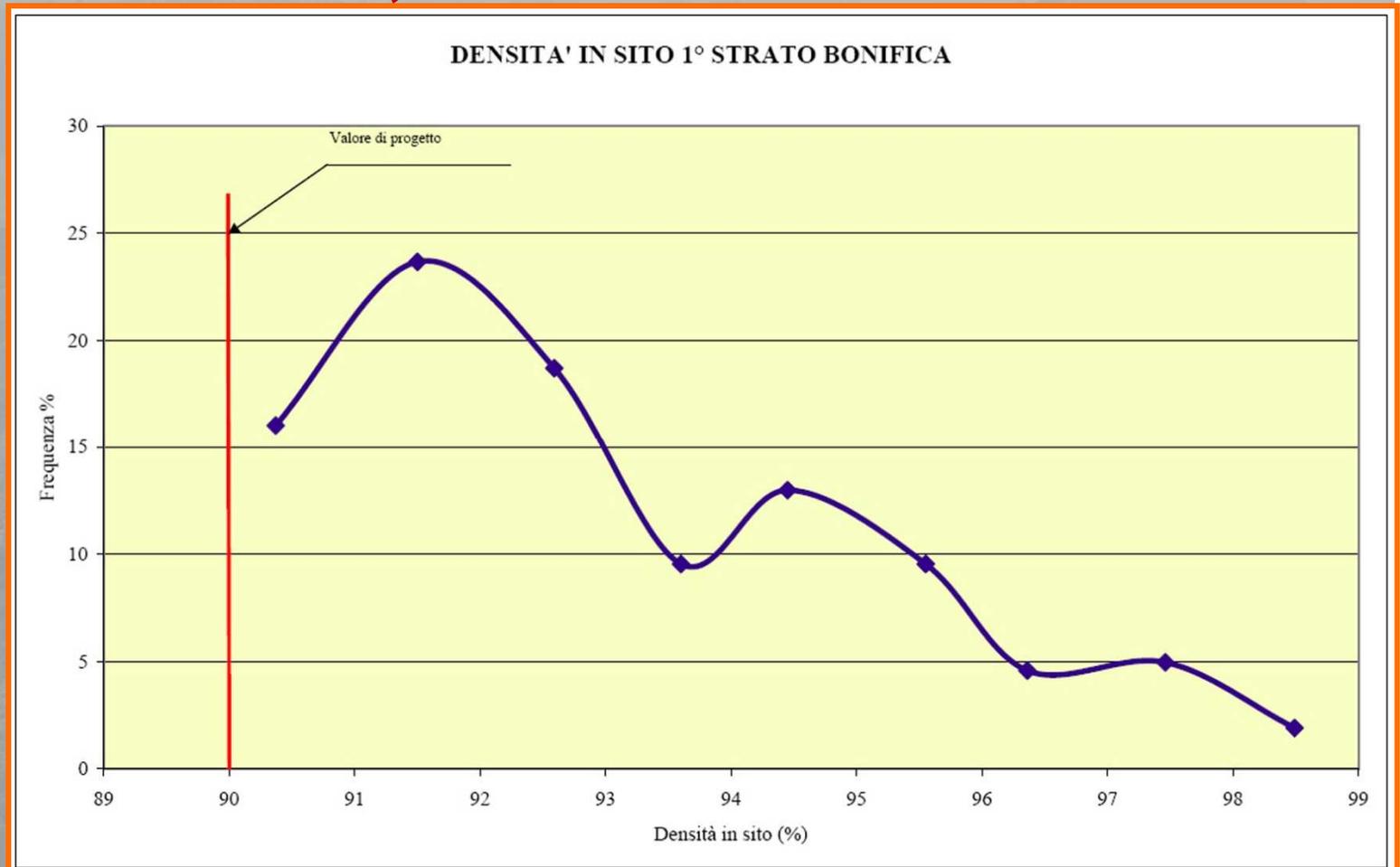
Rilevati – Prove di controllo 1° strato bonifica in sito

GIORNI	MODULO DEFORMAZIONE	DEVIAZIONE STANDARD
g	N/mm ²	N/mm ²
1	47,98	12,91
3	49,21	19,09
7	51,43	16,91



Rilevati – Prove di controllo 1° strato bonifica in sito

La media della densità in sito è stata **93,07 %** una deviazione standard di **2,15 %**



Rilevati – Prove di controllo 2° strato bonifica

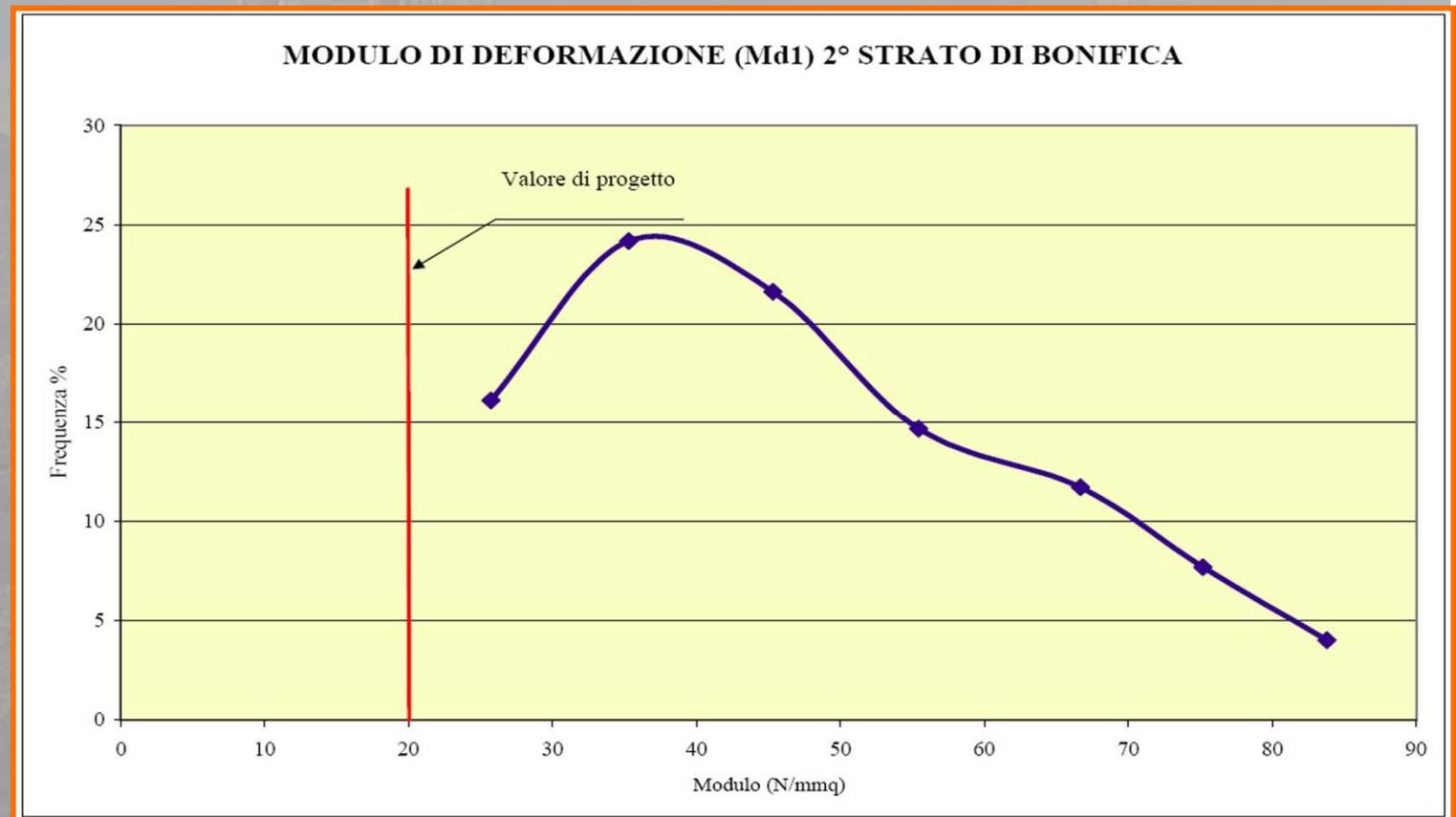
MODULO DI DEFORMAZIONE:

