UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA IN

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

(CLASSE DELLE LAUREE IN INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE, CLASSE N. L-7)

TESI DI LAUREA

"ANALISI SPERIMENTALE E NUMERICA DELL'EFFETTO DELLA DESATURAZIONE SULLA RESISTENZA A LIQUEFAZIONE DELLA SABBIA DI PIEVE DI CENTO (BO)"

RELATORE
Prof. Ing. Alessandro Flora
CORRELATORI
Ing. Lucia Mele
Ing. Gianluca Fasano

CANDIDATI
Minale Annalaura
Matr. M67/385

Autiero Alessio
Matr. M67/393

A.A. 2017/2018

Contesto operativo

Il presente lavoro si colloca all'interno del progetto europeo **LIQUEFACT** (www.liquefact.eu)

Principali Obiettivi:

- Implementare una mappa di rischio da liquefazione, su scala europea;
- Sviluppare una metodologia per la valutazione localizzata del potenziale di liquefazione;
- Sviluppare nuove metodologie semplificate per la valutazione della vulnerabilità di strutture e infrastrutture;
- Definire tecniche di mitigazione per ridurre il potenziale di liquefazione.

PROGETTO EUROPEO LIQUEFACT

Obiettivi del lavoro di tesi

- Analizzare il comportamento ciclico di una sabbia sciolta a bassi stati tensionali di confinamento
- Sperimentare la desaturazione come tecnica di consolidamento innovativa per ridurre la suscettibilità a liquefazione
- Modificare un'apparecchiatura di laboratorio per condurre prove su provini parzialmente saturi
- Simulare numericamente i risultati sperimentali

Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione
2. Studio dei meccanismi di liquefazione
3. Caso studio e Campo Prove
4. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
5. Analisi numerica dei risultati sperimentali
6. Conclusioni

Annalaura Minale

Alessio Autiero

Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione

2. Studio dei meccanismi di liquefazione

3. Caso studio e Campo Prove

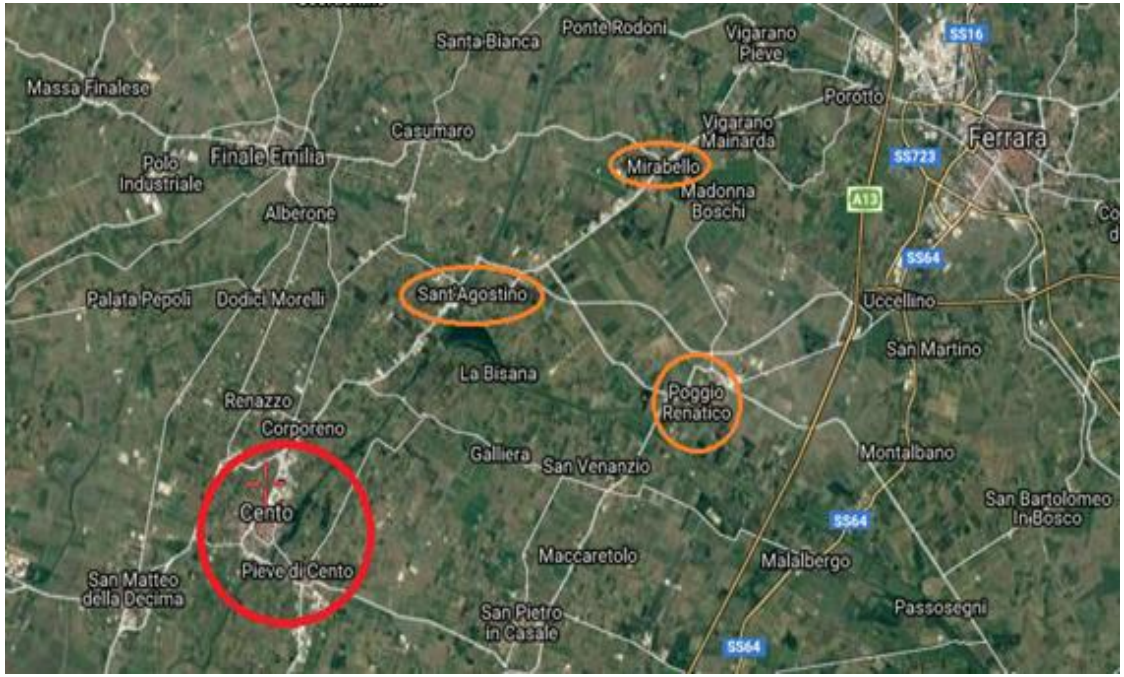
4. Attività sperimentale al laboratorio DICEA

5. Analisi numerica dei risultati sperimentali

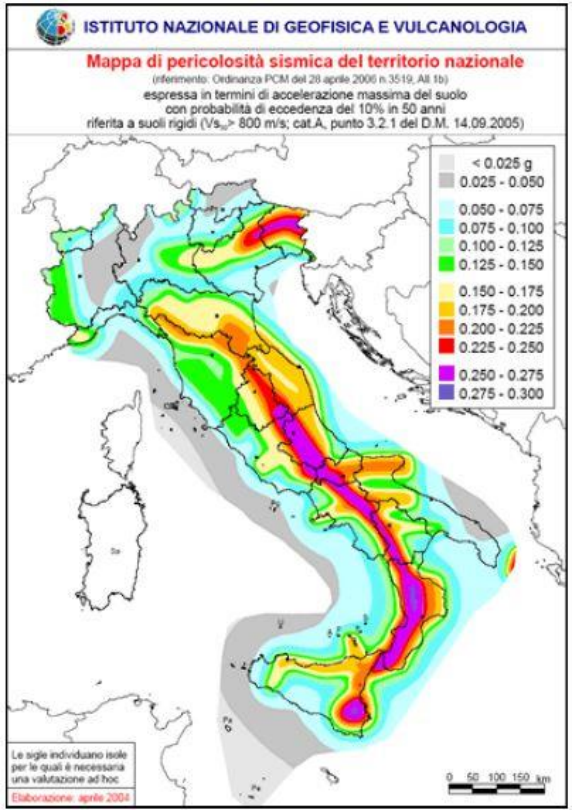
6. Conclusioni

Il terremoto dell'Emilia Romagna 2012

Il 20 Maggio 2012 un violento terremoto di magnitudo momento Mw=5.9 colpisce la regione emiliana e in particolare i centri abitati di Sant'agostino, Mirabello, Poggio Renatico e Pieve di Cento, principale oggetto di studio della presente tesi.



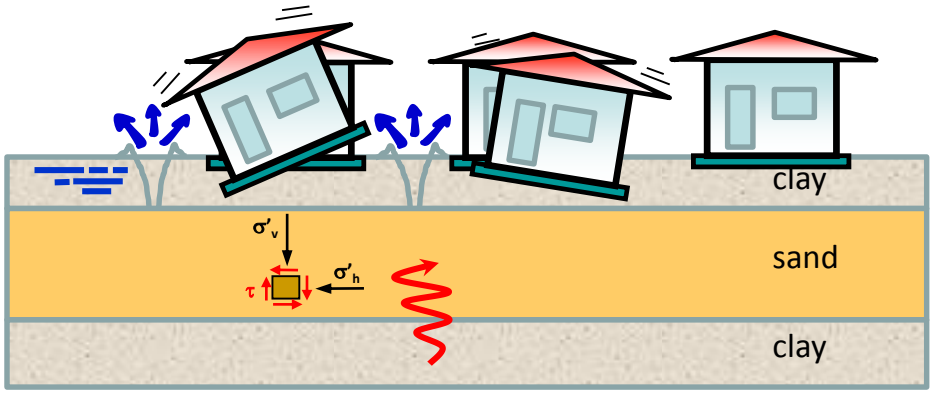
Per la prima volta in Italia si sono verificati diffusi fenomeni di liquefazione

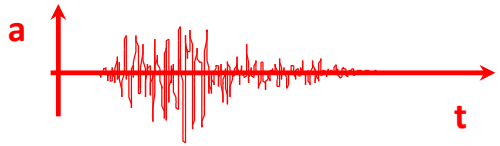


Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione
2. Studio dei meccanismi di liquefazione
3. Caso studio e Campo Prove
4. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
5. Simulazione numerica dei risultati sperimentali
6. Conclusioni

LIQUEFAZIONE





Cause:

- Mancanza di coesione
- Bassi gradi di addensamento
- Completa saturazione

Accumulo pressioni neutre → $\sigma = \sigma' + u$ → $\tau_{lim} = \sigma'_v \cdot \tan\varphi = 0$ → *Perdita di resistenza al taglio*

Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione

2. Studio dei meccanismi di liquefazione

3. Caso studio e Campo Prove

4. Attività sperimentale al laboratorio DICEA

5. Simulazione numerica dei risultati sperimentali

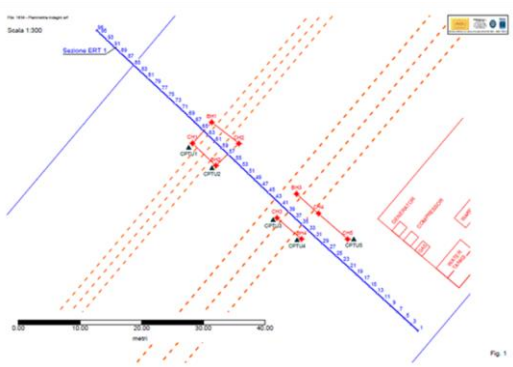
6. Conclusioni

Caso studio e Campo prove

Caratterizzazione del sito

Il sito di Pieve di Cento (BO) è la località scelta per realizzare il campo prove.

Cosa è stato fatto in sito?



- Sabbia prelevata nei primi 2m con una benna
- Sondaggi (CH1, CH1bis, CH2, CH3, CH4, CH5)
- Provini indisturbati (Gel-Pusher, Osterberg)
- Prove CPTU (CPTU1, CPTU2, CPTU3, CPTU4, CPTU5)
- Cross-hole e analisi tomografiche

CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

Modello stratigrafico

Z (m)	Strati	Nome
1	SL1	Sabbia limosa (crosta)
1.8		
2.8	SL2	Sabbia limosa
4.2	SDL1	Sabbia debolmente limosa
4.8	LA1	Limo argilloso
6	SDL2	Sabbia debolmente limosa
	LA2	Limo argilloso

Sabbia prelevata con una benna

Strato potenzialmente liquefacibile

Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione

2. Studio dei meccanismi di liquefazione

3. Caso studio e Campo Prove

4. Attività sperimentale al laboratorio DICEA

5. Simulazione numerica dei risultati sperimentali

6. Conclusioni

CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

LABORATORIO

Sabbia prelevata con una benna nei primi due metri

Sondaggi prelevati in cinque verticali, fino a 10 m

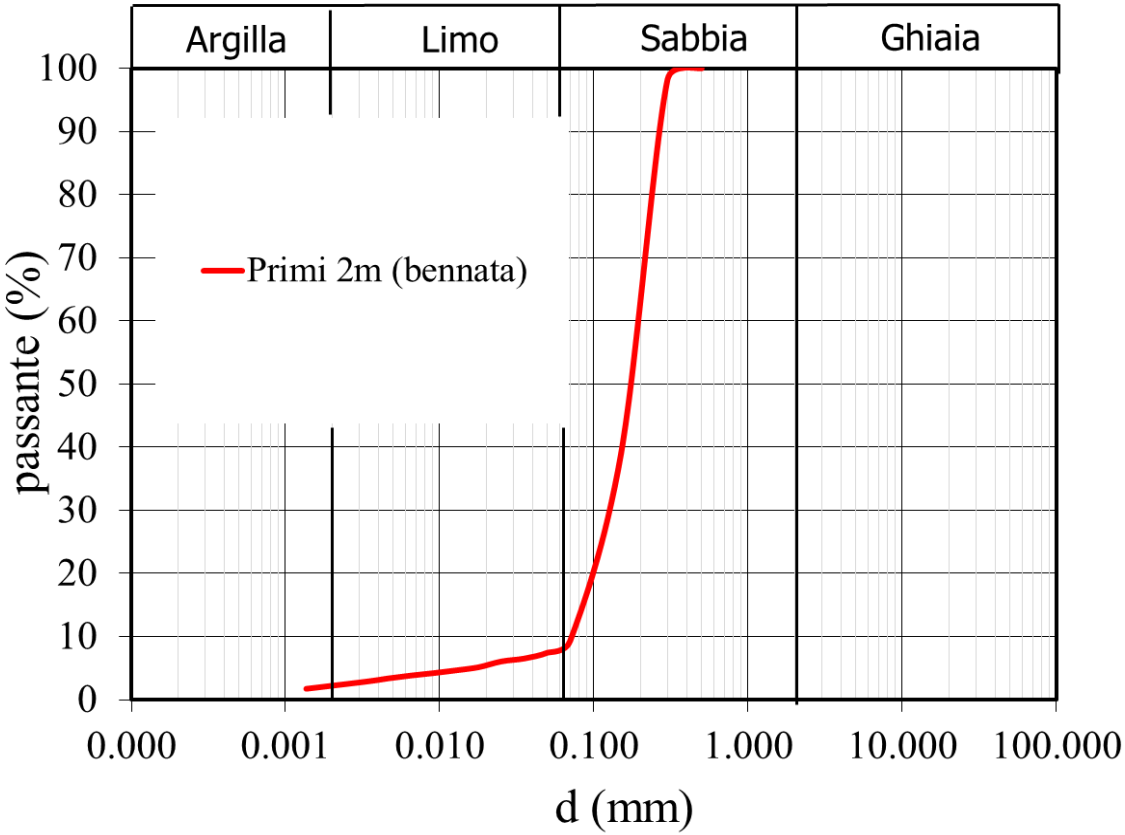
Provini indisturbati (Gel-Pusher, Osterberg)

CARATTERIZZAZIONE DEL SITO
Pieve di Cento: test di laboratorio

	Bennata (primi 2m)		Sabbia grigia	
Tests	**Numero di test**	**Info**	**Numero di test**	**Info**
Permeabilità	3	Dr 30- 40- 60%	1	Dr 40%
Prova edometrica	1	Dr 15%	-	-
Triassiale monotona(TX)	8	CID e CIU $10<\sigma'_c<250$ kPa	5	CID e CIU $30<\sigma'_c<150$ kPa
Triassiale ciclica(CTX)	3	Dr 47% $\sigma'_c=50$ kPa	2	CID $30<\sigma'_c<150$ kPa
Taglio semplice ciclico(CSS)	7	Dr 45 e 74% $\sigma'_v=50$ kPa	20	Dr 45 e 70% $\sigma'_v=50$ kPa
Velocità onde di compressione(Vp)	-	-	11	Dr 41% $0<Sr<100\%$
Test di resistività (ρ)	-	-	5	Dr 40% $74<Sr<100\%$

CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

Pieve di Cento (BO) – Bennata dei primi 2 m

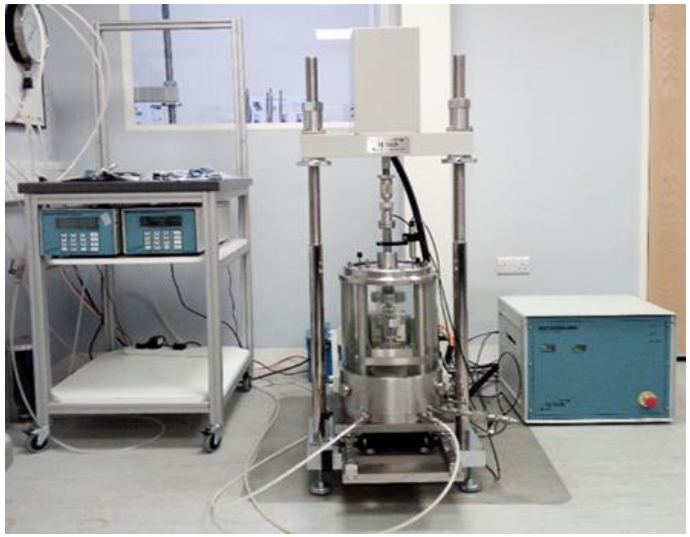


G_s	**2,667**
e_{max}-e_{min}	1,04 – 0,546
D_{50} (mm)	0,18
U_c (=d_{60}/d_{10})	2,67
FC (d<0,075mm) (%)	8,0

ATTIVITA' SPERIMENTALE

Apparecchiature utilizzare per la sperimentazione

Cella triassiale a Stress Path controllato di tipo Bishop & Wesley (CTX)



Apparecchiatura di taglio semplice ciclico (CSS)

Entrambe sono disponibili presso il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale dell'Università di Napoli Federico II.

