

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. LM-35)

TESI DI LAUREA

**“ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE DELLA RESISTENZA A
LIQUEFAZIONE DI SABBIE SCIOLTE”**

RELATORE

Prof. Ing. Alessandro Flora

CORRELATORE

Ing. Lucia Mele

CANDIDATO

Nurcato Ciro

Matr. M67/399

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

- Studiare il fenomeno della liquefazione
 - Analizzare il comportamento ciclico di sabbie sciolte a diversa granulometria a bassi stati tensionali di confinamento
 - Simulare numericamente i risultati sperimentali
- 

Sviluppo del lavoro di tesi

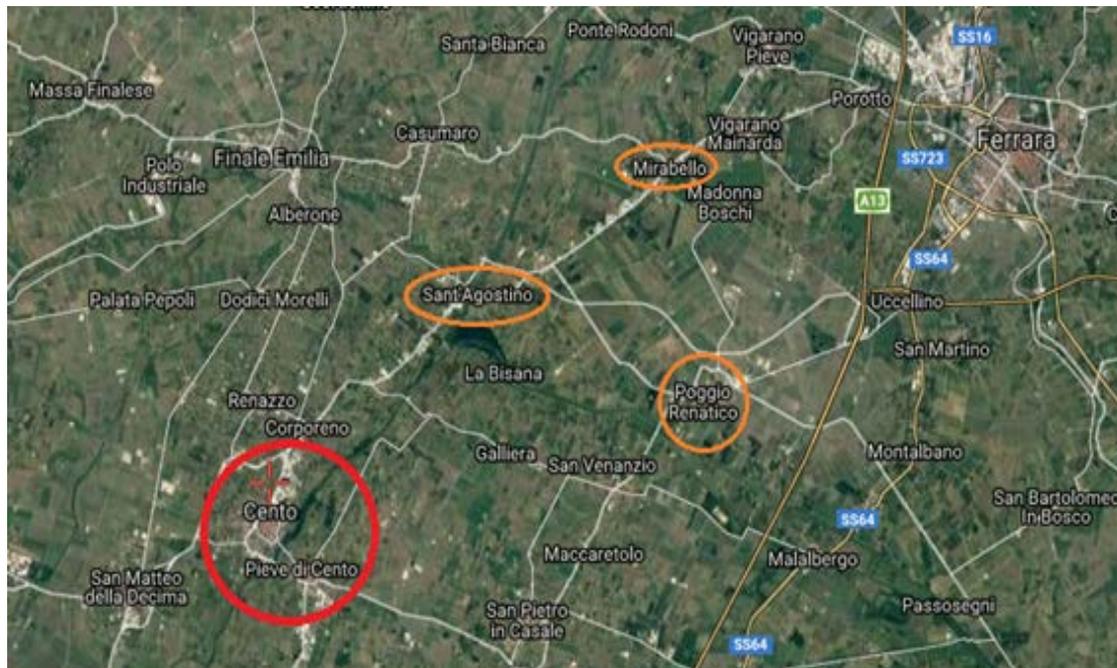
1. Introduzione
 2. Studio dei meccanismi di liquefazione
 3. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
 4. Analisi numerica dei risultati sperimentali
 5. Conclusioni
- 

Sviluppo del lavoro di tesi

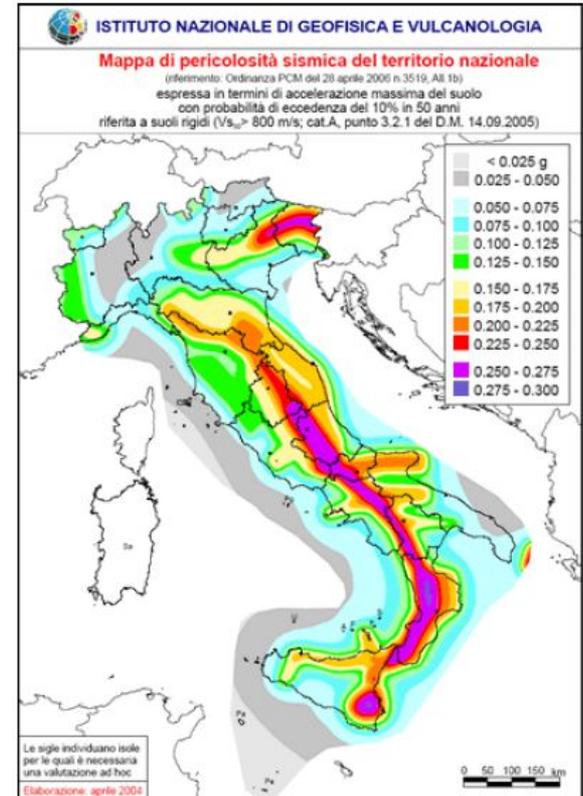
1. Introduzione
 2. Studio dei meccanismi di liquefazione
 3. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
 4. Analisi numerica dei risultati sperimentali
 5. Conclusioni
- 

Il terremoto dell'Emilia Romagna 2012

Il 20 Maggio 2012 un violento terremoto di magnitudo momento $M_w=5.9$ 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.