media

48,45 N/mm²

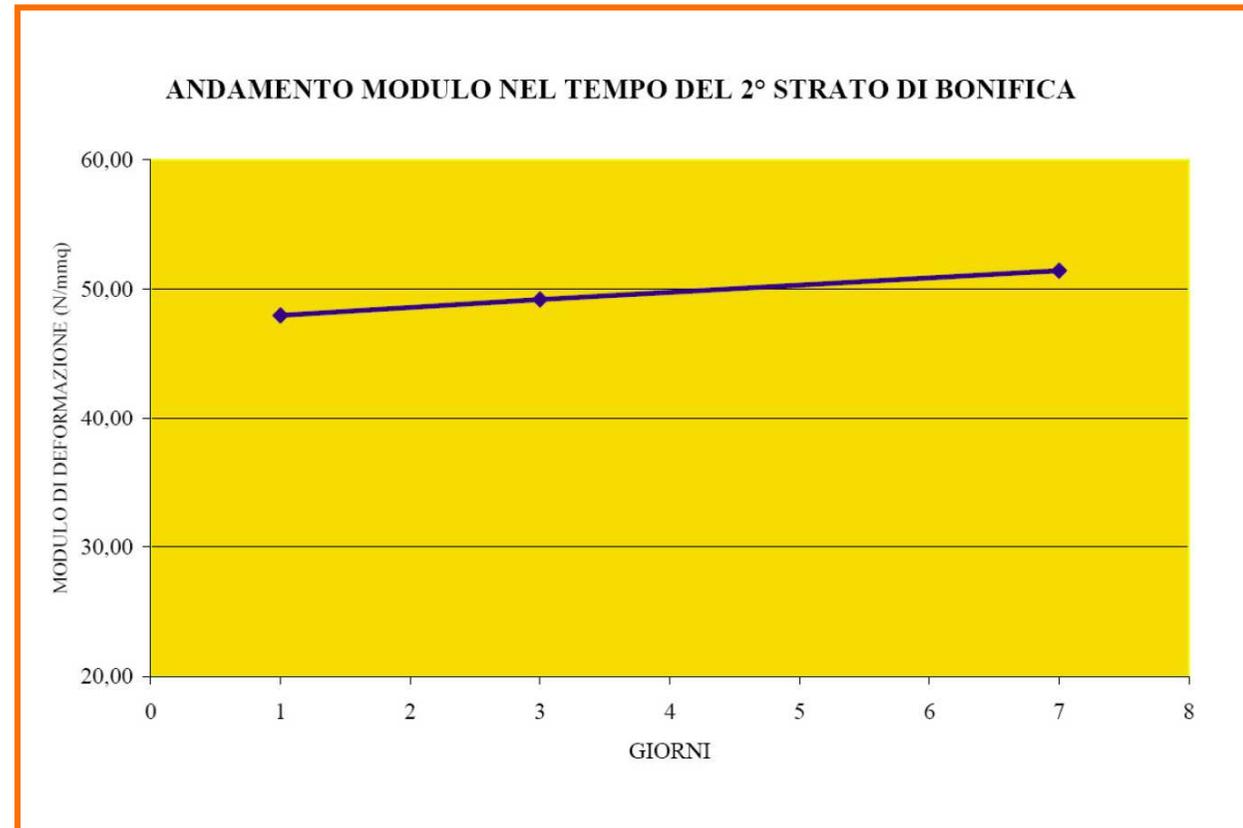
deviazione standard

17,91 N/mm²



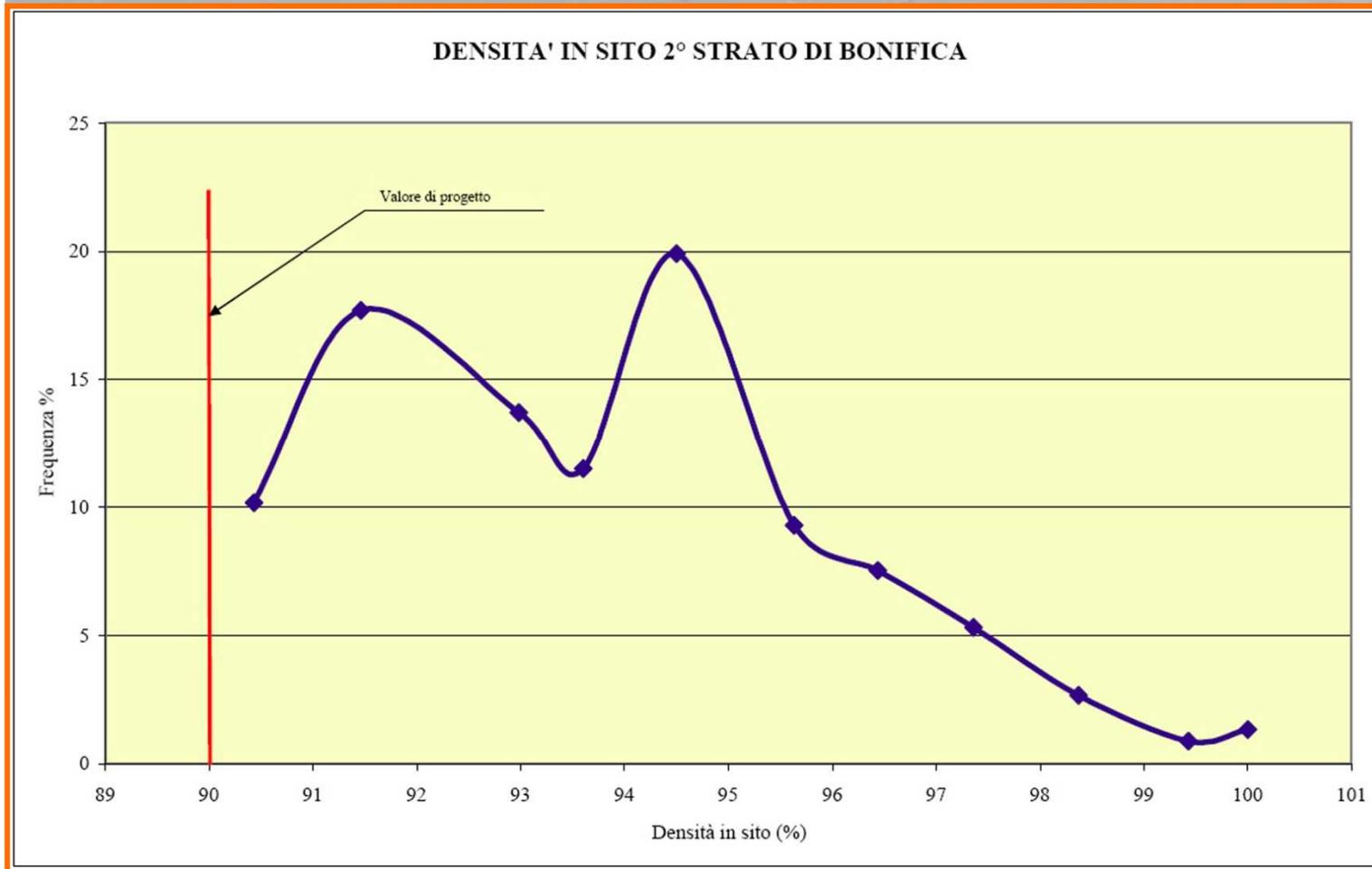
Rilevati – Prove di controllo 2° strato di bonifica