ATTIVITA' SPERIMENTALE

Pieve di Cento (BO) – Campioni indisturbati

Boreholes	date	Osterberg (m)	Gel Push (m)
CH1	04/09/2017		
CH1 BIS	08/09/2017	2,0-2,5	2,5-3,5
		3,5-4,0	
CH2	06/09/2017	3,0-3,5	4,5-5,5
		4,0-4,5	
CH3	06/09/2017	2,50-3,00	3,5-4,5
		4,50-5,00	
CH4	07/09/2017	2,00-2,50	5,0-6,0
		4,50-5,00	
CH5	11/09/2017	2,0-2,5	2,00-3,00
		3,5-4,0	

	Dr (%)		
z (m)	CPTU*	GP	Ost
2,5	20	72	-
3,3	36	39	-
3,6	30	-	73
4,7	45	-	64
5,0	32	35	-

*Kulhawy and Maine (1990)

Campionatore Osterberg

Campionatore Gel-Pusher

ATTIVITA' SPERIMENTALE

Pieve di Cento: Programma di prove per campioni indisturbati

Prove di taglio semplice ciclico

Boreholes	date	Osterberg (m)	Gel Push (m)
CH1	04/09/2017		
CH1 BIS	08/09/2017	2,0-2,5	2,5-3,5
		3,5-4,0	
CH2	06/09/2017	3,0-3,5	4,5-5,5
		4,0-4,5	
CH3	06/09/2017	2,50-3,00	3,5-4,5
		4,50-5,00	
CH4	07/09/2017	2,00-2,50	5,0-6,0
		4,50-5,00	
CH5	11/09/2017	2,0-2,5	2,00-3,00
		3,5-4,0	

Tipologia campione	Numero prove
CH1bis OST	4
CH1bis GP	2
CH2 GP	1
CH3 OST	2
CH5 OST	3
CH5 GP	2

Le prove di taglio semplice ciclico sui campioni indisturbati sono state eseguite a diverse profondità comprese tra 2.0m e 5m e successivamente sono state realizzate le *curve granulometriche* degli stessi

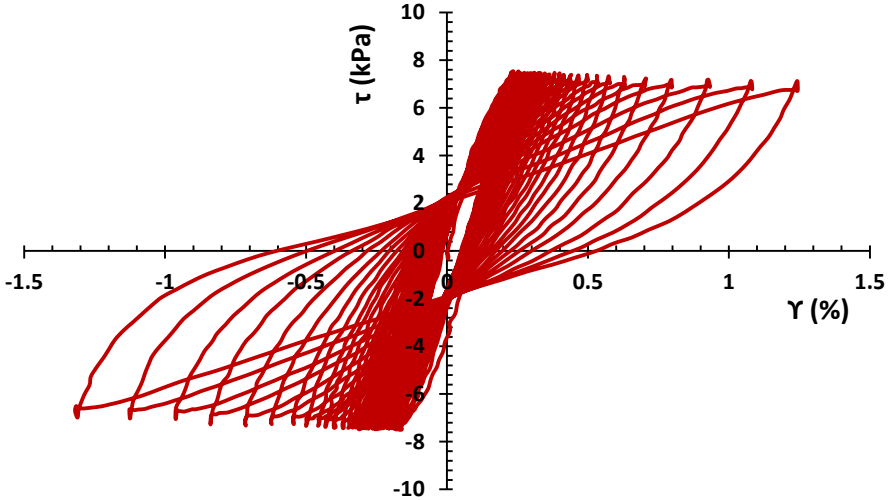
ATTIVITA' SPERIMENTALE

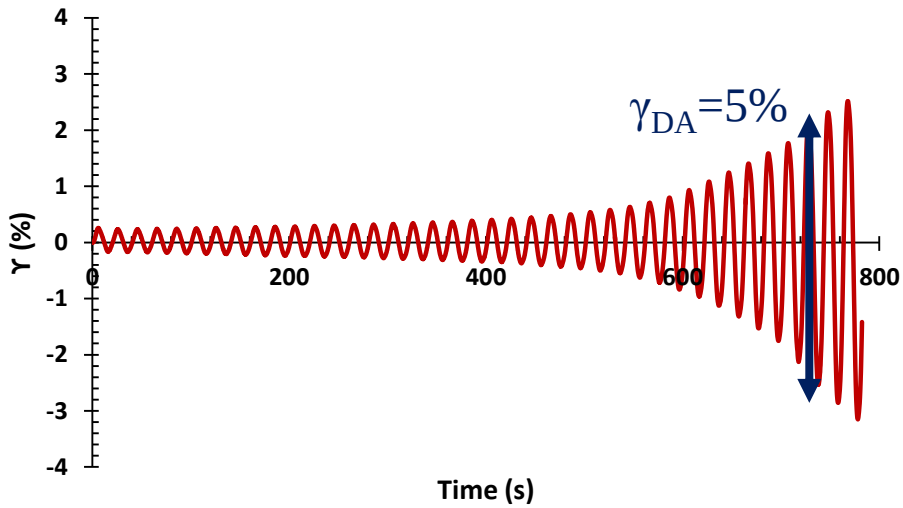
Pieve di Cento (BO) – Programma di prove su campioni indisturbati

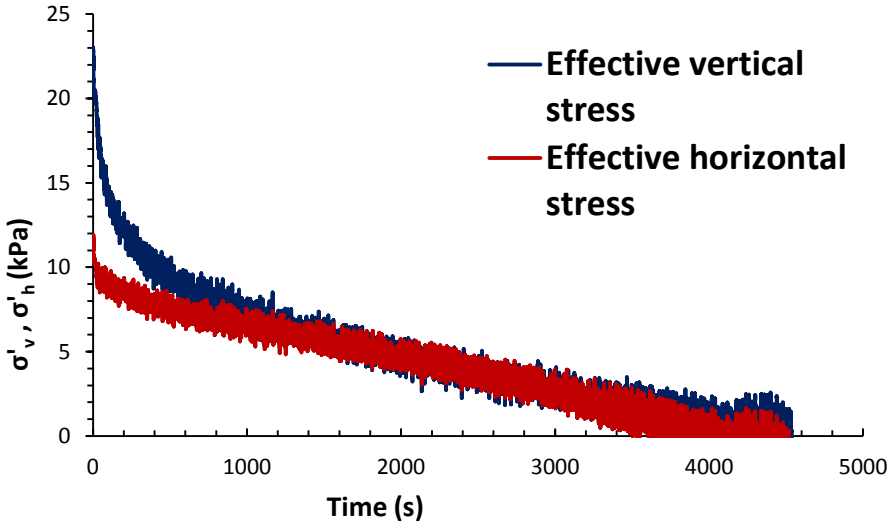
Prove di taglio semplice ciclico non drenate

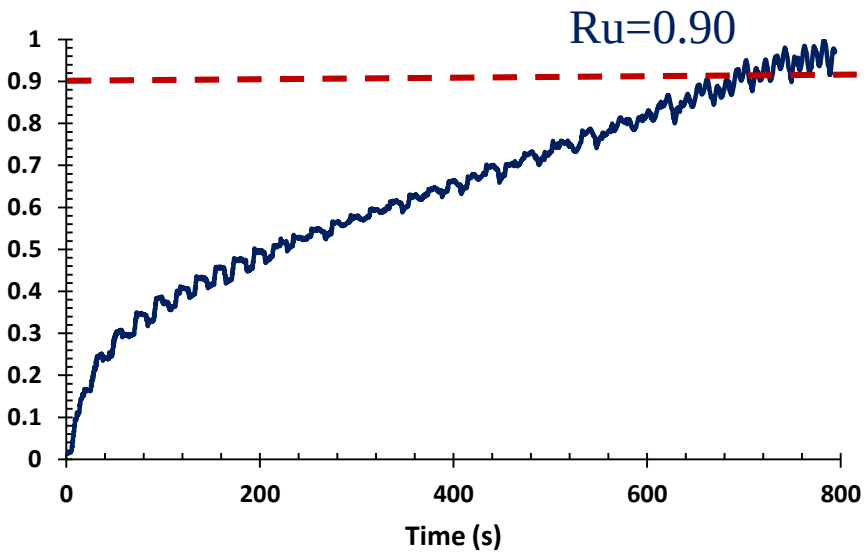
Prove	Sabbia	e_c	D_r (%)	σ'_v (kPa)	CRR	N_{liq}
Gel Pusher z=5m	SDL1	0.688	49	48.4	0.12	33
Gel Pusher z=3m	SDL1	0.696	42	28.5	0.11	36
Gel Pusher z=3m	SDL1	0.631	57	29.4	0.12	12
Osterberg z=4.8m	SDL1	0.545	76	49	0.12	86
Osterberg z=4.8m	SDL1	0.658	51	49.8	0.14	53
Osterberg z=3.6m	SDL1	0.680	74	64.1	0.1	320
Osterberg z=4m	SDL1	0.622	85	39.3	0.13	24
Osterberg z=4m	SDL1	0.824	44	39.2	0.14	26
Gel Pusher z=3 m	SDL1	0.654	78	32.3	0.095	NO
Osterberg z=2.5 m	SDL1	0.682	72	50	0.14	68.6

Pieve di Cento – Prove di taglio semplice ciclico non drenate



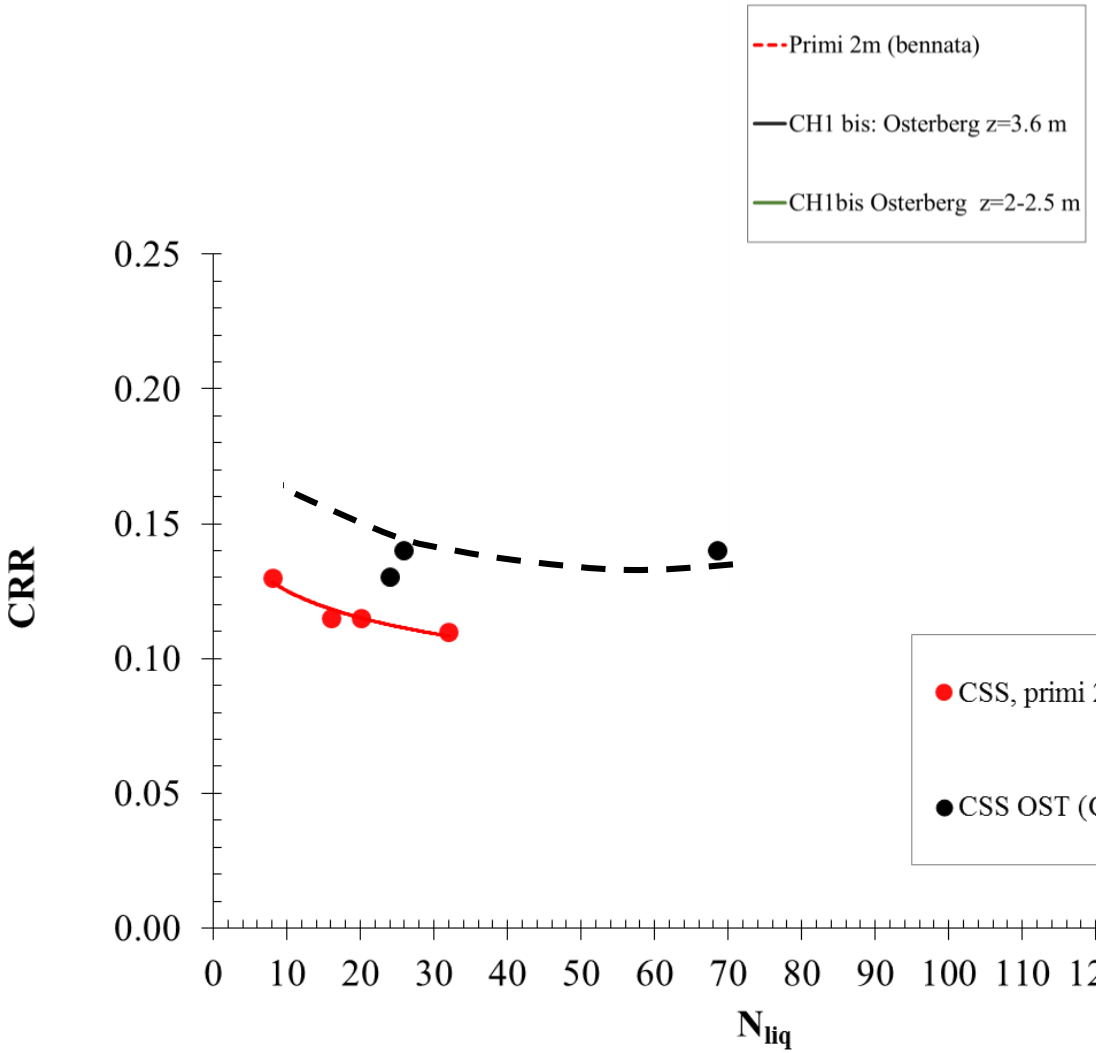


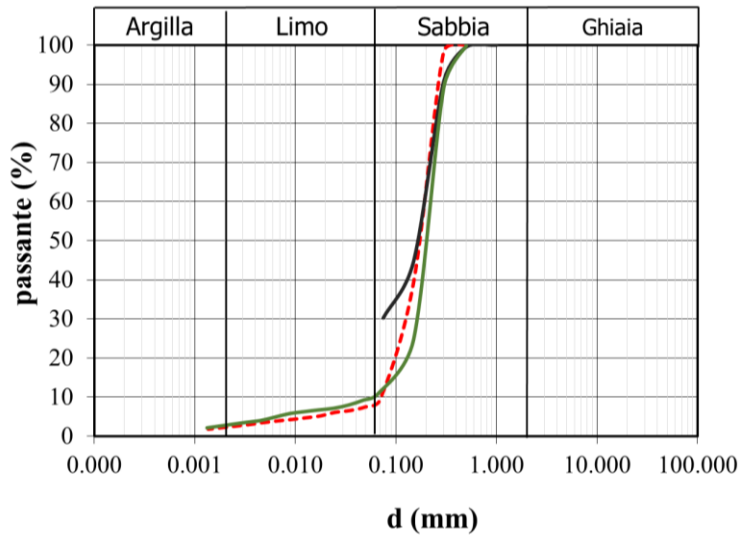




ATTIVITA' SPERIMENTALE

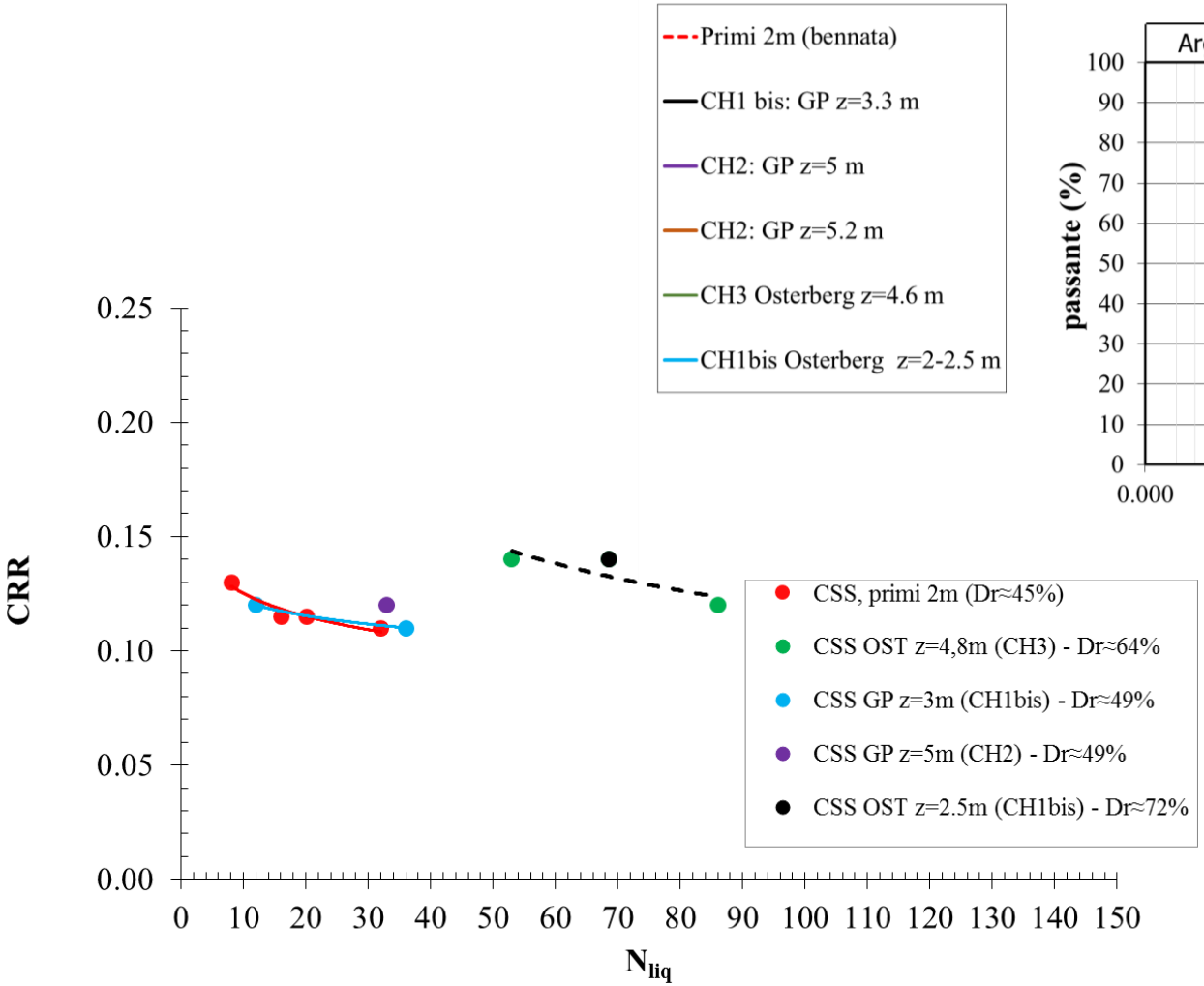
Pieve di Cento (BO) – Campioni indisturbati
Risultati