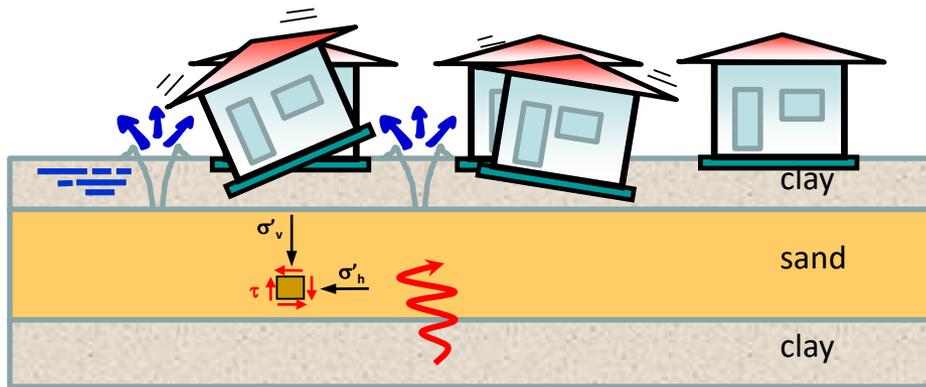
Per la prima volta in Italia si sono verificati diffusi fenomeni di liquefazione



Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione
 2. Studio dei meccanismi di liquefazione
 3. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
 4. Simulazione numerica dei risultati sperimentali
 5. Conclusioni
- 

LIQUEFAZIONE



Cause:

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



Accumulo
pressioni
neutre

$$\sigma = \sigma' + u$$

$$\tau_{\text{lim}} = \sigma'_v \cdot \tan \varphi = 0$$

Perdita di resistenza
al taglio

Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione
 2. Studio dei meccanismi di liquefazione
 3. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
 4. Simulazione numerica dei risultati sperimentali
 5. Conclusioni
- 

ATTIVITA' SPERIMENTALE

Apparecchiature utilizzare per la sperimentazione

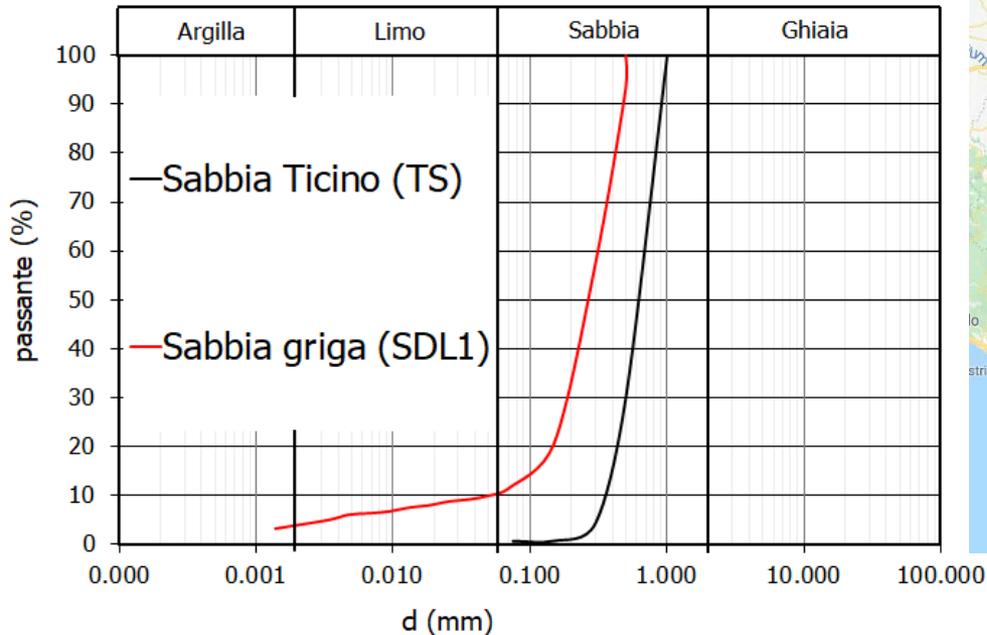


Cella triassiale a Stress Path
controllato di tipo Bishop & Wesley
(TX)