GIORNI g	MODULO DEFORMAZIONE N/mm ²	DEVIAZIONE STANDARD N/mm ²
1	47,98	12,91
3	49,21	19,09
7	51,43	16,91



Rilevati – Prove di controllo 2° strato bonifica

La media della densità in sito è stata **93,80 %** una deviazione standard di **2,32 %**

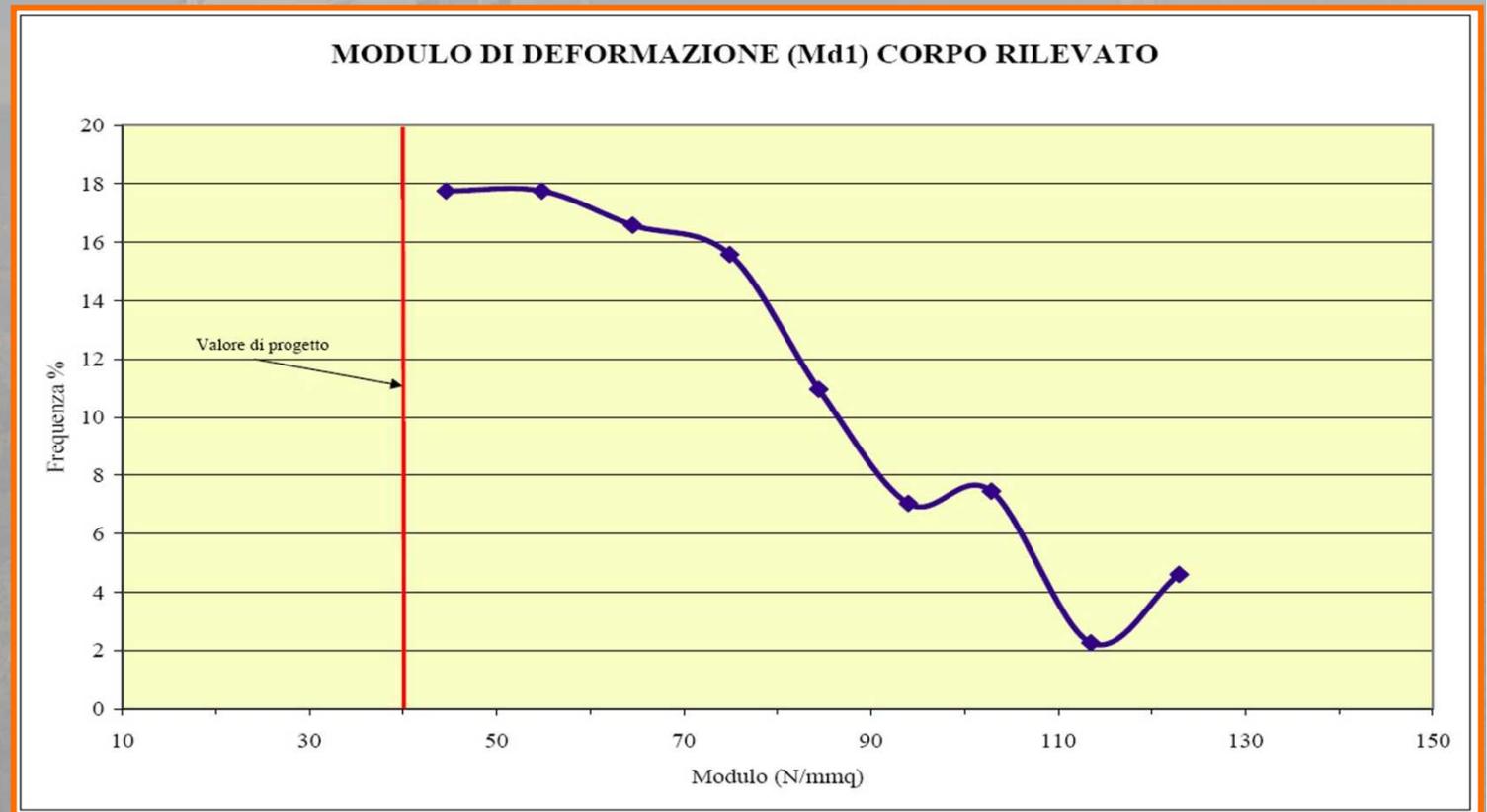


Rilevati – Prove di controllo corpo rilevato

MODULO DI DEFORMAZIONE

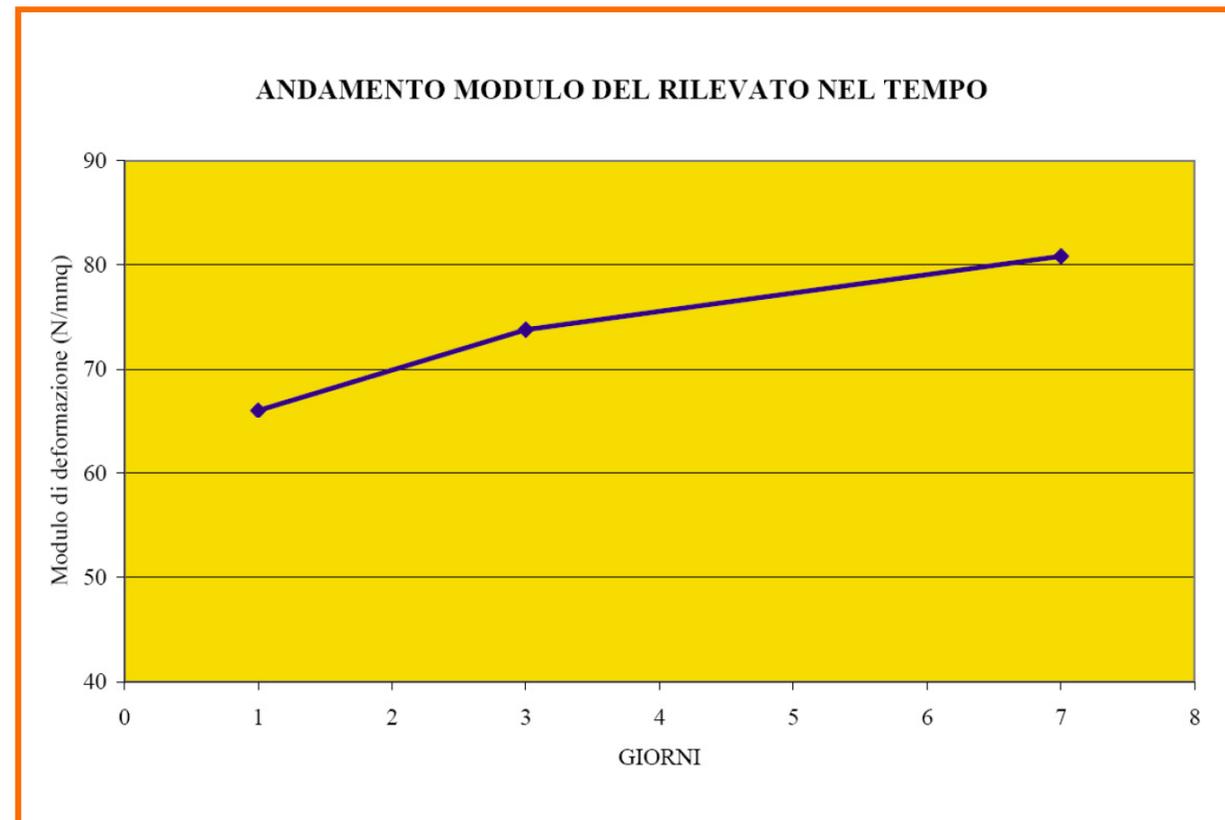
media **71,74 N/mm²**

deviazione standard **22,08 N/mm²**



Rilevati – Prove di controllo corpo rilevato

TEMPO g	MODULO DEFORMAZIONE N/mmq	DEVIAZIONE STANDARD N/mmq
1	66,06	19,72
3	73,79	24,56
7	80,83	23,79



Rilevati – Prove di controllo corpo rilevato

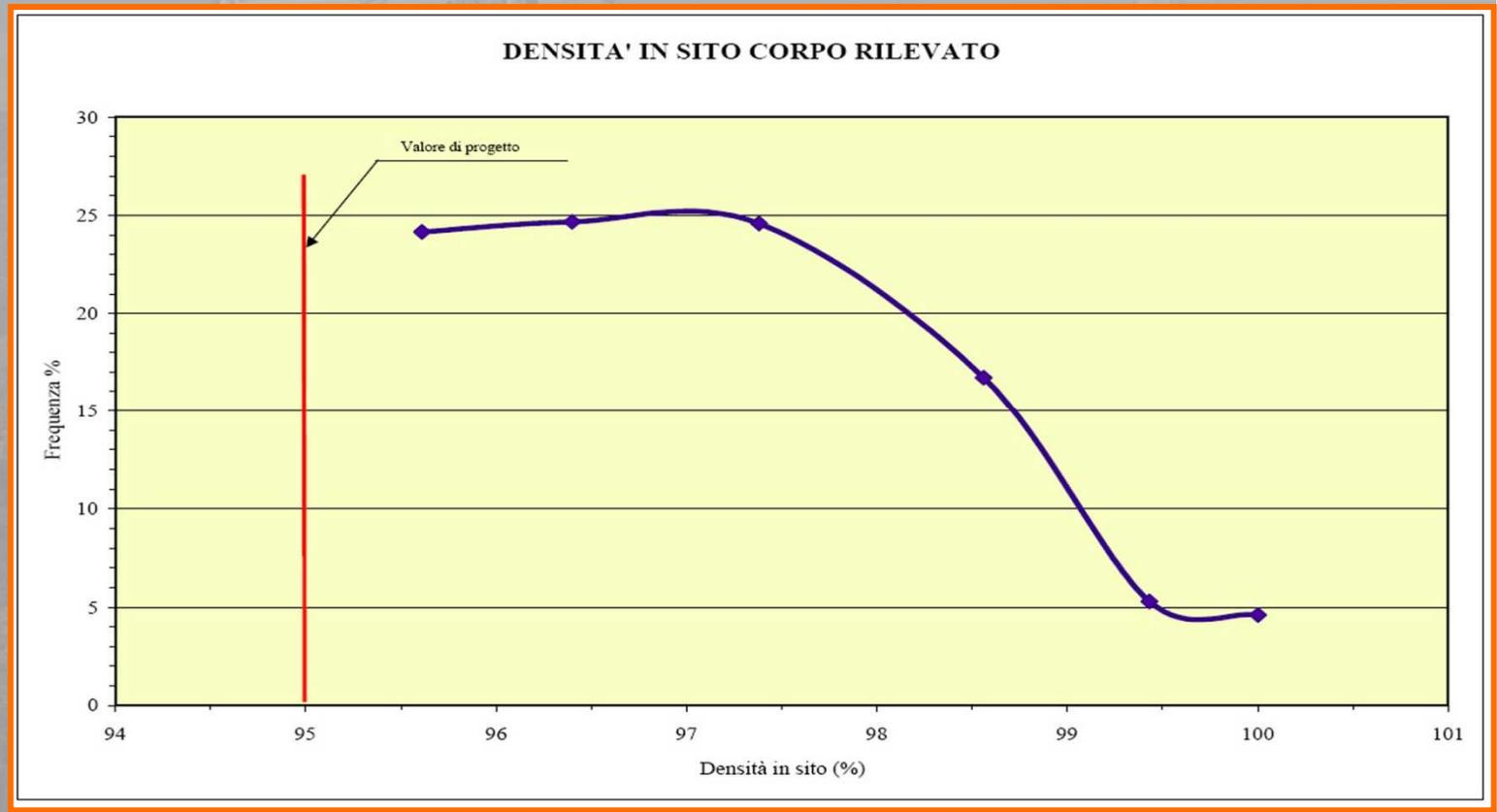
DENSITA' IN SITO

media

97,80 %

deviazione standard

2,32 %



La stabilizzazione a calce

***Linea Parma – La Spezia “Pontremolese”
Raddoppio tratta Solignano - Osteriazza***

Linea Pontremolese tratta **Solignano-Osteriaza**

Il tratto interessato dal raddoppio è tra la stazione di Solignano e il PM di Osteriaza prima dell' ingresso nella stazione di Fornovo.

Il volume di terreno proveniente dagli scavi e di cui è stato previsto da trattare per la realizzazione dei rilevati è di circa **250.000 m³**

Linea Pontremolese **lo studio delle miscele**

I terreni da studiare erano rappresentati da argilla e limo argilloso classificabili nei gruppi **A₇₋₆** ed **A₆** della classifica UNI 10006.