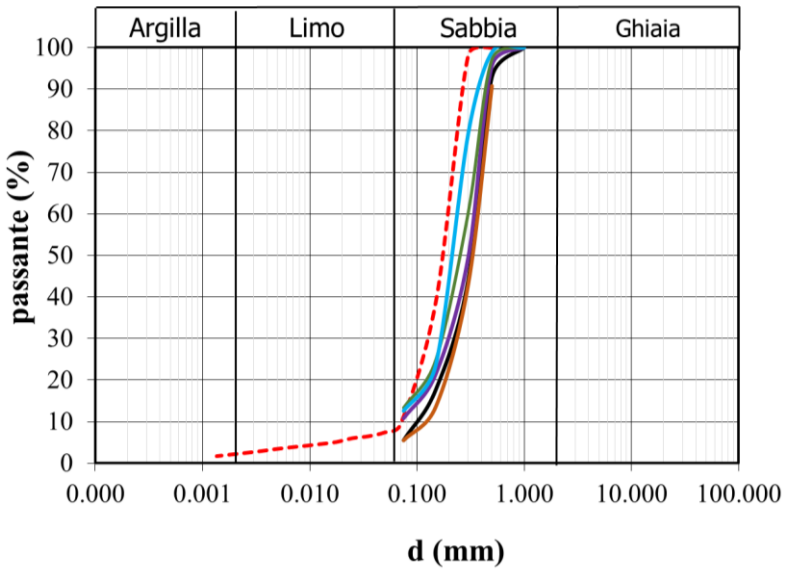




ATTIVITA' SPERIMENTALE

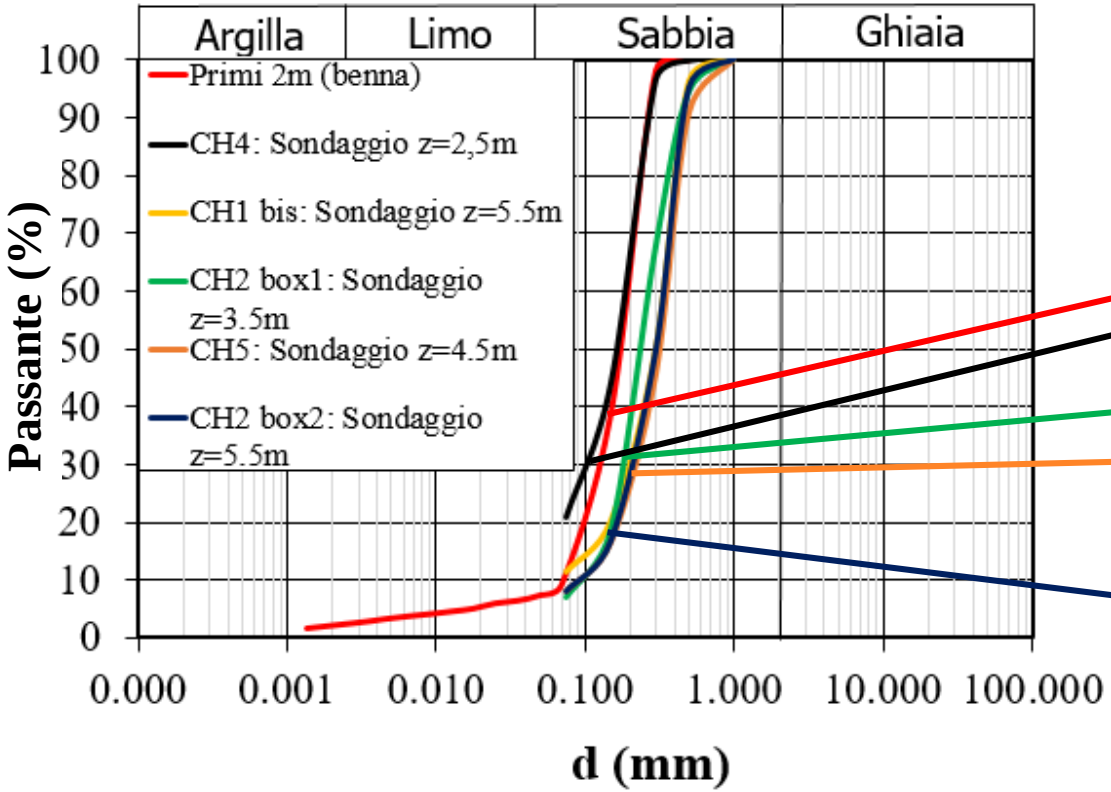
Pieve di Cento (BO) – Campioni indisturbati
Risultati





ATTIVITA' SPERIMENTALE

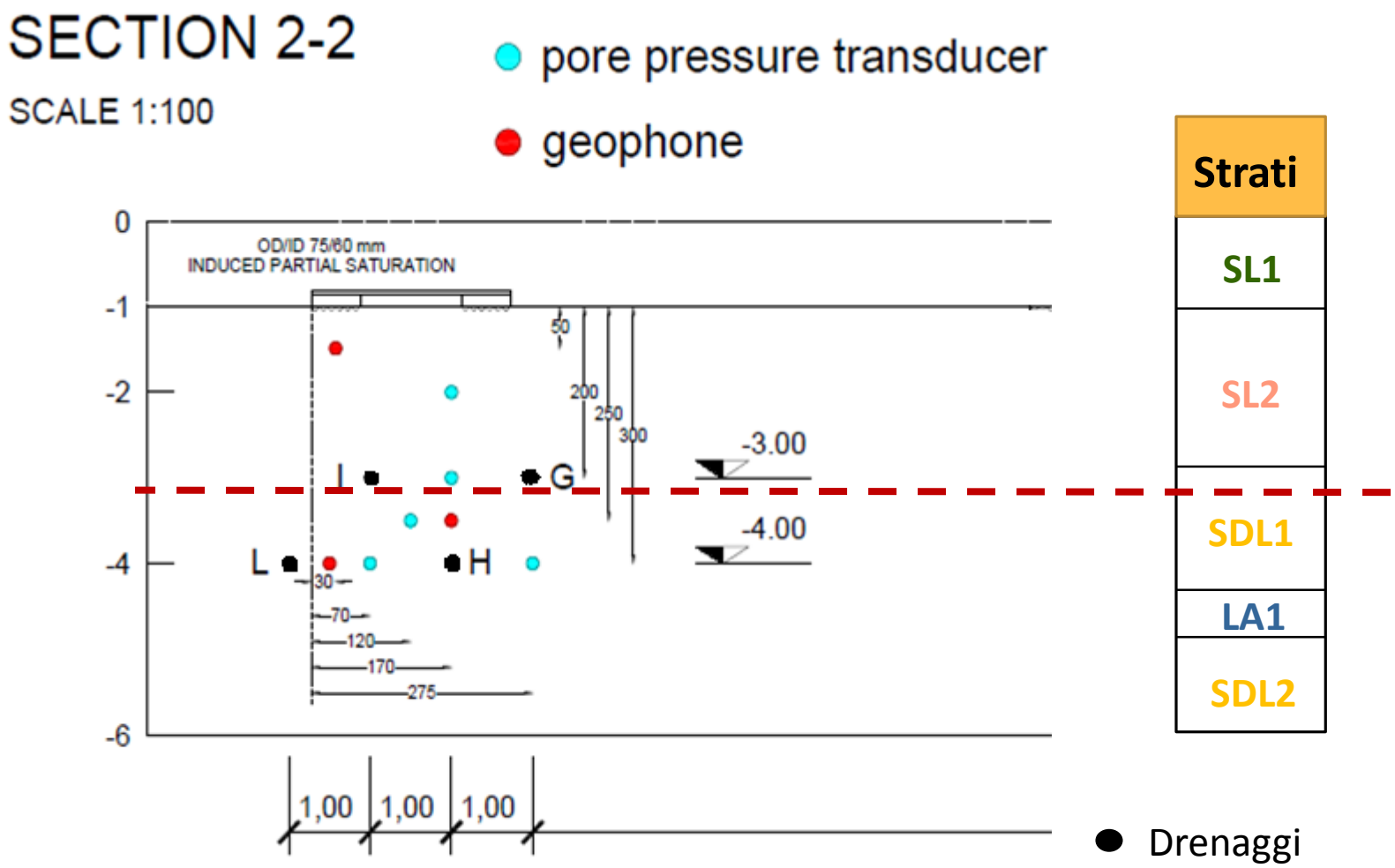
Curve granulometriche Pieve di Cento (BO) - Sondaggi



Z (m)	Strati	Nome
1	SL1	Sabbia limosa (crosta)
1.8	SL2	Sabbia limosa
2.8	SDL1	Sabbia debolmente limosa
4.2	LA1	Limo argilloso
4.8	SDL2	Sabbia debolmente limosa
6	LA2	Limo argilloso

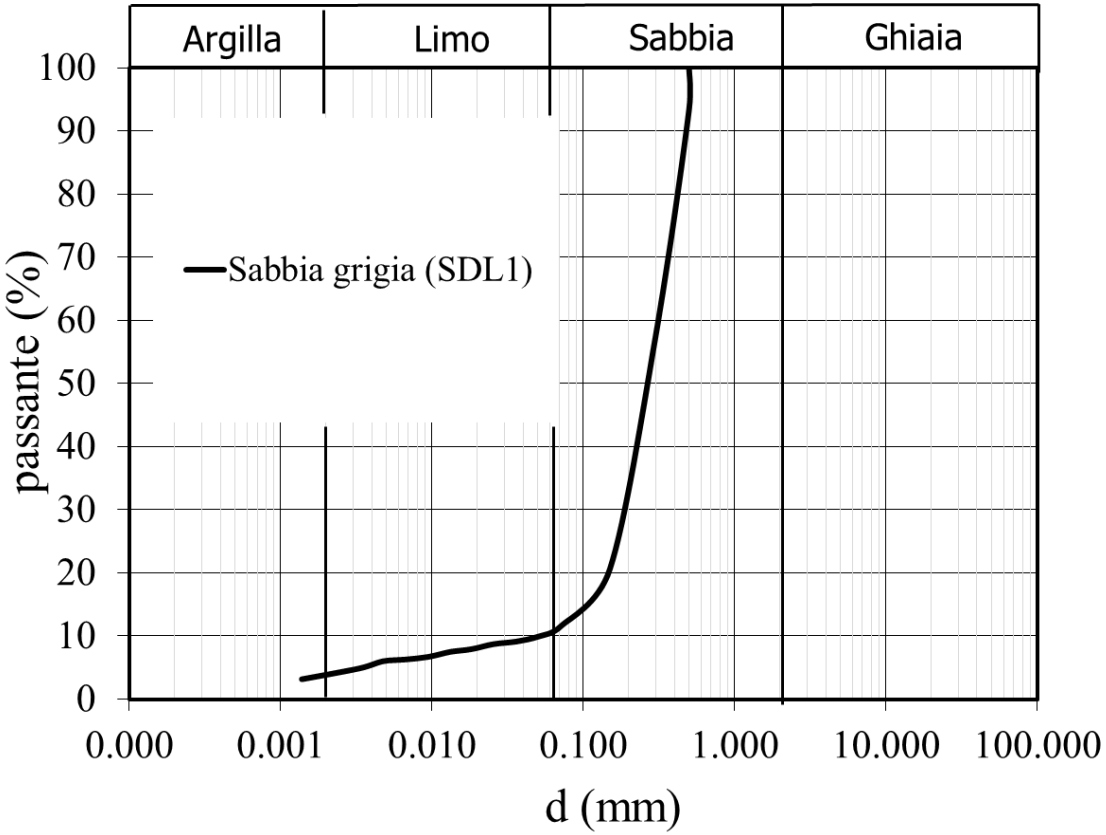
DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

Interventi in sito a Pieve di Cento (BO)



CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

Pieve di Cento (BO) – Sabbia grigia (SDL1)



G_s	**2,655**
e_{max}-e_{min}	0,884 – 0,442
D_{50} (mm)	0,30
U_c (=d_{60}/d_{10})	5
FC (d<0,075mm) (%)	10,0

ATTIVITA' SPERIMENTALE

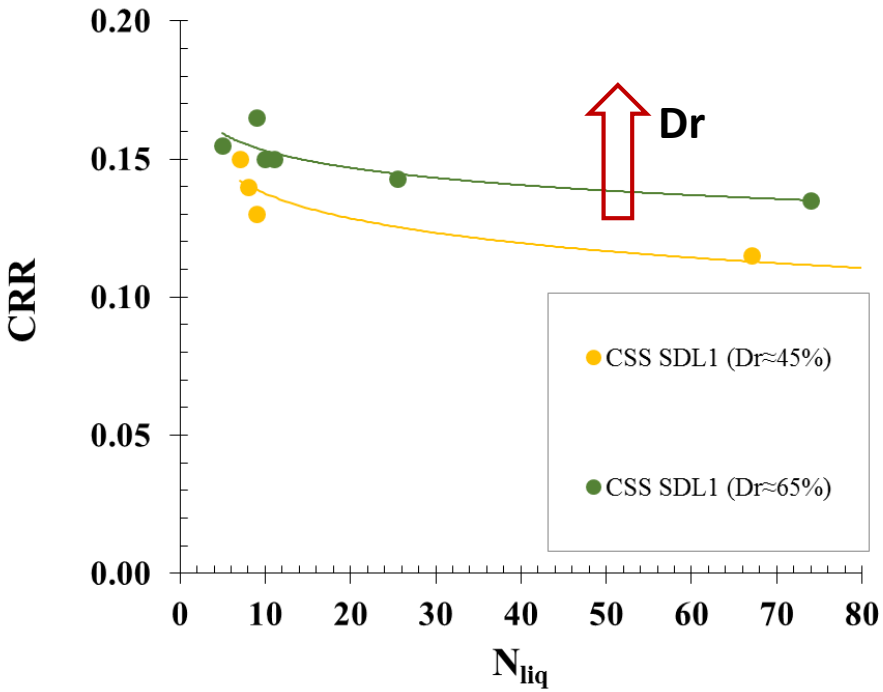
Pieve di Cento (BO) – Programma di prove su sabbia grigia SDL1 satura

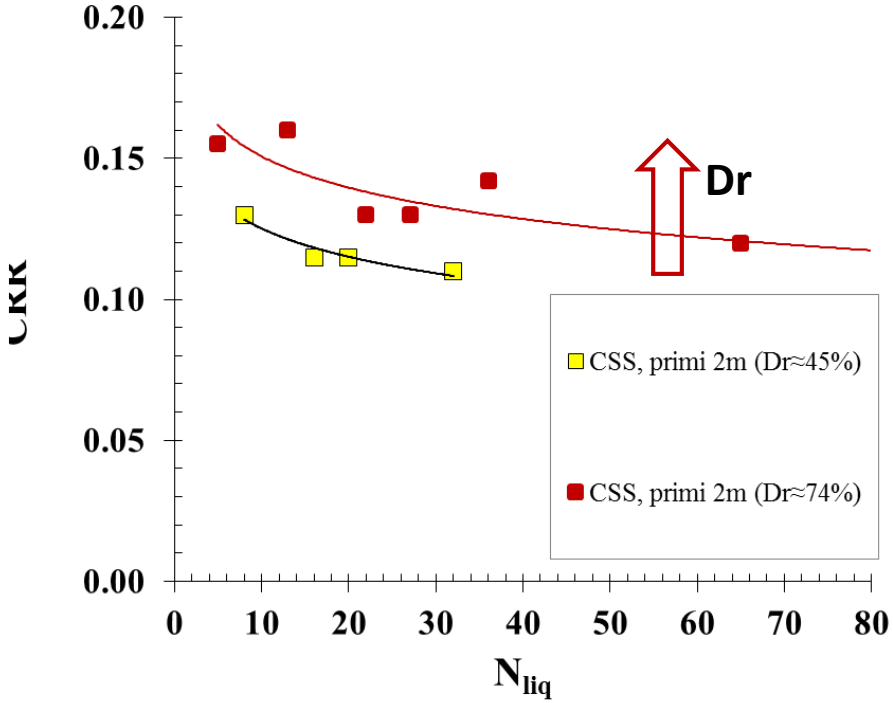
Prove di taglio semplice ciclico non drenate

	Prove	Sabbia	e_c	D_r (%)	σ'_v (kPa)	Sr	CRR	N_{liq}
D_r 45%	PdC_DSS_1	SDL1	0.693	43	47.75	1	0.115	67
	PdC_DSS_2	SDL1	0.693	44	45.17	1	0.10	170
	PdC_DSS_3	SDL1	0.690	44	49.10	1	0.15	7
	PdC_DSS_4	SDL1	0.696	43	46.60	1	0.12	9
	PdC_DSS_5	SDL1	0.693	43	50	1	0.14	8
	PdC_DSS_6	SDL1	0.692	45	43	1	0.12	NO
D_r 65%	PdC_DSS_7	SDL1	0.598	65	50	1	0.15	11
	PdC_DSS_8	SDL1	0.607	63	50	1	0.135	74
	PdC_DSS_9	SDL1	0.602	64	50	1	0.155	5
	PdC_DSS_10	SDL1	0.585	68	50	1	0.165	9
	PdC_DSS_11	SDL1	0.598	65	50	1	0.15	10
	PdC_DSS_12	SDL1	0.596	65	50	1	0.143	25.5

CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

Pieve di Cento (BO) – Risultati prove su sabbia grigia SDL1 satura
Prove di taglio semplice ciclico





Si nota come al crescere della densità relativa, la resistenza a liquefazione aumenti.