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

CARATTERIZZAZIONE MATERIALI

Pieve di Cento (BO) – Sabbia grigia (SDL1) e sabbia Ticino (TS)



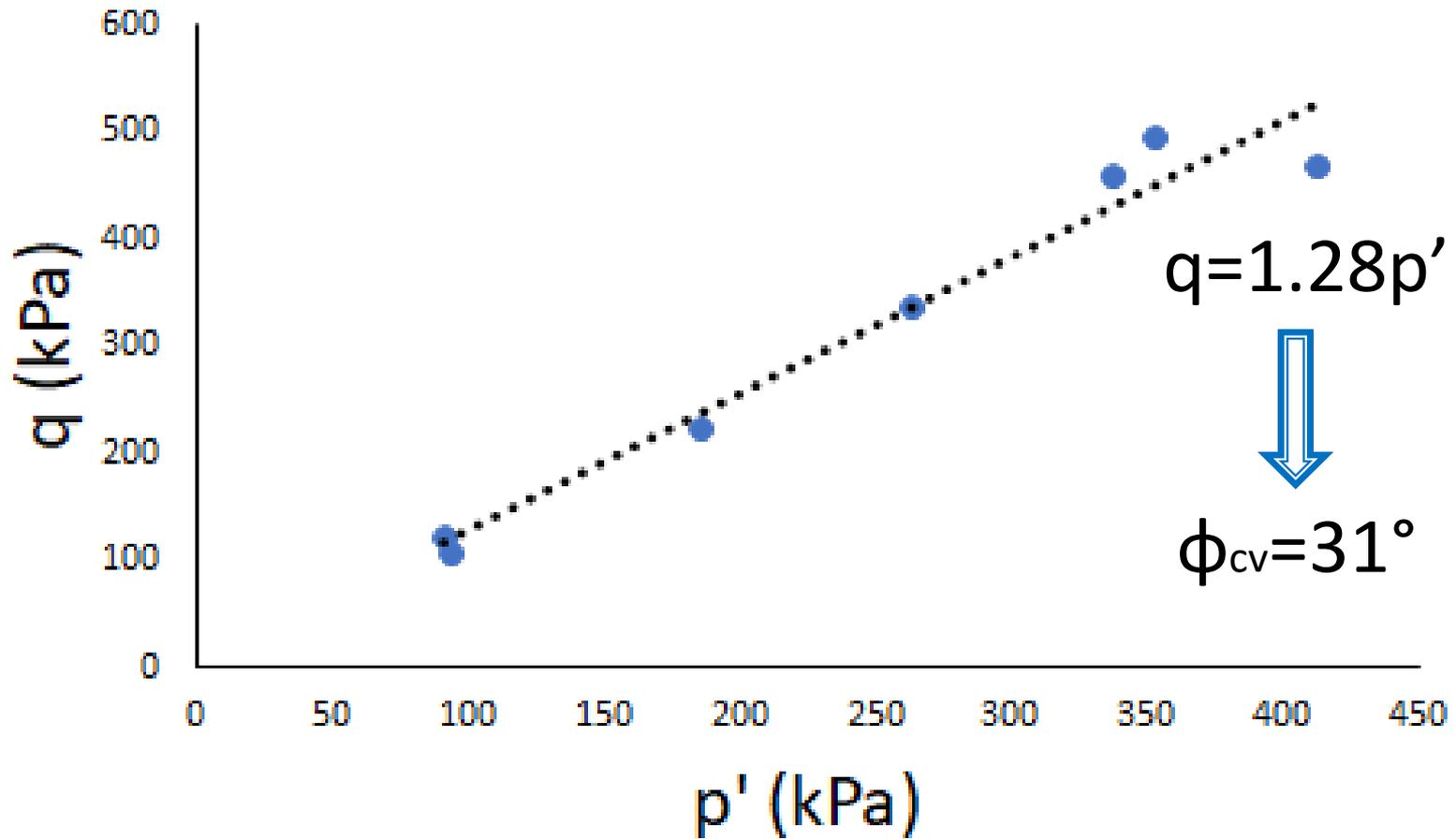
	Sabbia Ticino	Sabbia grigia
G_s	2,680	2,655
$e_{\max} - e_{\min}$	0,923 – 0,574	0,884 – 0,442
D_{10} (mm)	0,35	0,06
$U_c (=d_{60}/d_{10})$	1,89	5
FC ($d < 0,075\text{ mm}$) (%)	0	10,0