In considerazione del valore del consumo iniziale di calce (CIC = 1.44%), lo studio di laboratorio è stato eseguito con 3 miscele terre-calce:

- A** - contenuto di ossido di calcio del 2.0% sul peso del terreno secco
- B** - contenuto di ossido di calcio del 2.5% sul peso del terreno secco
- C** - contenuto di ossido di calcio del 3.0% sul peso del terreno secco

Le prove eseguite sui campioni di terreno naturale sono state

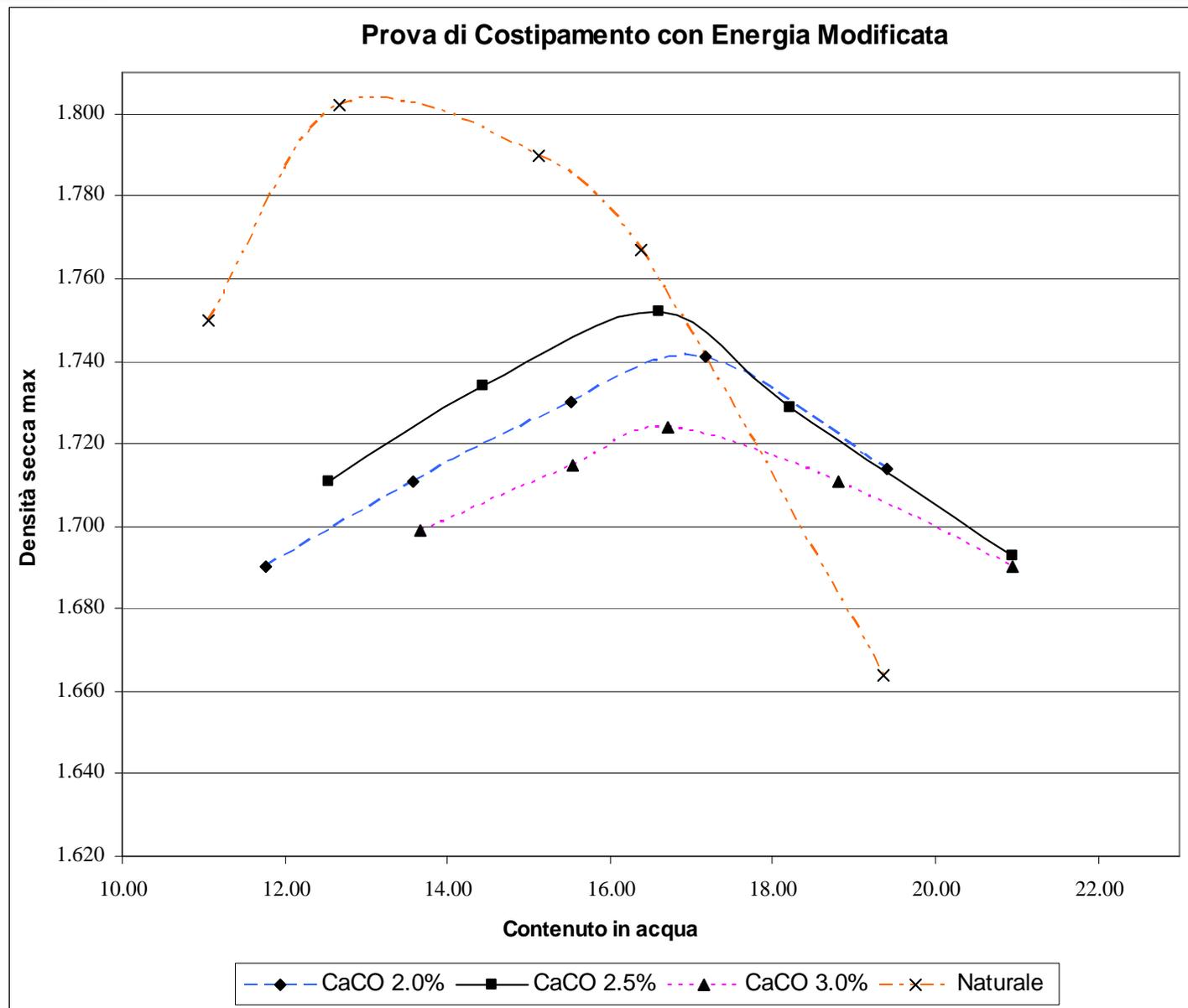
- determinazione dei limiti di Atterberg;
- analisi granulometrica per via umida con setacci e con aerometro;
- determinazione del contenuto in sostanze organiche;
- determinazione del contenuto in solfati;
- determinazione del contenuto in nitrati;
- determinazione del consumo iniziale di calce (CIC);
- prova di costipamento AASHTO Modificato;
- determinazione dell'indice di portanza immediata (IPI);
- determinazione dell'indice CBR postsaturazione

Linea Pontremolese – lo studio delle miscele

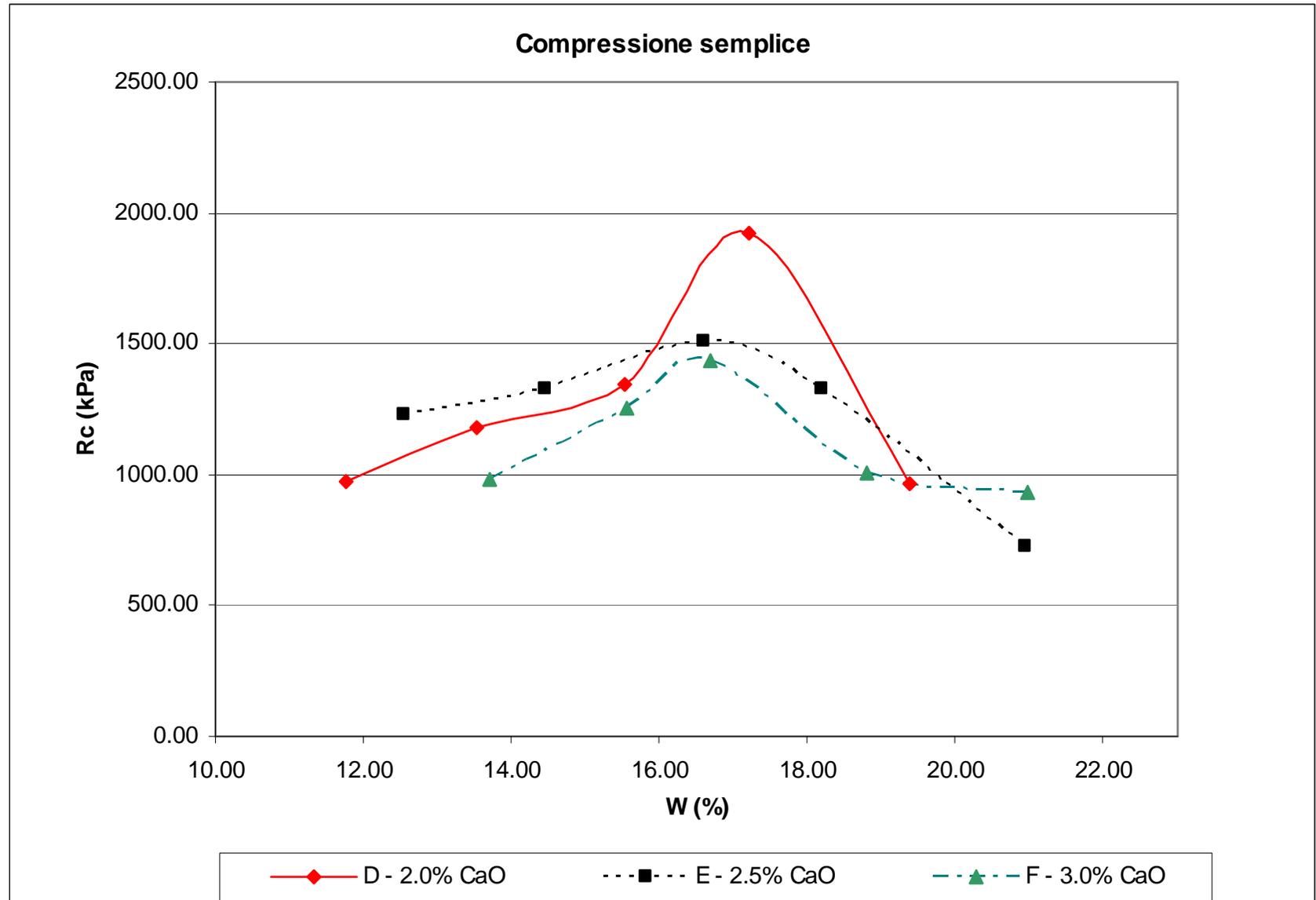
le prove eseguite sui terreni miscelati sono state:

- determinazione dei limiti di Atterberg;
- analisi granulometrica per via umida con setacci e con aerometro;
- prova di costipamento AASHTO Modificata;
- determinazione dell'indice di portanza immediata (IPI);
- determinazione dell'indice CBR postsaturazione a 7 e 28 giorni di maturazione;
- determinazione del rigonfiamento;
- determinazione della resistenza a compressione dopo 24 ore, 7 e 28 giorni di maturazione;
- maturazione;

Linea Pontremolese – lo studio delle miscele

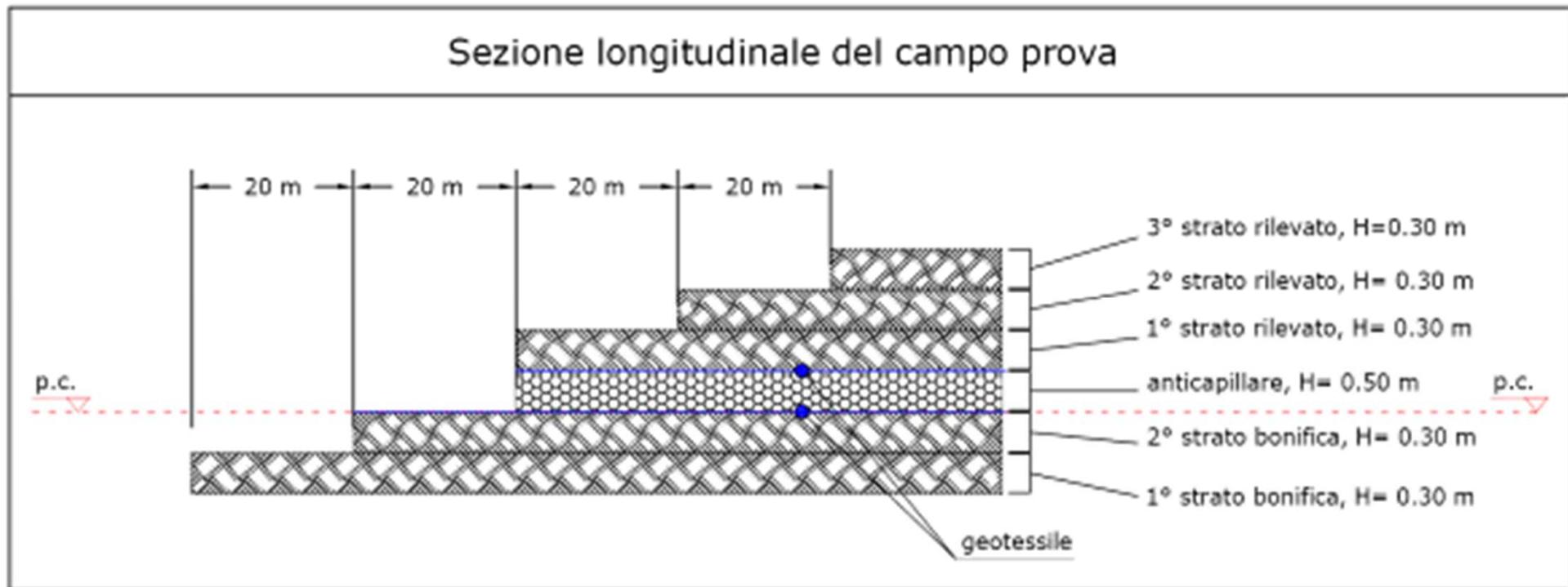