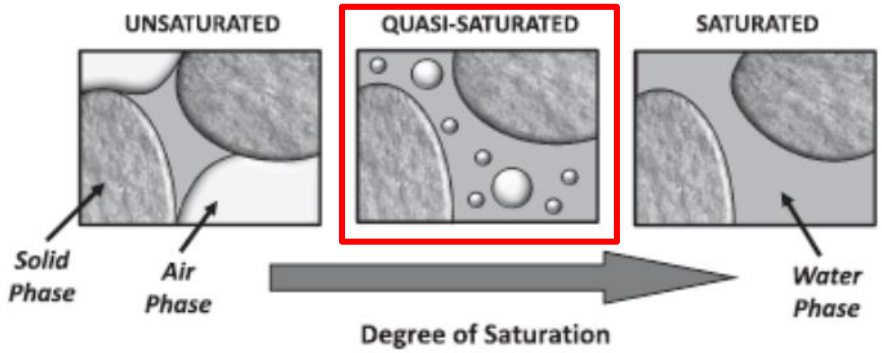
DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

CONDIZIONI FAVOREVOLI ALLA LIQUEFAZIONE

- *Sabbia sciolta*
- *Saturazione*
- *Condizioni non drenate*
- *Contenuto di fine basso o assente*

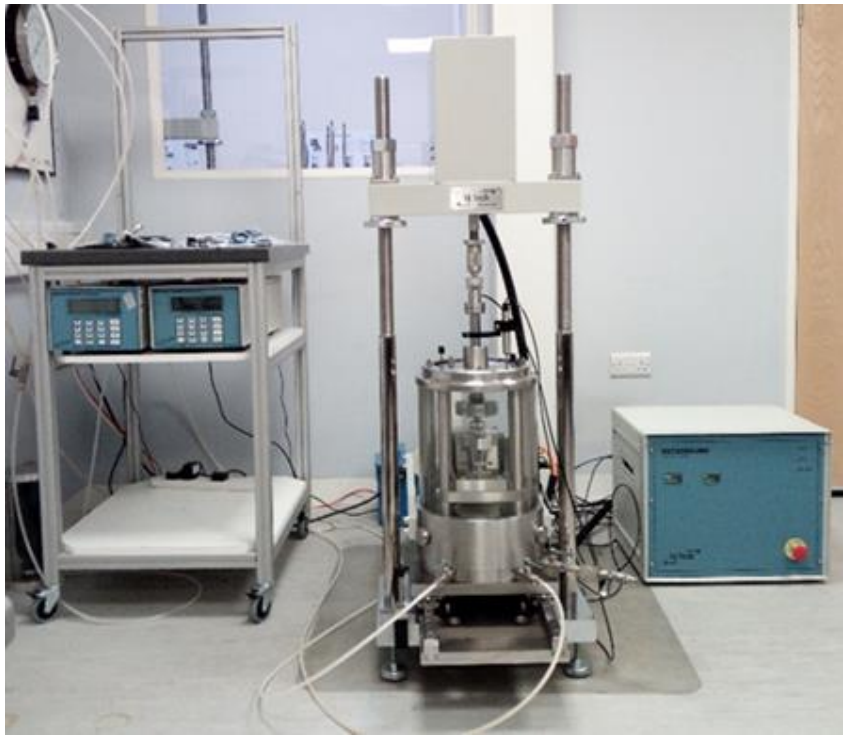
CONTROMISURE

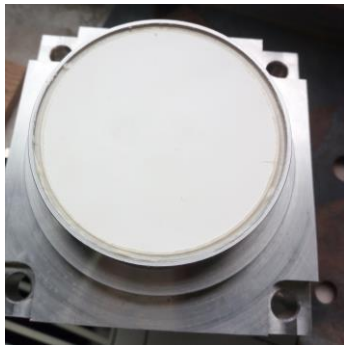
- *Addensamento*
- *Cementazione*
- *Desaturazione*
- *Drenaggio*
- *Aggiunta di fine*



DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

L'apparecchiatura di taglio semplice ciclico non drenato può essere modificata per condurre prove non sature





DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

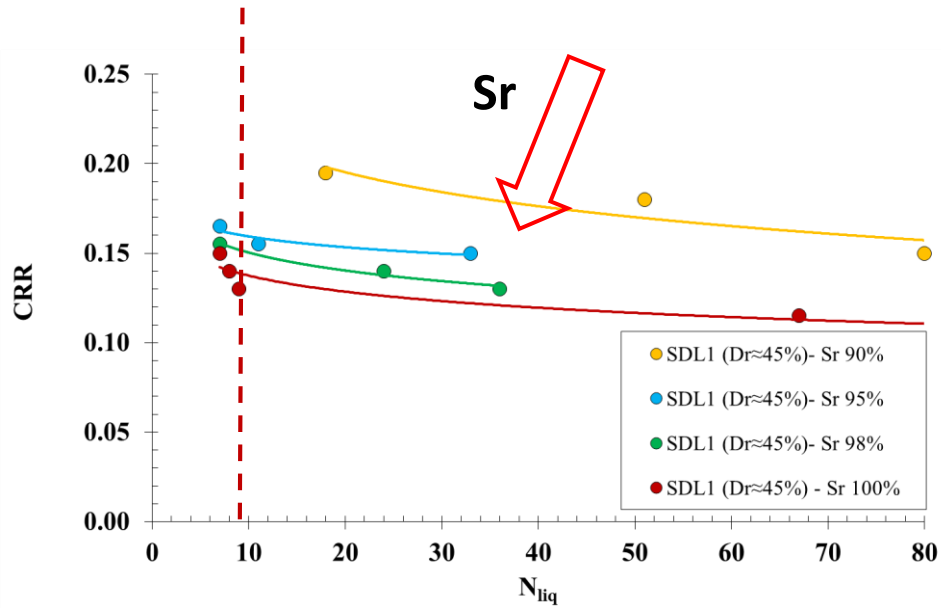
Pieve di Cento: Programma di prove non sature

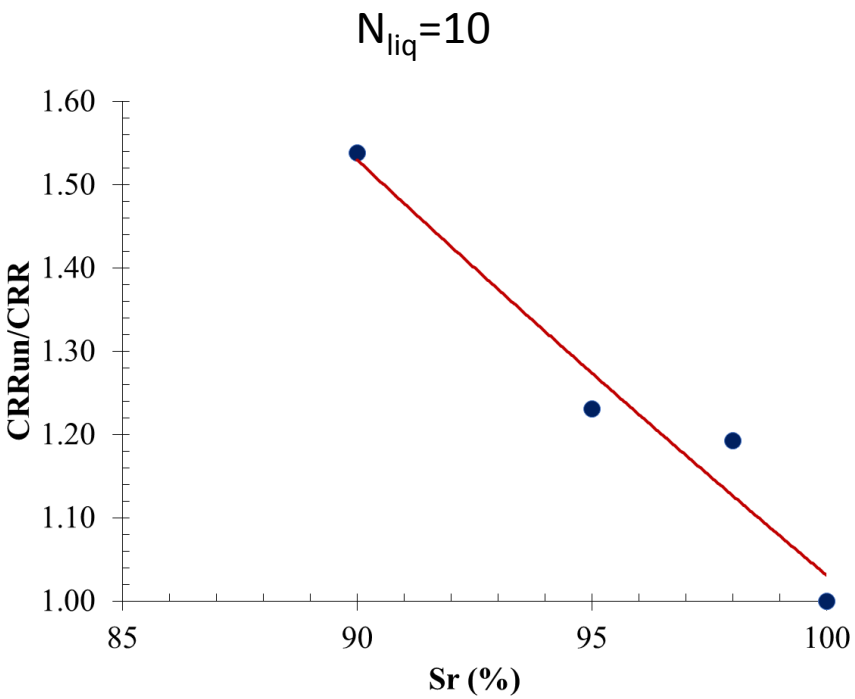
Prove di taglio semplice ciclico non drenate

	Prove	Sabbia	D_r (%)	σ'_v (kPa)	Sr	CRR	N_{liq}
D_r 45%	Pdc_Dss_1_NS	SDL1	45	49.1	0.90	0.15	80
	PdC_DSS_2_NS	SDL1	45	49.1	0.90	0.18	51
	PdC_DSS_3_NS	SDL1	45	49.1	0.90	0.195	18
	PdC_DSS_4_NS	SDL1	45	49.2	0.95	0.15	33
	PdC_DSS_5_NS	SDL1	45	49.3	0.95	0.165	7
	PdC_DSS_6_NS	SDL1	45	48.7	0.95	0.15	11
	PdC_DSS_7_NS	SDL1	45	48.5	0.98	0.15	7
	PdC_DSS_8_NS	SDL1	45	47.9	0.98	0.13	36
	PdC_DSS_9_NS	SDL1	45	50.1	0.98	0.14	24

DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

Curve di resistenza ciclica a diversi gradi di saturazione



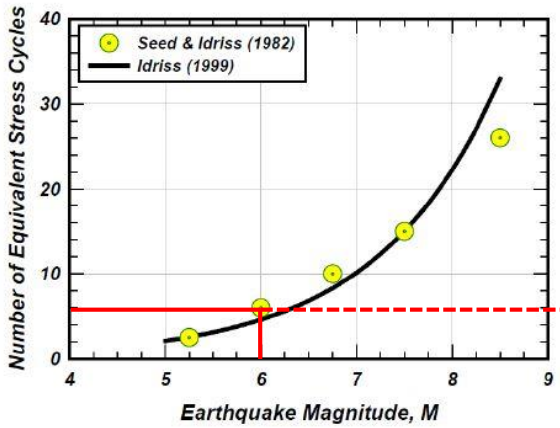


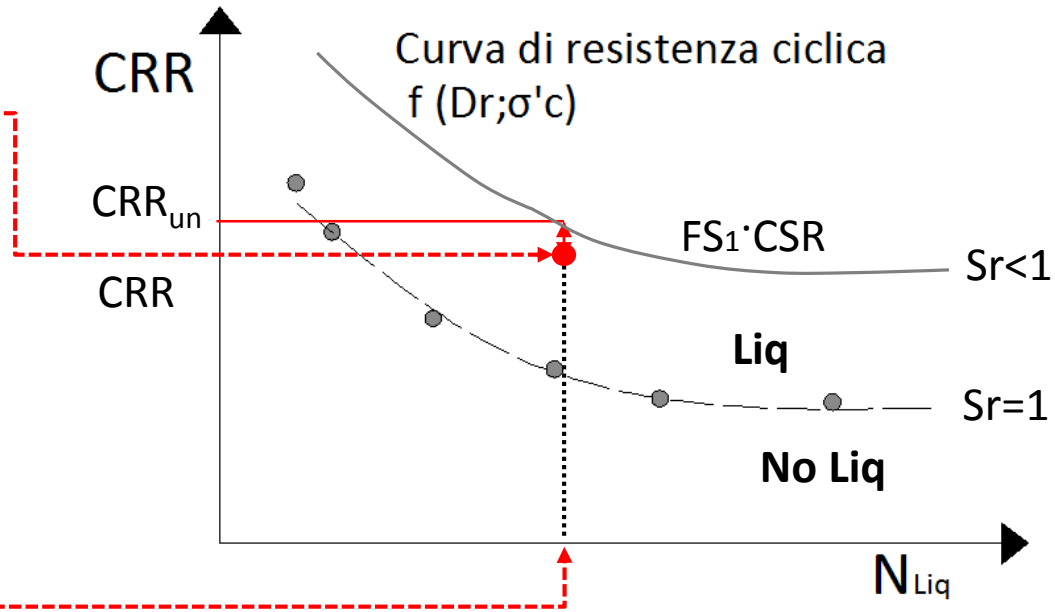
La riduzione del grado di saturazione comporta un incremento della resistenza a liquefazione

DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

Criterio di progetto dell'intervento di desaturazione

$$CSR = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{v,0}}$$

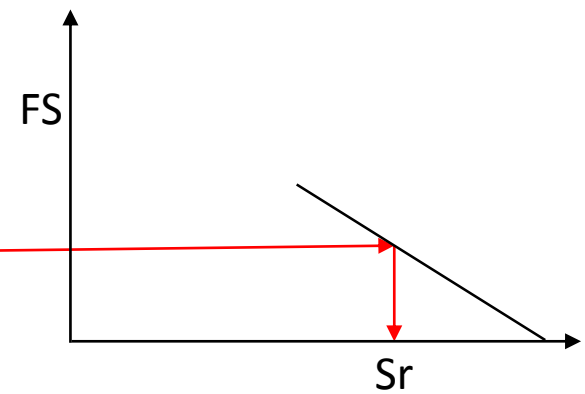




$$FS_1 = \frac{CRR_{un}}{CSR} > 1$$

$$FS_0 = \frac{CRR_{sat}}{CSR} < 1$$

$$FS = \frac{FS_1}{FS_0} = \frac{CRR_{un}}{CRR_{sat}}$$



DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

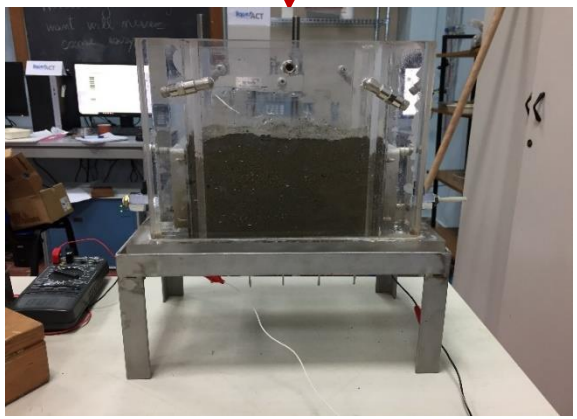
Criterio di progetto dell'intervento di desaturazione

Per monitorare il **grado di saturazione** in sito post intervento:

Vp(Sr)
velocità delle onde di compressione

ρ(Sr)
resistività del terreno

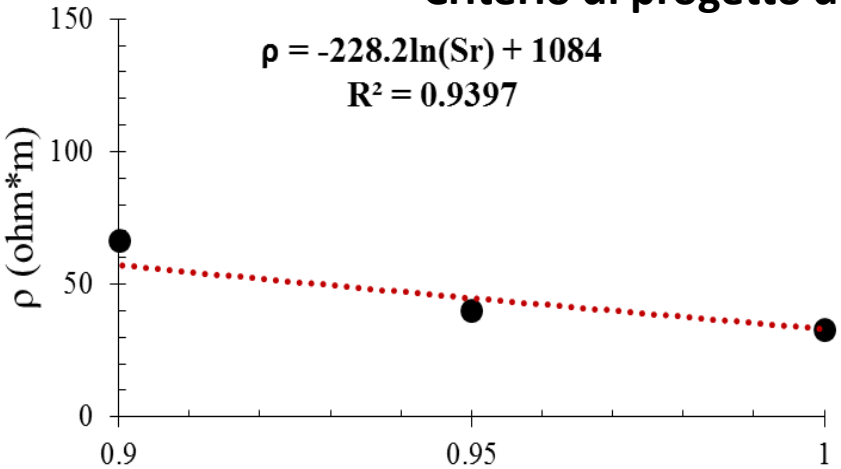
$$V_p = \frac{l}{t}$$



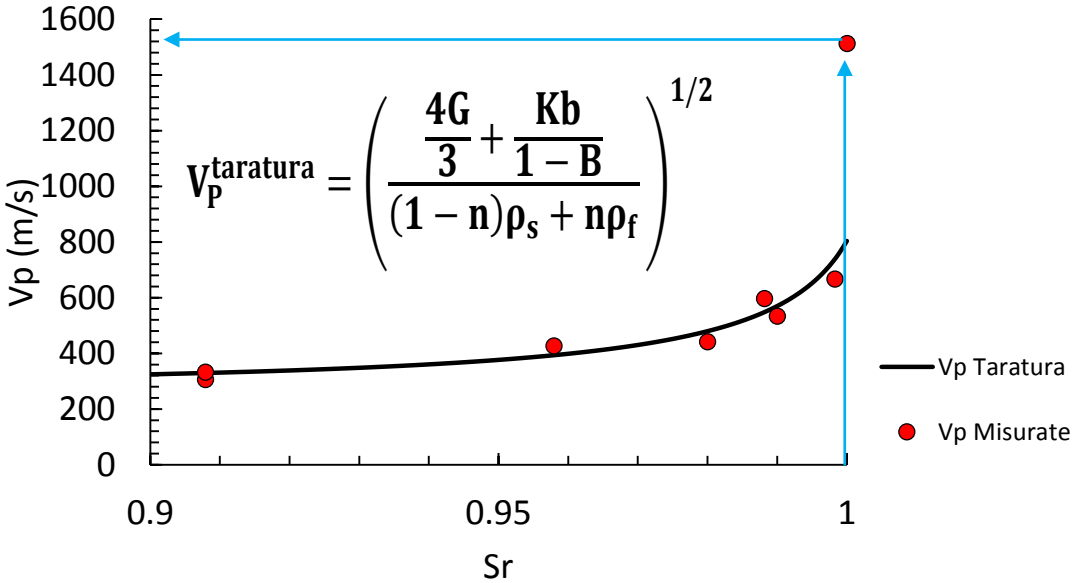
$$\rho = R\frac{A}{l}$$

DESATURAZIONE COME TECNICA DI MITIGAZIONE

Criterio di progetto dell'intervento di desaturazione



ρ (Ohm*m)	Sr (%)
33	100
40	95
66.8	90
75.4	80
105.6	74



V_p (m/s)	Sr (%)
1512	100.0%
667	99.8%
596	98.8%
426	95.8%
306	90.8%
332	90.8%
307	89.9%

Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione

2. Studio dei meccanismi di liquefazione

3. Caso studio e Campo Prove

4. Attività sperimentale al laboratorio DICEA

5. Simulazione numerica dei risultati sperimentali

6. Conclusioni

Sviluppo analisi numeriche

- 1. Modello costitutivo : PM4Sand (2018)
- 2. Calibrazione modello
- 3. Simulazione prove sperimentali: prova taglio ciclico semplice (CSS)
- 4. Risultati

Modello costitutivo avanzato: PM4Sand

Il modello PM4Sand simula il comportamento del materiale(terreni) durante la fase di carico dinamico, compresa la generazione delle sovrappressioni nei pori, la liquefazione e post liquefazione. Il modello è definito nella condizione di deformazione piana (x,y). Le deformazioni sono suddivise in: deformazioni volumetriche $\boldsymbol{\varepsilon_v}$ e in deformazioni deviatoriche **e** .

$$\varepsilon_V = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}$$

$$e = \varepsilon - \frac{\varepsilon_V}{3} I = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} - \frac{\varepsilon_V}{3} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} - \frac{\varepsilon_V}{3} \end{pmatrix}$$

Il tensore dello stress efficace e la tensione efficace media hanno la seguente forma:

$$\sigma' = \begin{pmatrix} \sigma'_{xx} & \sigma'_{xy} \\ \sigma'_{yx} & \sigma'_{yy} \end{pmatrix}$$

$$p = \frac{\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}}{2}$$

Modello costitutivo avanzato: PM4Sand

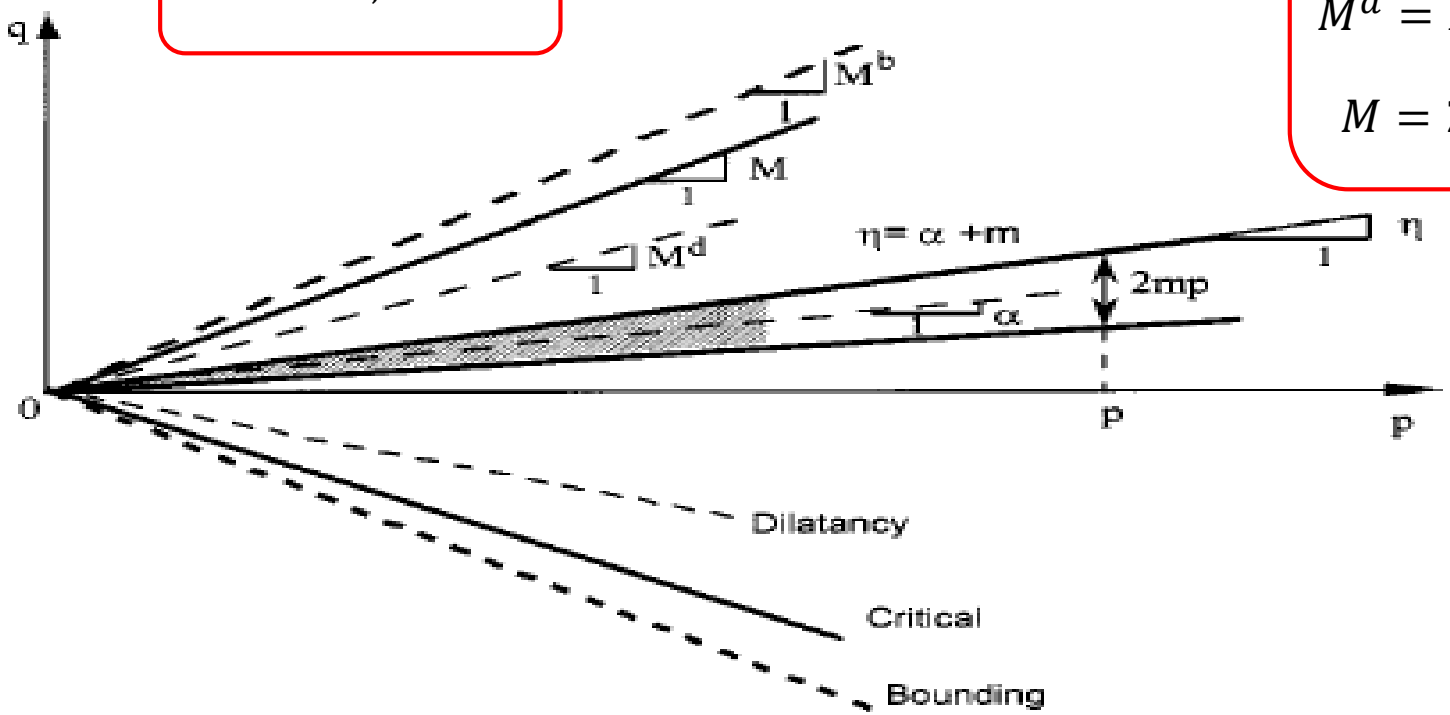
Il comportamento del materiale dipende dal parametro indice di stato relativo ξ_R ,il quale definisce la tendenza del materiale a contrarsi o a dilatare durante lo shearing , quindi definisce anche la generazione di pressione nell'acqua dei pori positiva o negativa in condizioni non drenate. Il modello include anche parametri di contrazione, dilatazione e di stato critico.

$$\xi_R = D_{R,CS} - D_R$$

$$M^b = M \cdot \exp\left(-n^b \xi_R\right)$$

$$M^d = M \cdot \exp\left(n^d \xi_R\right)$$

$$M = 2 \cdot \sin(\varphi_{CV})$$



Sviluppo analisi numeriche

- 1. Modello costitutivo avanzato: PM4Sand (2018)
- 2. Calibrazione modello
- 3. Simulazione prove sperimentali: prova taglio ciclico semplice(CSS)
- 4. Risultati

Calibrazione modello

Il modello consta di 11 parametri di input che possono essere modificati dall'utente . I parametri del modello sono classificati in due categorie:

un primo set di carattere sperimentale

DR0
G0
emax
emin
φ_{CV}
Q
R
ν

nb
nd
hp0

un secondo set di parametri che migliorano il fitting dei risultati nelle analisi numeriche

Sr=1	prova 22/02/2018 prova23/02/2018
Sr=0.95	prova 05/03/2018 prova08/03/2018 prova23/03/2018
Sr=0.9	prova 03/04/2018

Calibrazione modello

- Modulo di taglio normalizzato G0[-]:

Il modulo di taglio G_0 è correlata alla velocità delle onde di taglio secondarie VS1, dove quest'ultima è correlata alla densità relativa $D_{R.}$

$$G_0 = \frac{\rho V_{S1}^2}{p_a \left(\frac{1+K_0}{2}\right)^{1/2}} \qquad V_{S1} = 125\,(D_R + 1)^{0.1}$$

- Parametro di resistenza di picco nb[-] :

Il parametro di contrazione controlla la posizione della superficie di contrazione rispetto a quella di stato critico.

nb=0.5

- Parametro di dilatanza nd[-] :

Il parametro di dilatanza controlla l'andamento dello stress-ratio quando passa da fase contraente a dilatante e vice versa.

nd=0.5

Calibrazione modello

- Parametri della linea di stato critico Q e R [-] :

I parametri Q e R definiscono la linea di stato critico.

Q=9,5 R=0,8

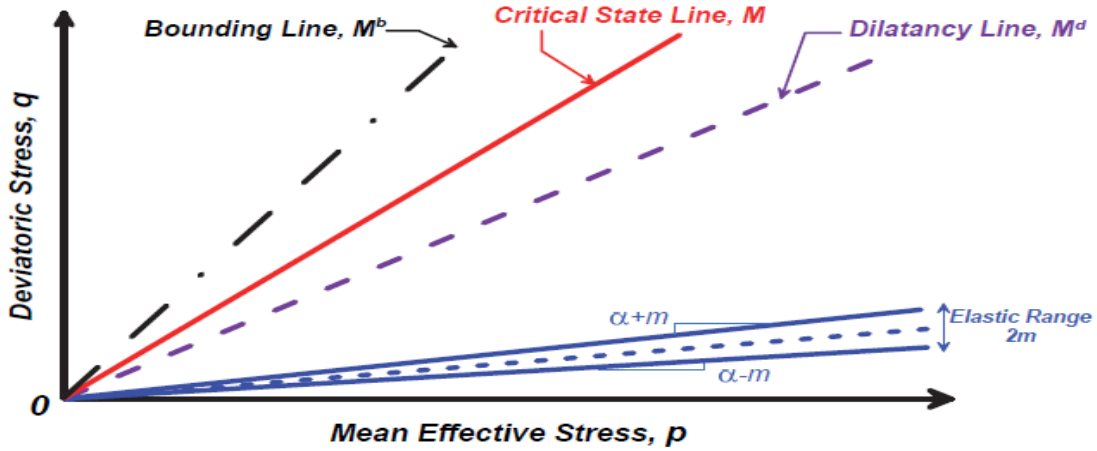
$$D_{R,CS} = \frac{R}{Q - ln100\frac{p'}{p_a}}$$

Dove $D_{R,CS}$ corrisponde alla densità relativa del materiale della linea di stato critico.

- Angolo di stato critico :

L' angolo di stato critico definisce la pendenza e la posizione nel piano della linea di stato critico.

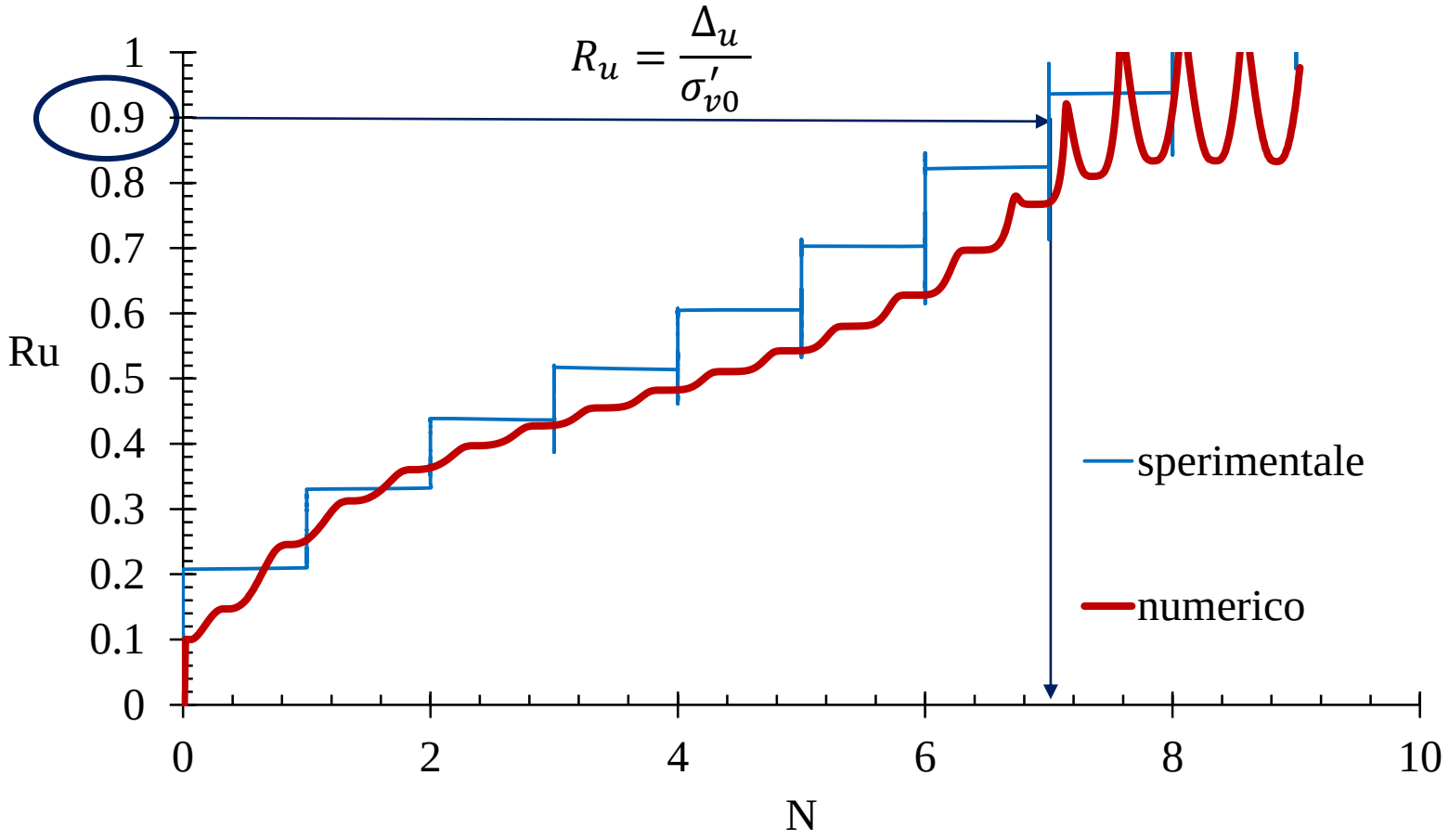
$$\varphi_{CV} = 31°$$



Calibrazione modello

- Parametro di addensamento hp_0[-]:

Il parametro di addensamento regola l'innesco della liquefazione da parte del materiale. Il parametro hp_0 è stato calibrato in modo da ottenere la stessa curva di resistenza ciclica sperimentale, rispettando il criterio di innesco della liquefazione (Ru=0.9).



Sviluppo analisi numeriche

- 1. Modello costitutivo : PM4Sand (2018)
- 2. Calibrazione modello
- 3. Simulazione prove sperimentali: prova taglio ciclico semplice(CSS)
- 4. Risultati

Simulazione prove sperimentali

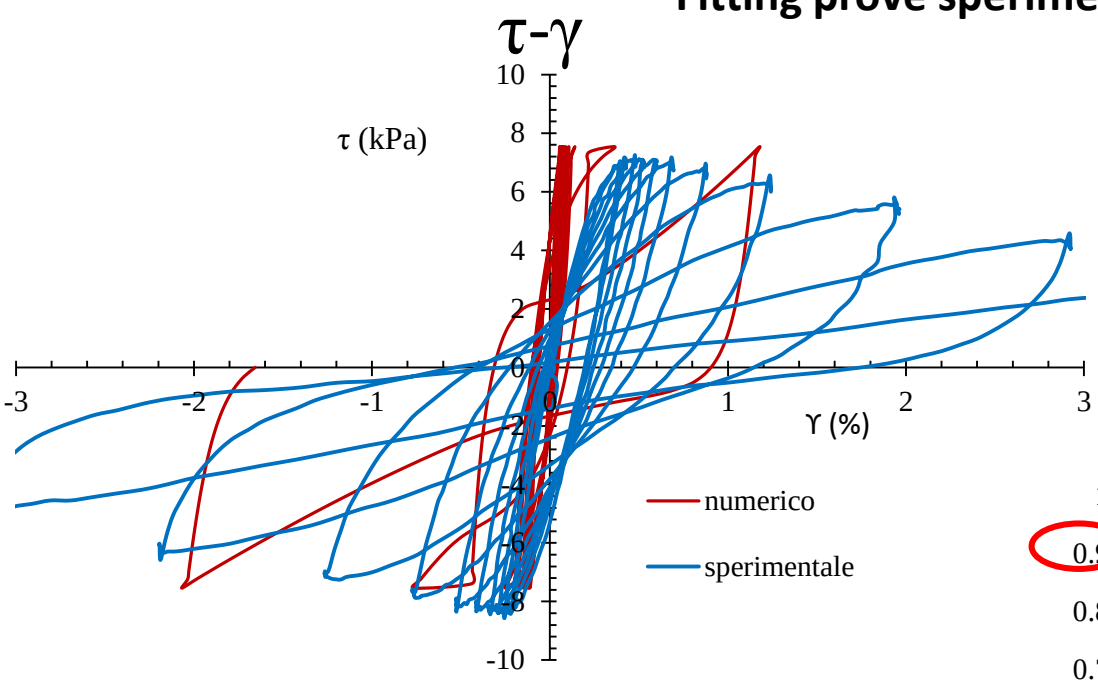
Analisi di Simulazione prove sperimentali di taglio ciclico semplice di provini saturi e parzialmente saturi

Approccio 1:
Best fitting mediante la calibrazione dei parametri dello scheletro solido

Approccio 2:
Best fitting mediante la calibrazione della rigidezza del fluido (Kw)