ATTIVITA' SPERIMENTALE

Pieve di Cento (BO) – Programma di prove su sabbia grigia SDL1 satura e Ticino sand TS
Prove cella triassiale Bishop & Wesley statiche

	Prove	Sabbia	Stress path	e_0	e_f	D_{r0} (%)	D_{rf} (%)	σ'_c (kPa)
D_r 42%	TS_TX_1	TS	CID	0.778	0.817	42	30	50
D_r 46%	SDL_TX_1	SDL1	CID	0.622	0.642	59	55	50
	SDL_TX_2	SDL1	CID	0.720	0.737	37	33	100
	SDL_TX_3	SDL1	CID	0.695	0.700	43	42	150
	SDL_TX_4	SDL1	CIU	0.658	0.658	51	51	50
	SDL_TX_5	SDL1	CID	0.681	0.698	46	42	70
	SDL_TX_6	SDL1	P' cost	0.650	0.678	53	47	100
	SDL_TX_7	SDL1	CID	0.730	0.739	35	33	151

Risultati di prove triassiali statiche SDL

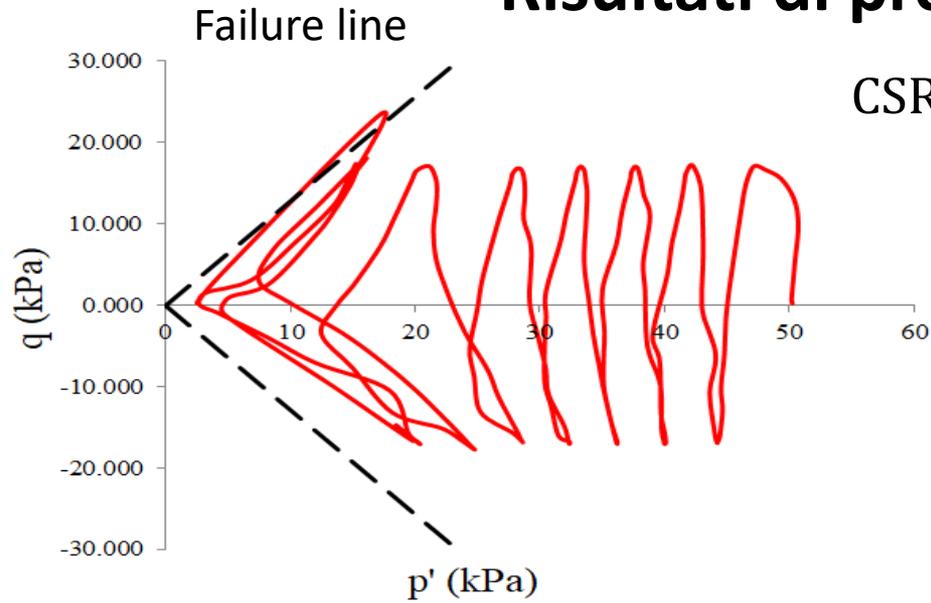