Linea Pontremolese – lo studio delle miscele



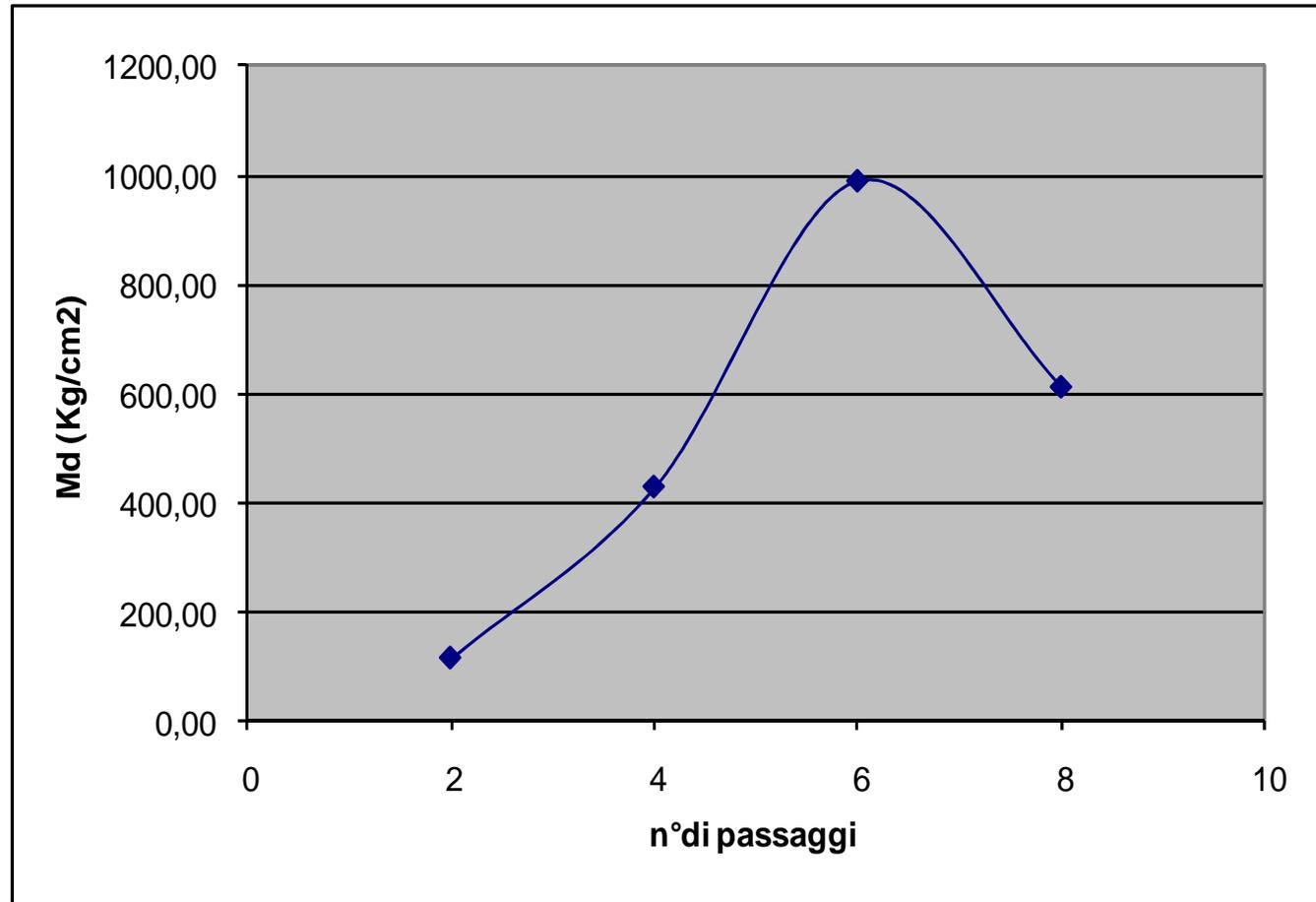
Linea Pontremolese – il campo prova

Lo schema del campo prova



Linea Pontremolese – il campo prova

Lo schema di rullatura



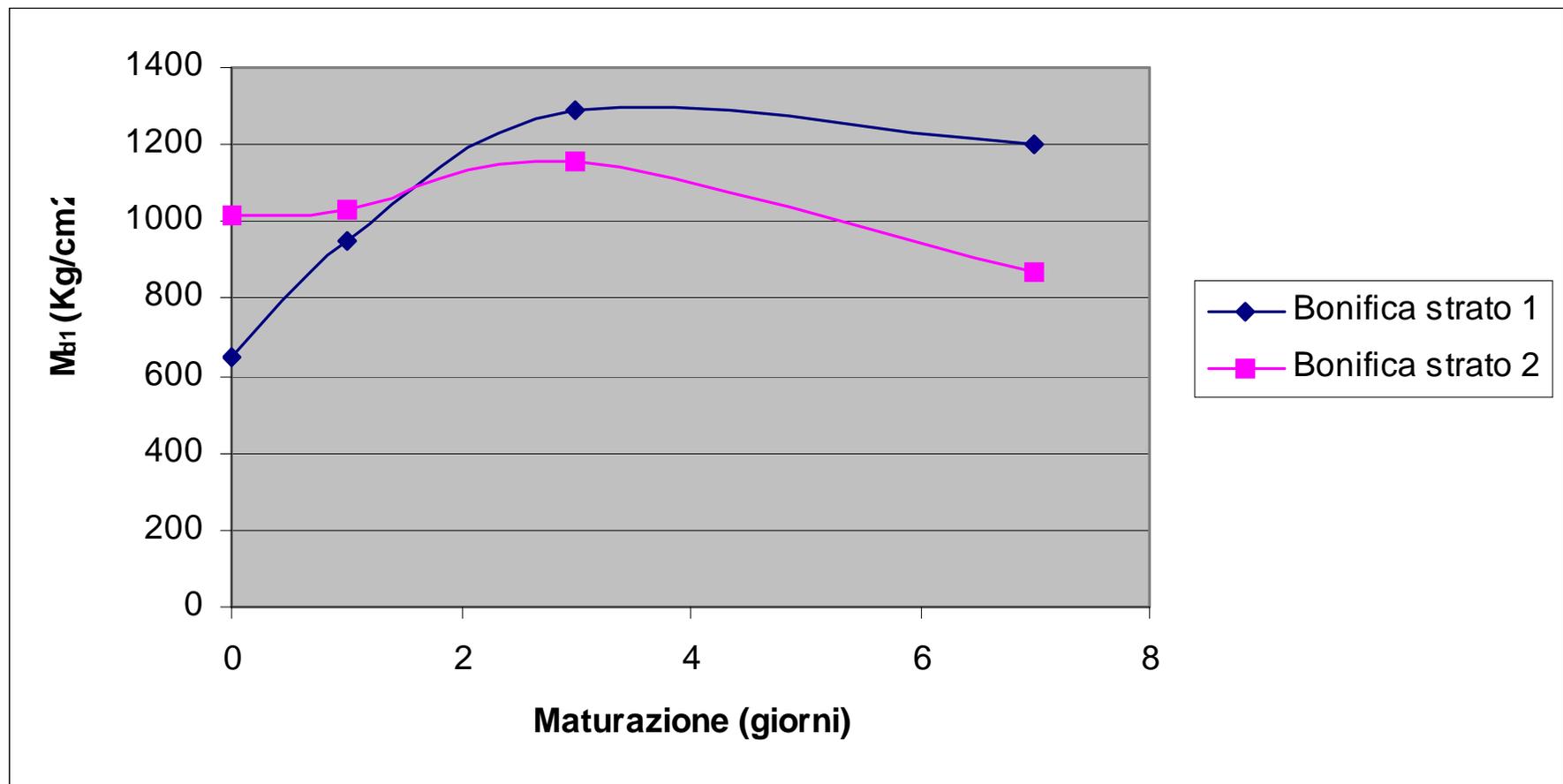
Linea Pontremolese – il campo prova

1° strato bonifica			2° strato bonifica		
Prova	γ_d	Compattazione	Prova	γ_d	Compattazione
(n°)	(Mg/m ³)	(%)	(n°)	(Mg/m ³)	(%)
1	1.663	94.9	1	1.674	95.5
2	1.667	95.1	2	1.650	94.1
3	1.704	97.2	3	1.666	95.0
4	1.652	94.3	---	---	---
Media	1.670	95.3	Media	1.663	94.8