Approccio 1

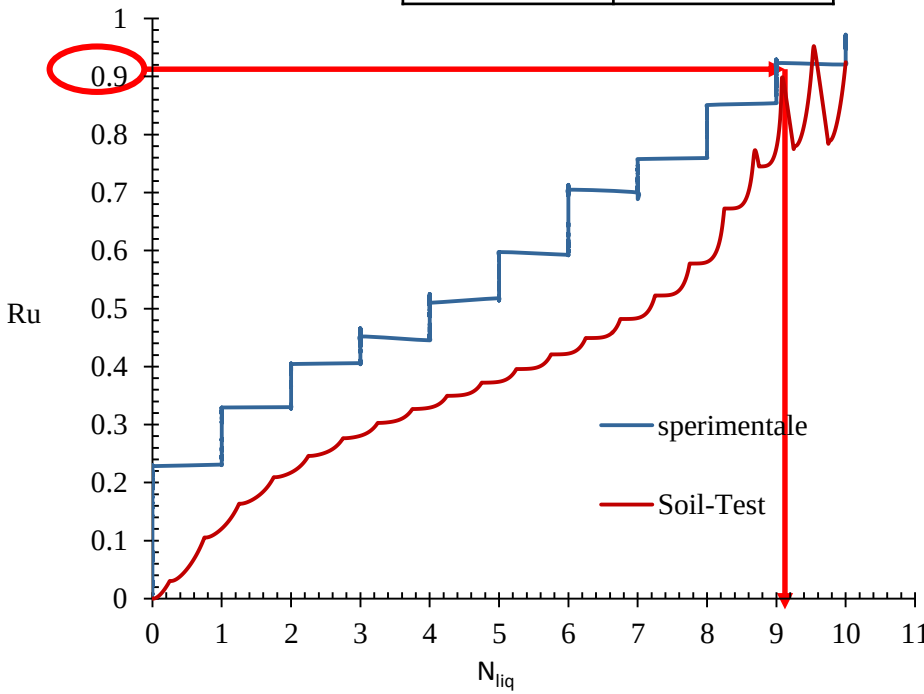
Fitting prove sperimentali



D_{R0}	0,42
G_0	379
hp_0	0,13
nb	0,5
nd	0,5
Q	9,5
R	0,8

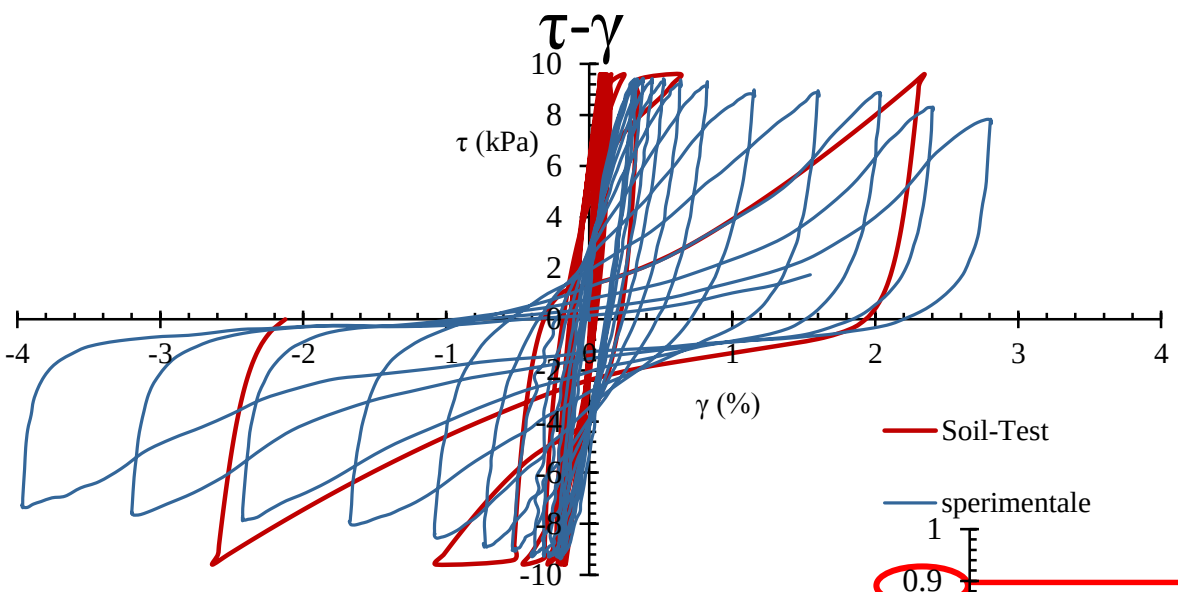
Sr=1

hp_0= 0.13



Approccio 1

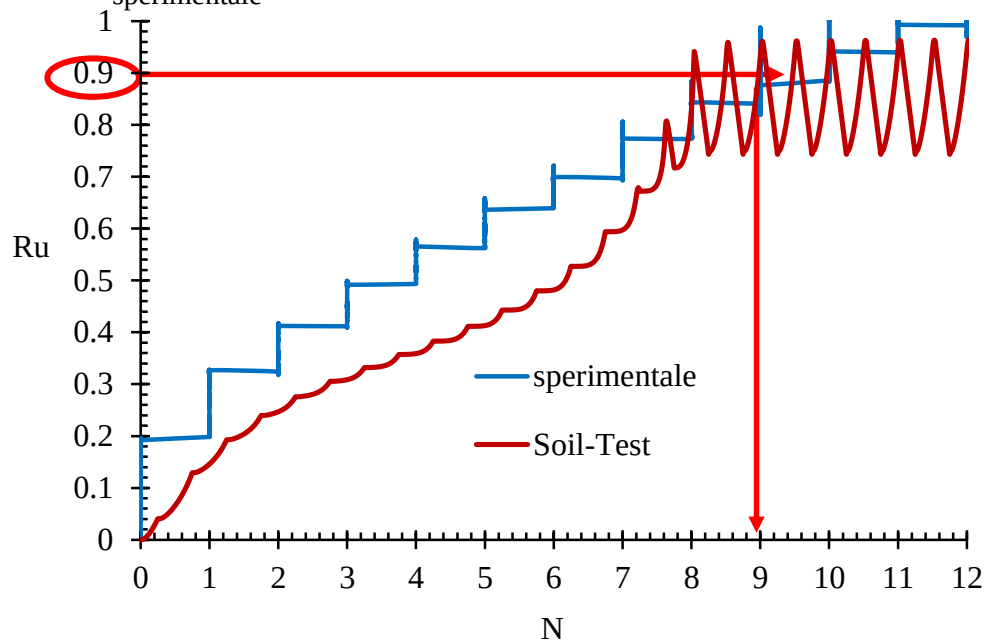
Fitting prove sperimentali



G0	376
DR0	0,43
hp0	0,25
nb	0,5
nd	0,5
Q	9,5
R	0,8

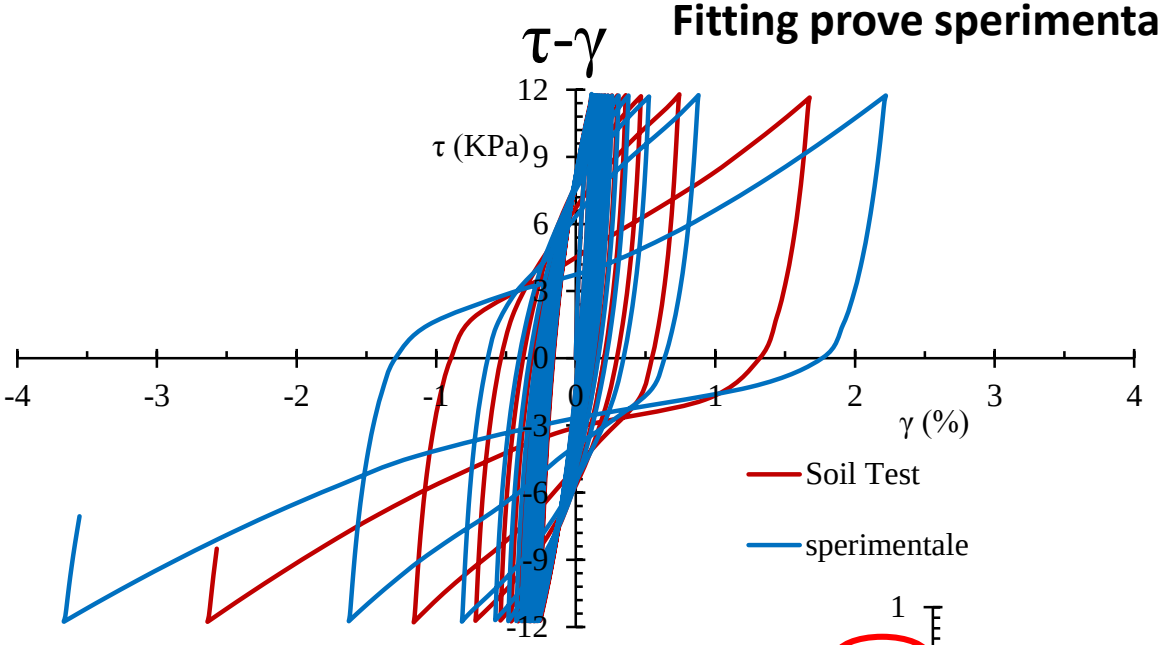
Sr=0,95

hp_0= 0.25



Approccio 1

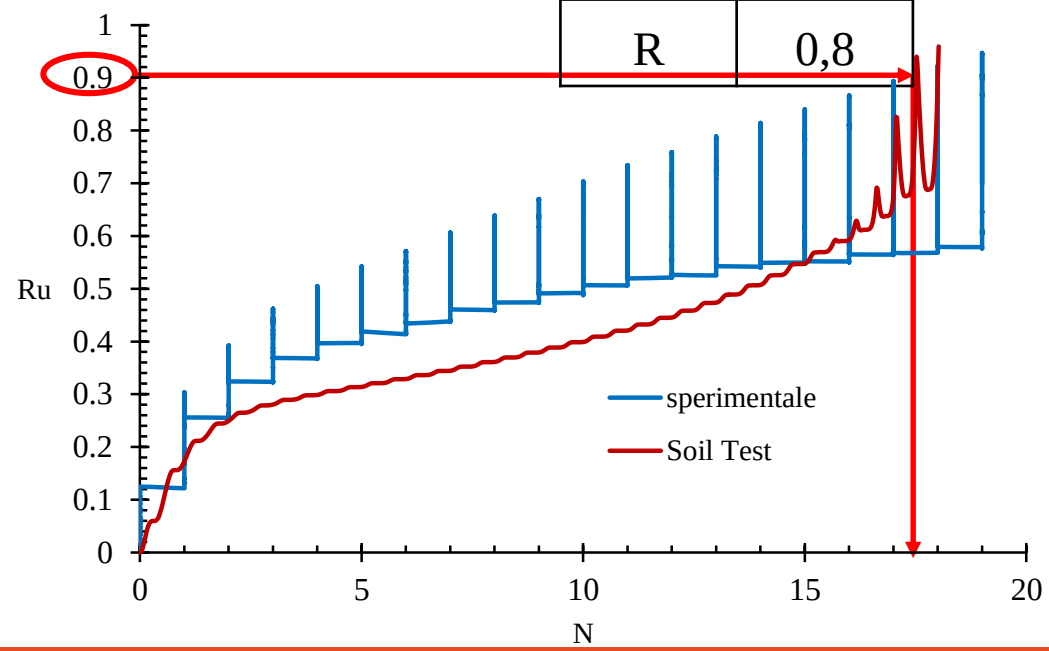
Fitting prove sperimentali



G0	372
DR0	0,43
hp0	1,25
nb	0,5
nd	0,5
Q	9,5
R	0,8

Sr=0,9

hp_0= 1.25



Approccio 2

Calibrazione rigidezza del fluido

- Il provino è stato realizzato completamente saturo(livello falda 0 m).

- Per una corretta valutazione dell'incidenza della variabilità del grado di saturazione sulla risposta meccanica del provino si è dovuto introdurre un nuovo parametro(previa calibrazione) che interpretasse al meglio la natura trifasica del mezzo non saturo:

$$K_f = \frac{K_{W,ref}}{n}$$

modulo di rigidezza del fluido dei pori

dove:

K_W (modulo di rigidezza della fase liquida)

n porosità del terreno

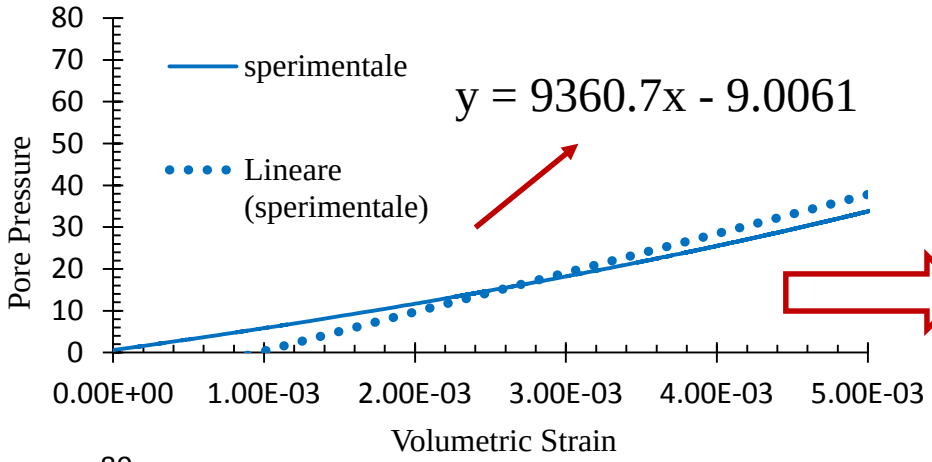
Undrained behaviour

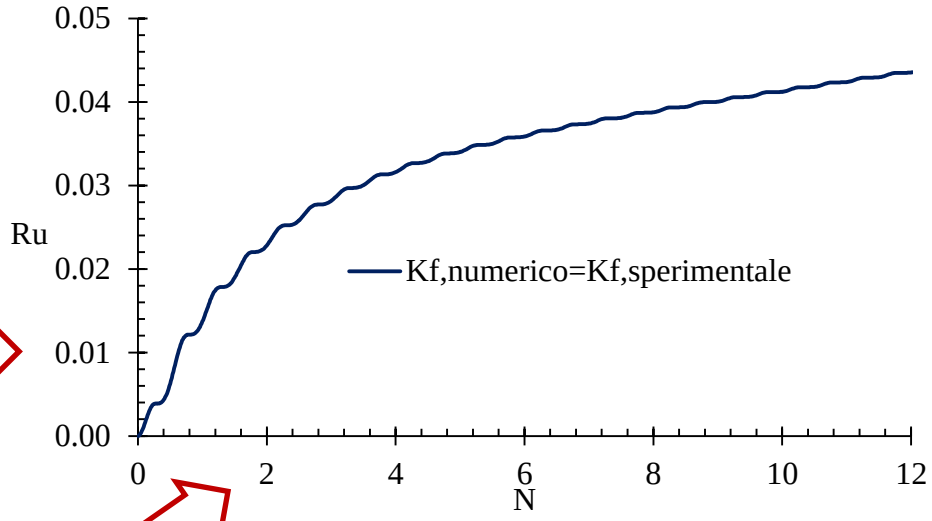
Undrained behaviour		Manual - Constant Kw
α_{Biot}		1,000
K_w	kN/m²	683,1E3
$K_{w,ref}$ / n	kN/m²	1,669E6

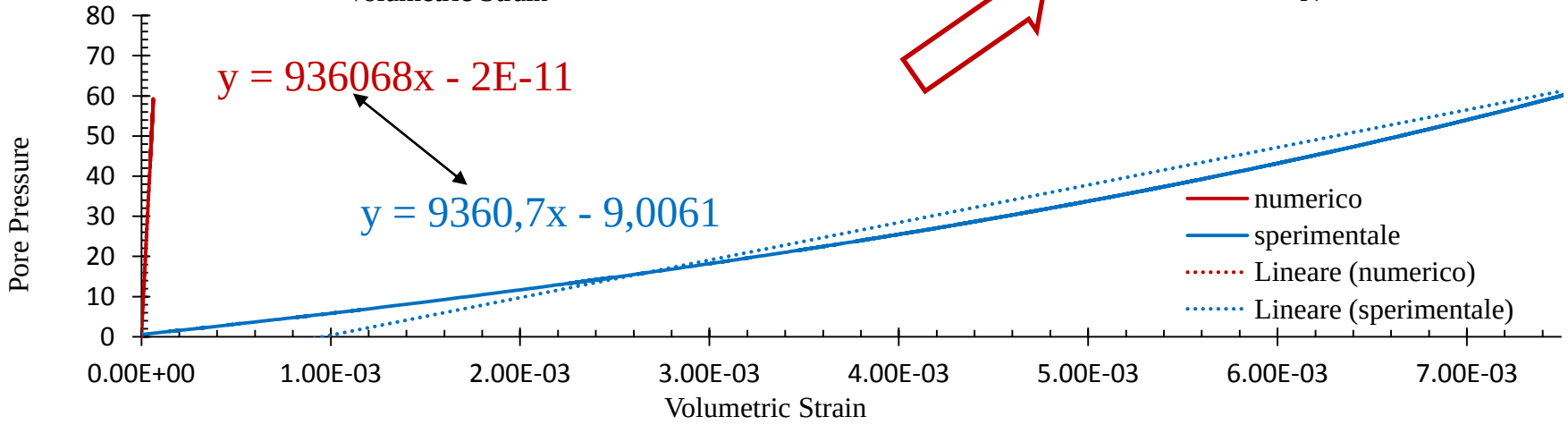
Approccio 2

Calibrazione rigidezza del fluido

- Diagramma dati sperimentali Pore Pressure, ε_V
- Nelle ipotesi di mezzo saturo il coefficiente angolare medio delle curve coincide con il modulo di rigidezza del fluido dei pori.

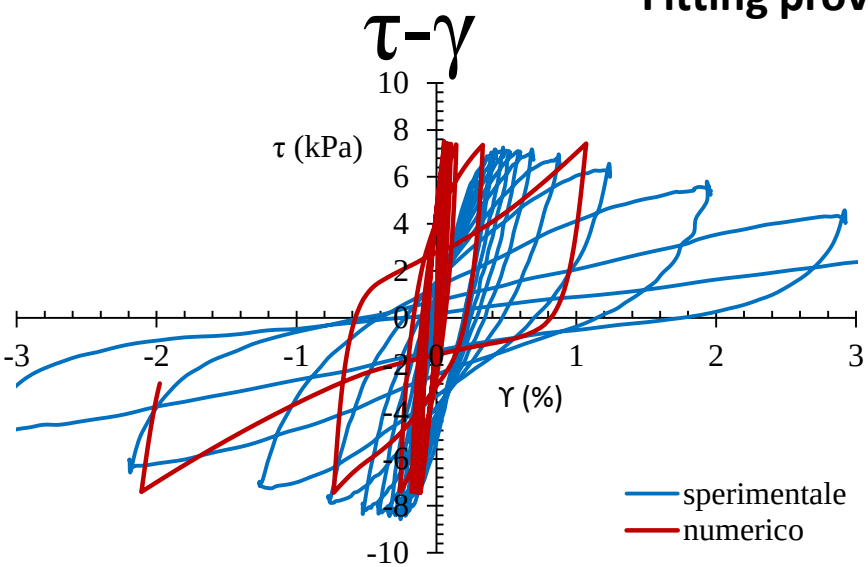






Approccio 2

Fitting prove sperimentali

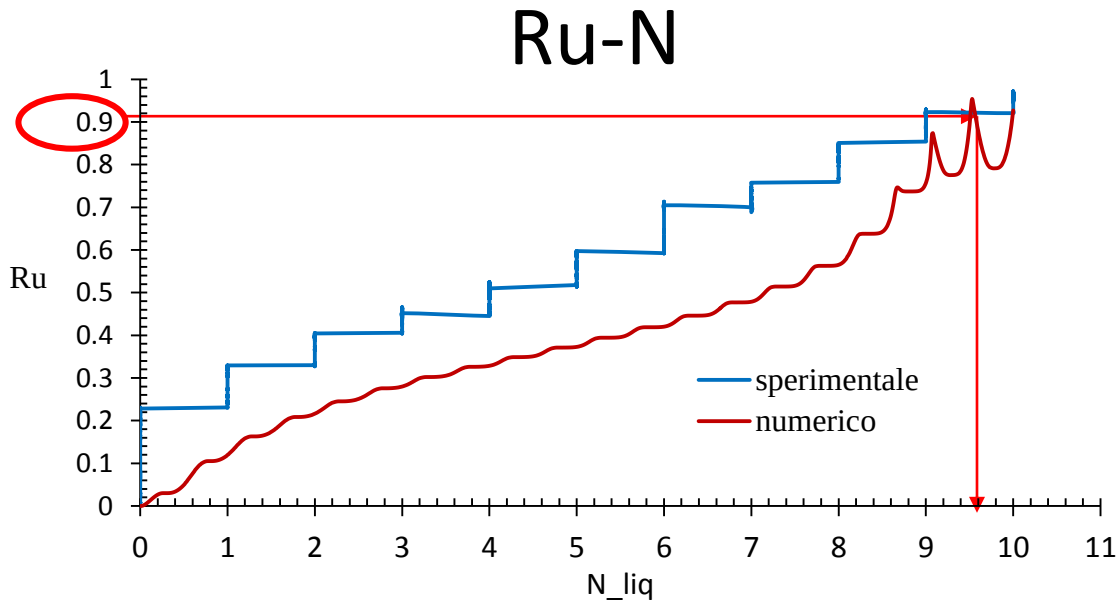


D_{R0}	0,42
G_0	379
hp_0	0,13
nb	0,5
nd	0,5
Q	9,5
R	0,8

Sr=1

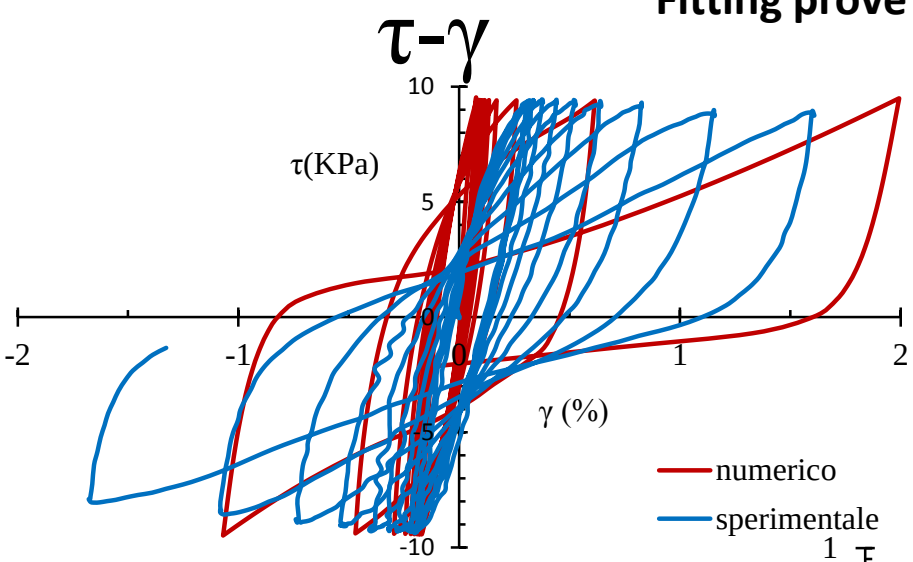
K_W=1.02 E+06 Kpa

K_f = 2.5 E+06 KPa

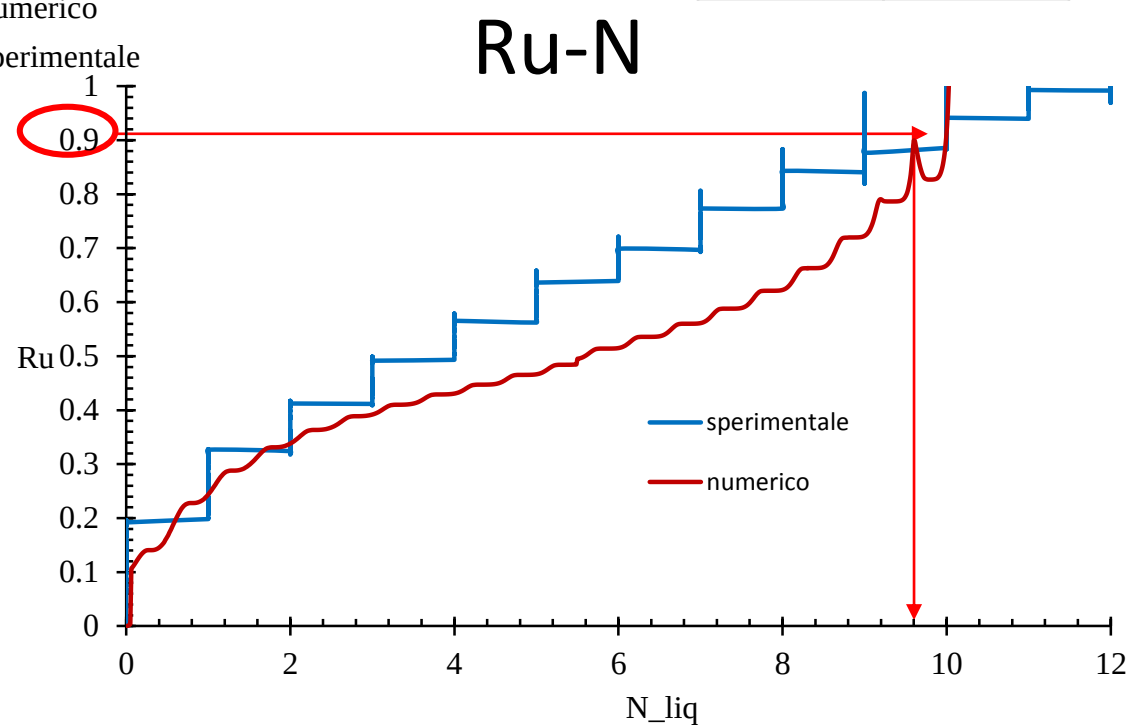


Approccio 2

Fitting prove sperimentali



G0	376
DR0	0,43
hp0	0,25
nb	0,5
nd	0,5
Q	9,5
R	0,8



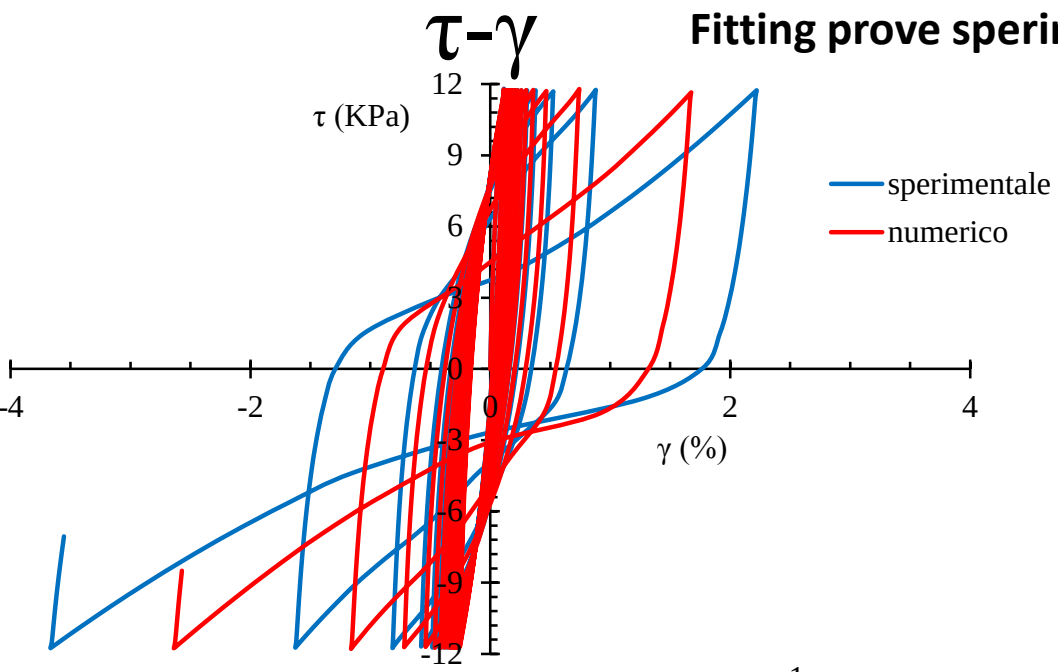
Sr=0,95

K_W=6.83 E+05 Kpa

K_f =1.67 E+06 KPa

Approccio 2

Fitting prove sperimentali

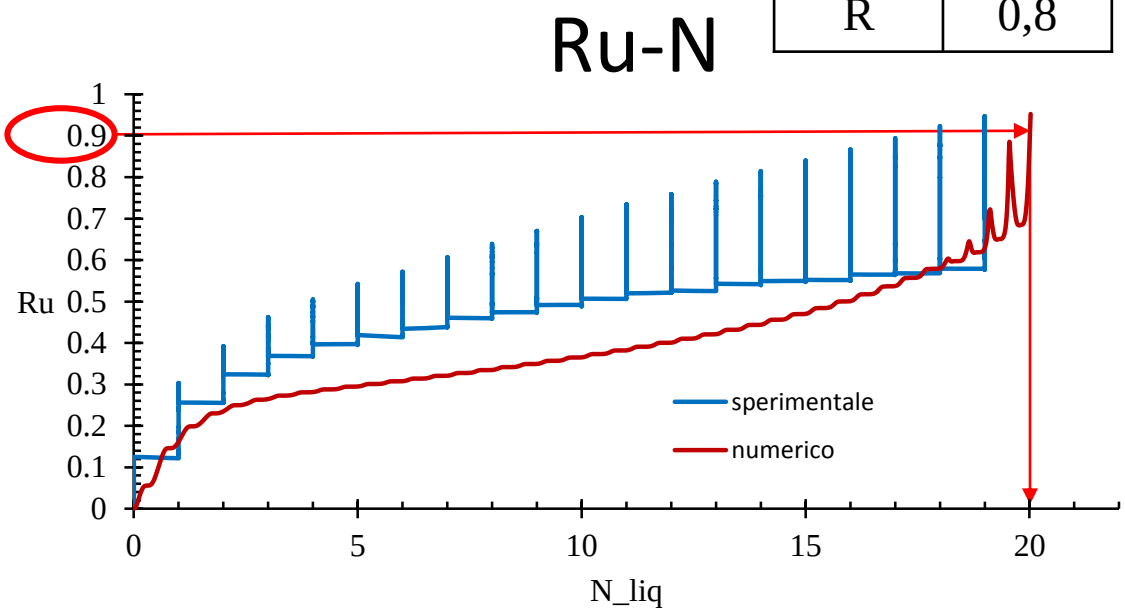


G0	372
DR0	0,43
hp0	1,25
nb	0,5
nd	0,5
Q	9,5
R	0,8

Sr=0,9

K_W=4.27 E+05 Kpa

K_f =1.04 E+06 KPa

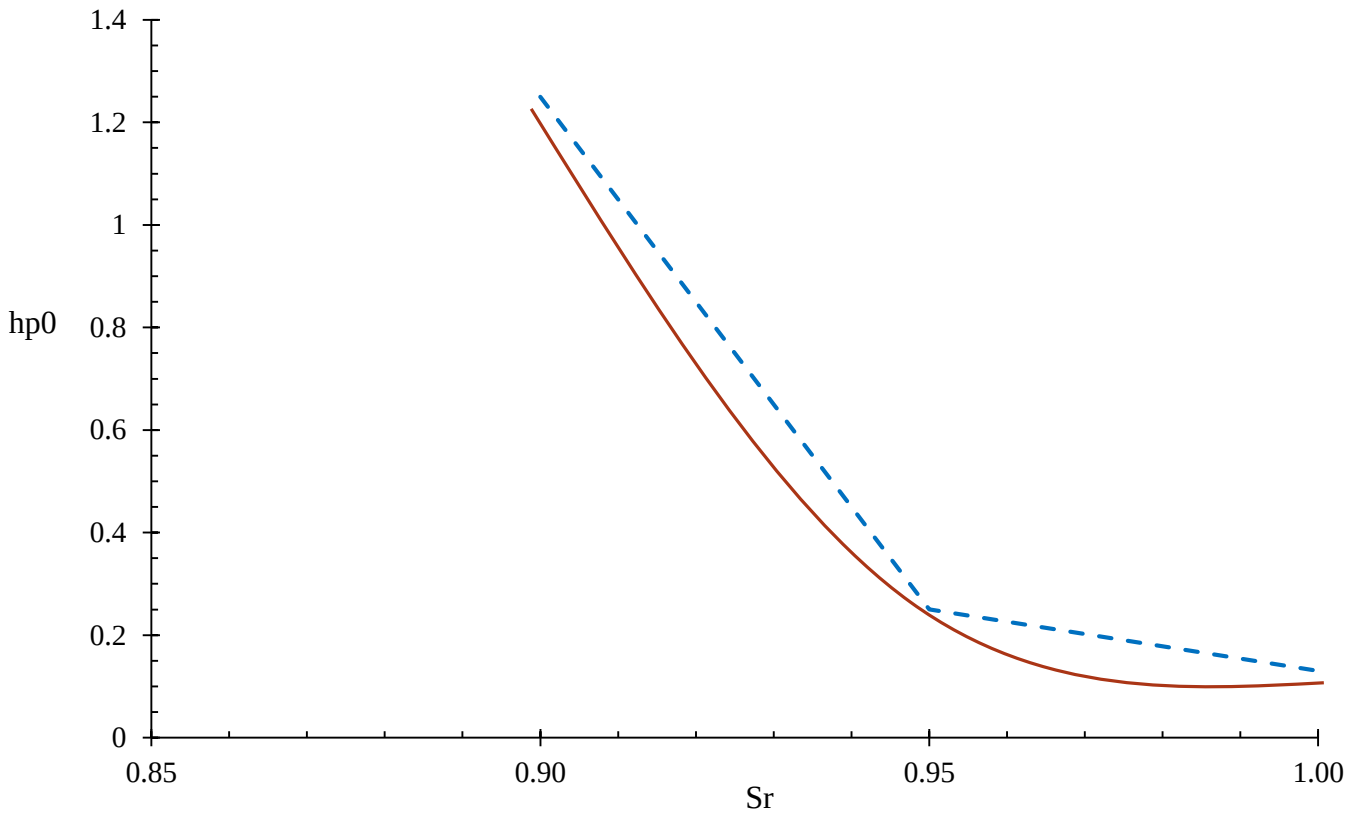


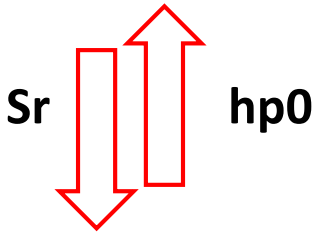
Sviluppo analisi numeriche

- 1. Modello costitutivo : PM4Sand (2018)
- 2. Calibrazione modello
- 3. Simulazione prove sperimentali: prova taglio ciclico semplice(CSS)
- 4. Risultati