I risultati dei campi prova – **Bonifica**

Densità in sito

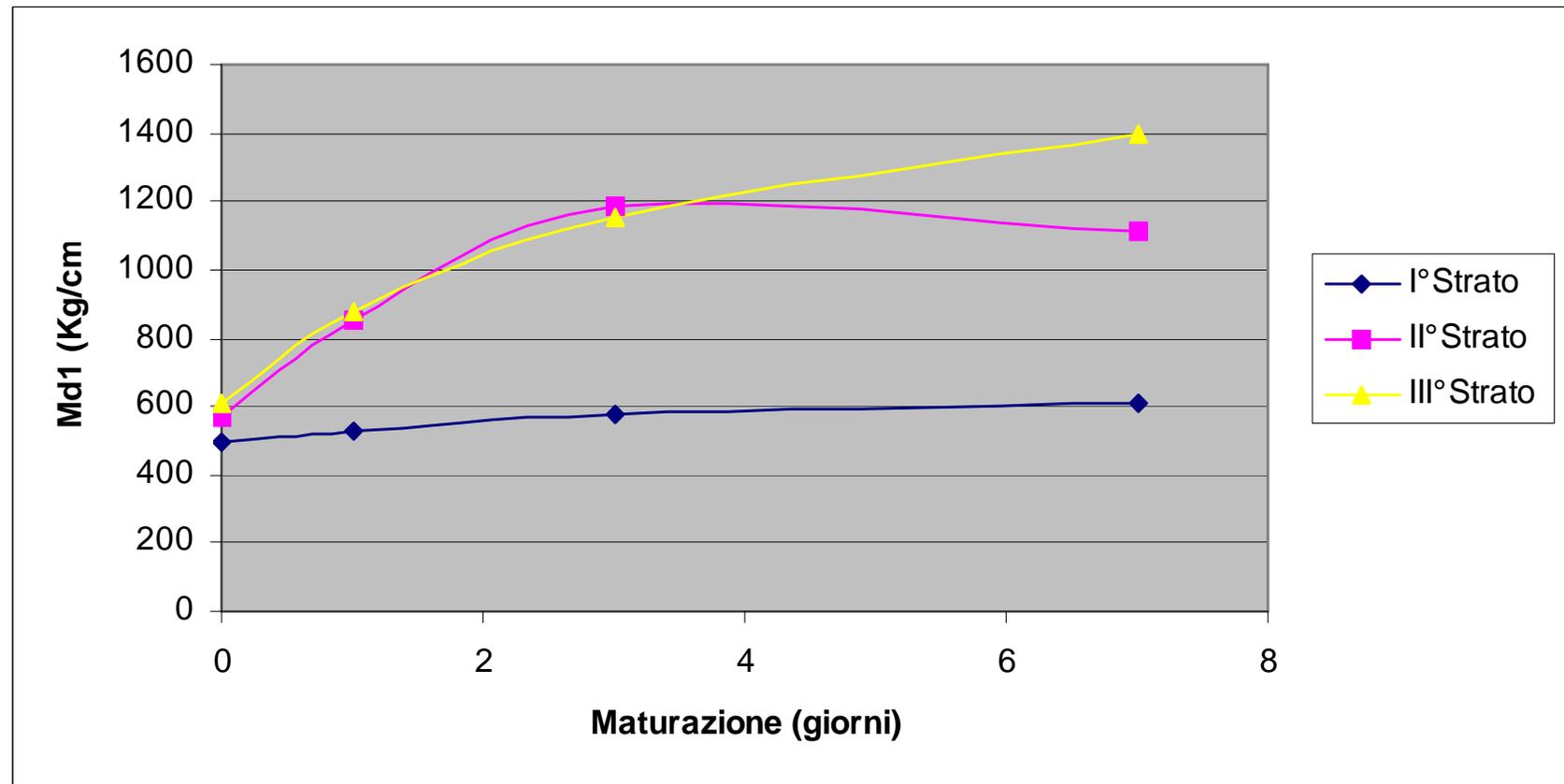
Circa 95%



I risultati dei campi prova – Rilevato

Densità in sito

Circa 97%



Controllo costruzione – Strati di Bonifica

MODULO DI DEFORMAZIONE:

media **77** N/mm²

deviazione standard **35,34** N/mm²

DENSITA' IN SITO:

media **95** %

deviazione standard **2** %

Controllo costruzione – **Costruzione**

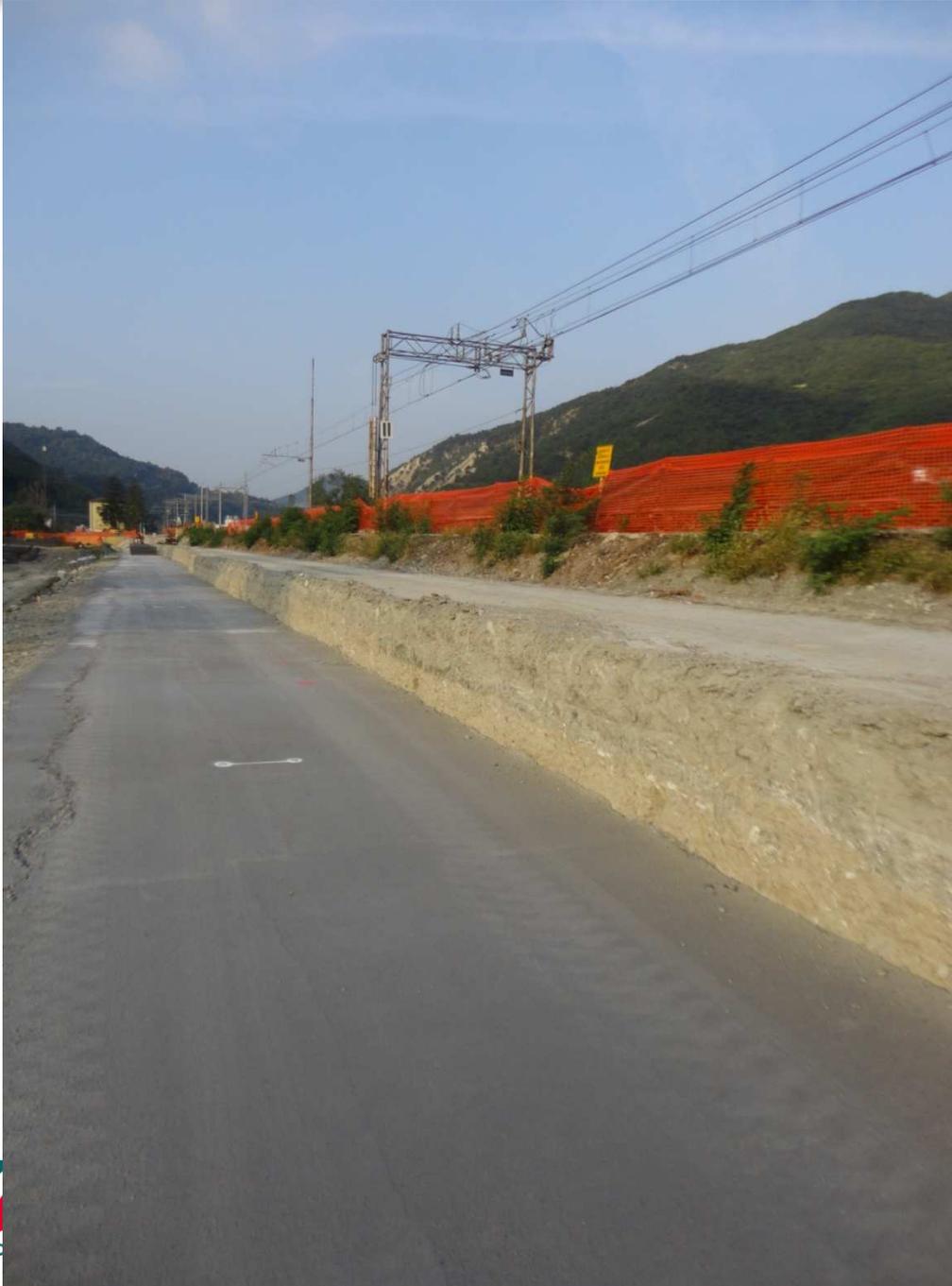
MODULO DI DEFORMAZIONE:

media	84,46	N/mm²
deviazione standard	23,51	N/mm²

DENSITA' IN SITO:

media	97,76	%
deviazione standard	1,18	%

Controllo costruzione – **Costruzione**





Thank you for your time