Risultati analisi numeriche

Curva di calibrazione hp0-Sr

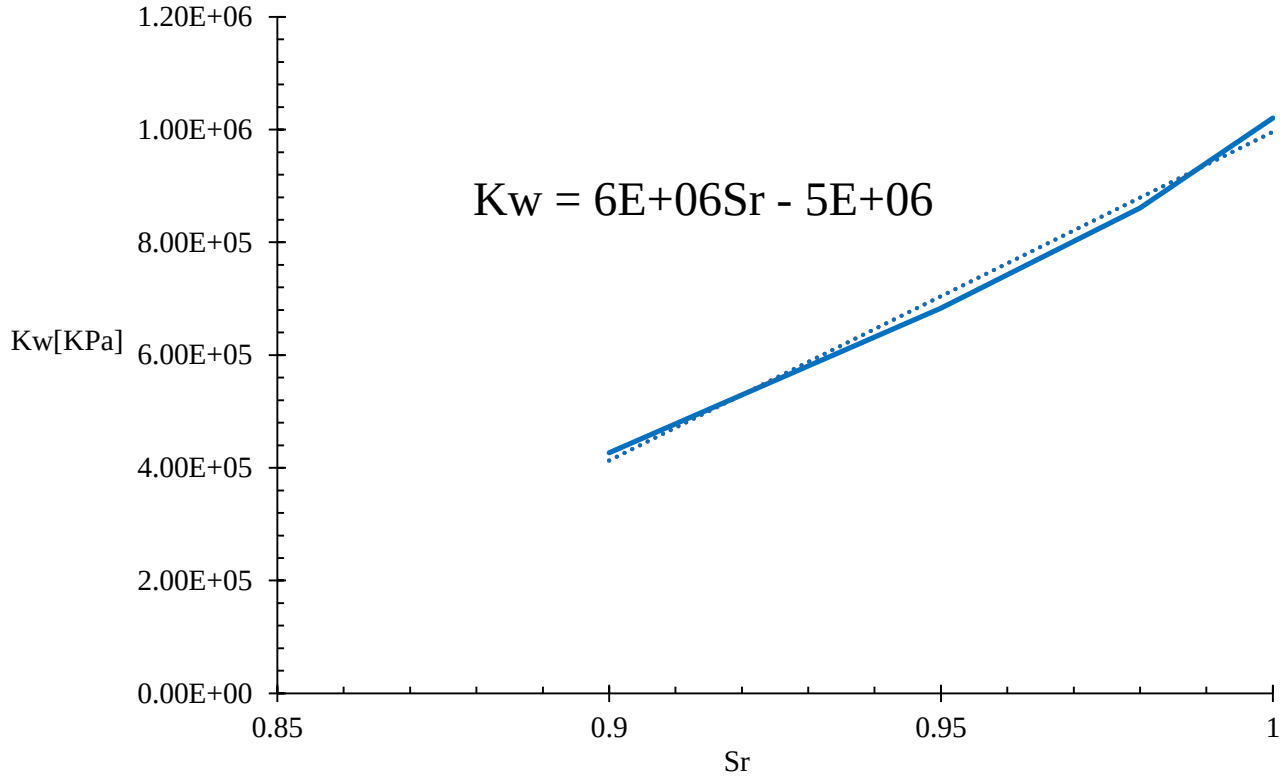


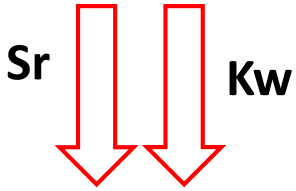


La riduzione del grado di saturazione comporta un incremento del parametro hp0 il quale comporta un ritardo dell' innesco della liquefazione a parità di grado di saturazione.

Risultati analisi numeriche

Curva calibrazione Kw-Sr

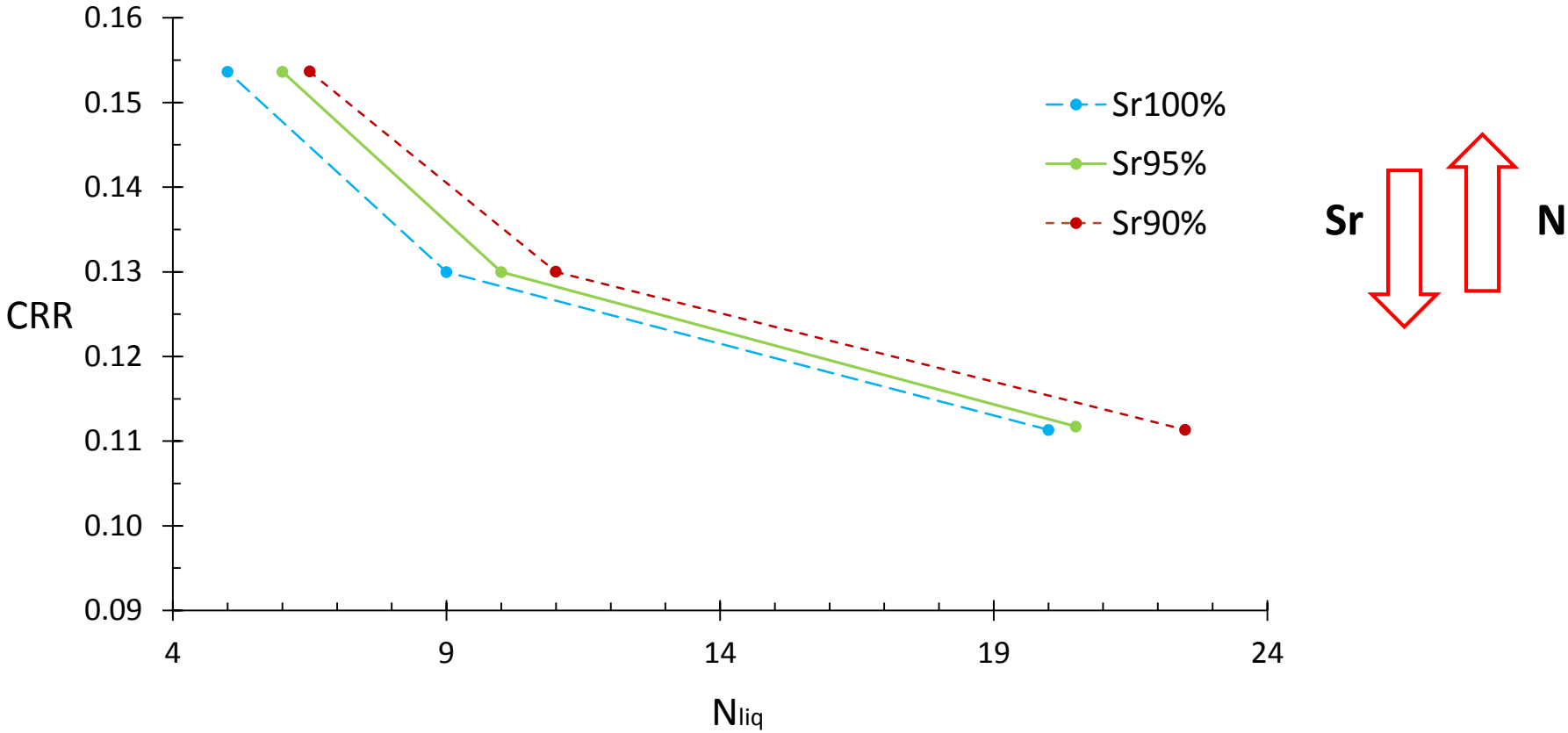




La riduzione del grado di saturazione comporta un decremento del modulo di rigidezza dell'acqua che denota una riduzione della compressibilità del fluido dei pori e quindi un ritardo nell'innesco del fenomeno della liquefazione.

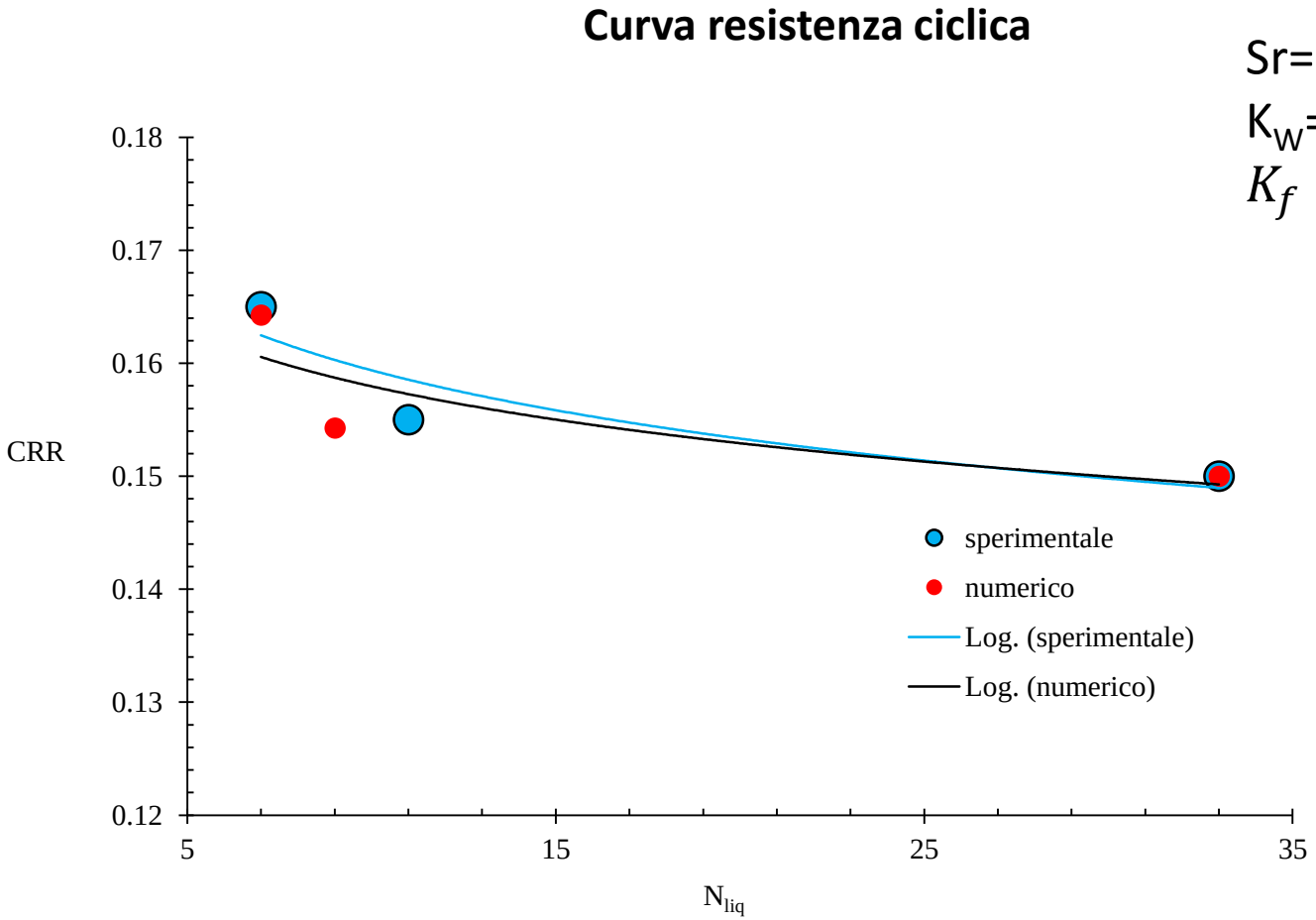
Risultati analisi numeriche

Effetti sulla resistenza ciclica per parziale saturazione indotta



La riduzione del grado di saturazione comporta un incremento del numero di cicli a liquefazione che si tramuta in un aumento della resistenza a liquefazione.

Risultati analisi numeriche



Sr=0,95

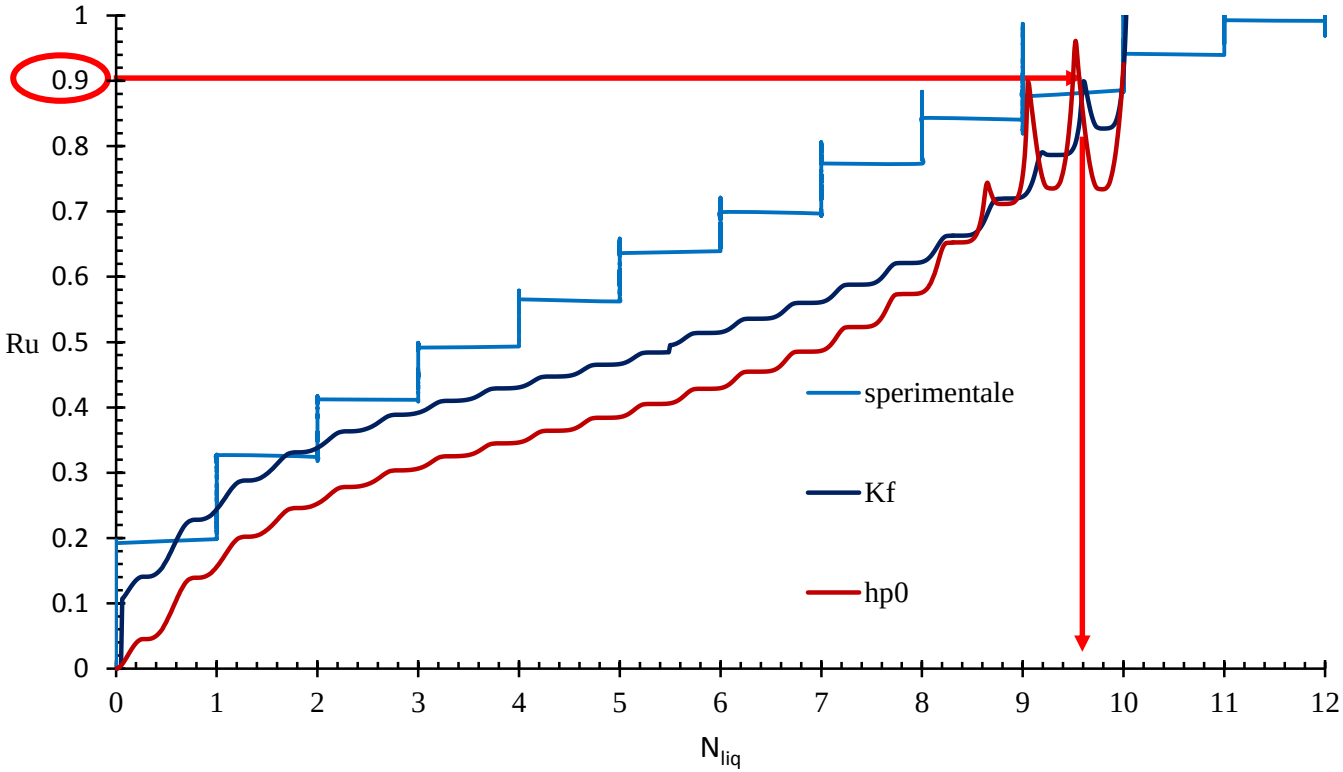
K_W=6.83 E+05 Kpa

K_f =1.67 E+06 KPa

Il presente grafico mostra come il modello sia in grado di simulare con buona precisone il comportamento a liquefazione in condizione di parziale saturazione.

Risultati analisi numeriche

Confronto metodi di simulazione



Dal presente grafico si nota come la simulazione mediante hp0 sia più precisa nel individuare l'innesco della liquefazione mentre la simulazione mediante Kf segue meglio l'andamento e lo sviluppo delle sovrappressioni

Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione

2. Studio dei meccanismi di liquefazione

3. Caso studio e Campo Prove

4. Attività sperimentale al laboratorio DICEA

5. Simulazione numerica dei risultati sperimentali

6. Conclusioni

Conclusioni

- L'effetto dell'addensamento è positivo nei confronti della suscettibilità a liquefazione. Infatti i campioni Osterberg CH1bis con Dr>70% e CH3 con Dr=64% presentano un CRR più alto dei campioni con densità relativa minore.

- Le prove di laboratorio mostrano che la riduzione del grado di saturazione incrementa la resistenza a liquefazione della sabbia mettendo in luce l'efficacia dell'intervento da effettuare in sito.

- La misura in situ delle velocità delle onde compressione permette di monitorare la parziale saturazione indotta atta alla riduzione del rischio di liquefazione del sito in esame.

- Il modello presenta una rigidezza superiore al fenomeno sperimentale, costituendo una forte limitazione per la previsione delle deformazioni per il caso studio in esame.

- Buona approssimazione dei risultati numerici con i valori sperimentali delle sovrappressioni.

- Individuazione di relazioni tra i diversi parametri di calibrazione, che ci consentono di simulare il comportamento meccanico di terreni con gradi di saturazione diversi da quelli da provati.

Grazie per l’attenzione!!!