ATTIVITA' SPERIMENTALE

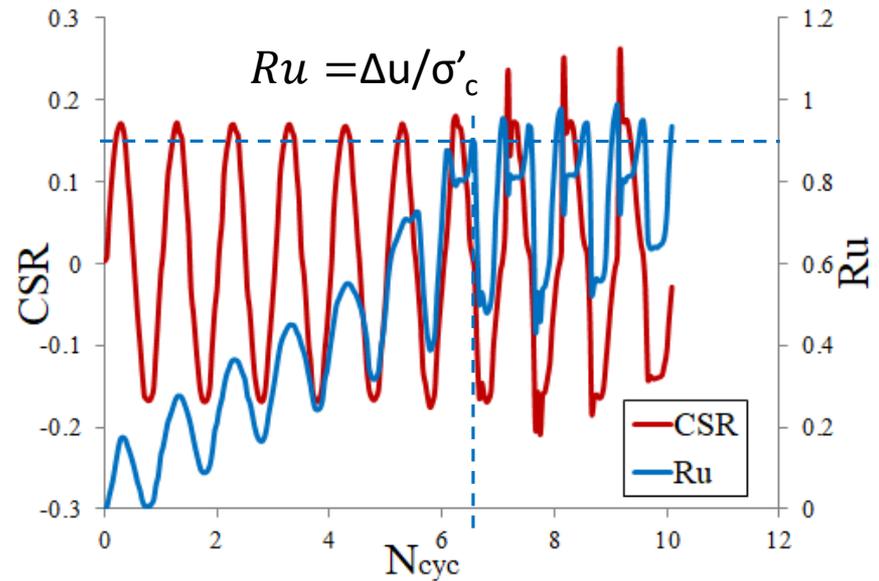
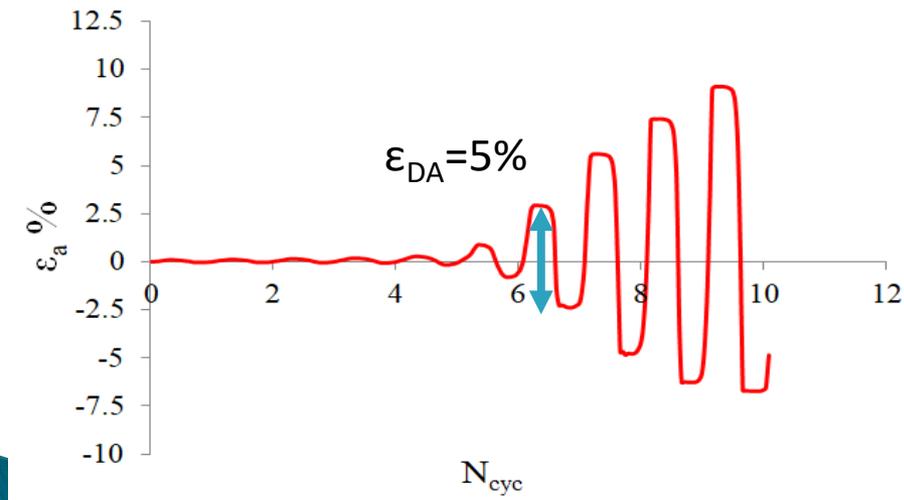
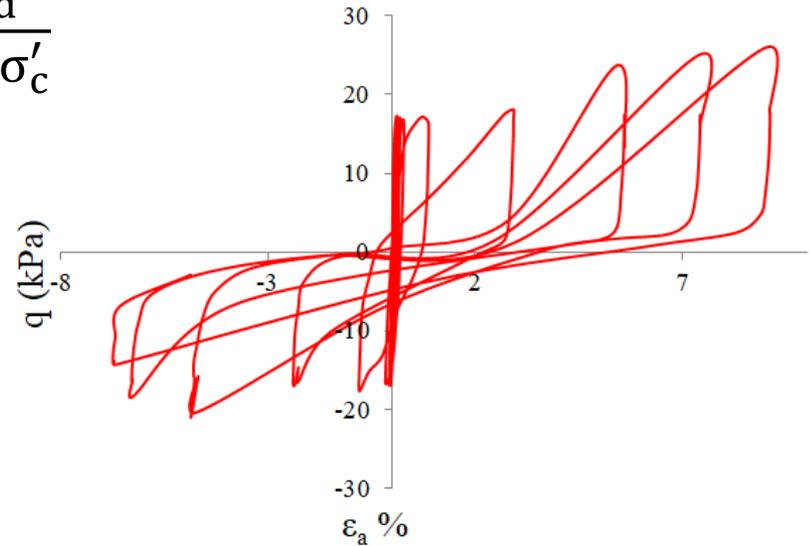
Pieve di Cento (BO) – Programma di prove su sabbia grigia SDL1 satura e Ticino sand TS
Prove cella triassiale Bishop & Wesley cicliche

	Prove	Sabbia	e_c	D_r (%)	σ'_c (kPa)	CRR	N_{liq}
D_r 38%	TS_CTX_1	TS	0.783	40	50	0.23	16
	TS_CTX_2	TS	0.791	38	50	0.26	9.5
	TS_CTX_3	TS	0.793	37	50	0.30	1
D_r 48%	SDL_CTX_1	SDL1	0.705	40	50	0.2	1
	SDL_CTX_2	SDL1	0.700	42	50	0.18	1.5
	SDL_CTX_3	SDL1	0.705	40	50	0.17	6.5
	SDL_CTX_4	SDL1	0.704	41	50	0.15	12
	SDL_CTX_5	SDL1	0.700	42	50	0.12	19

Risultati di prove triassiali cicliche

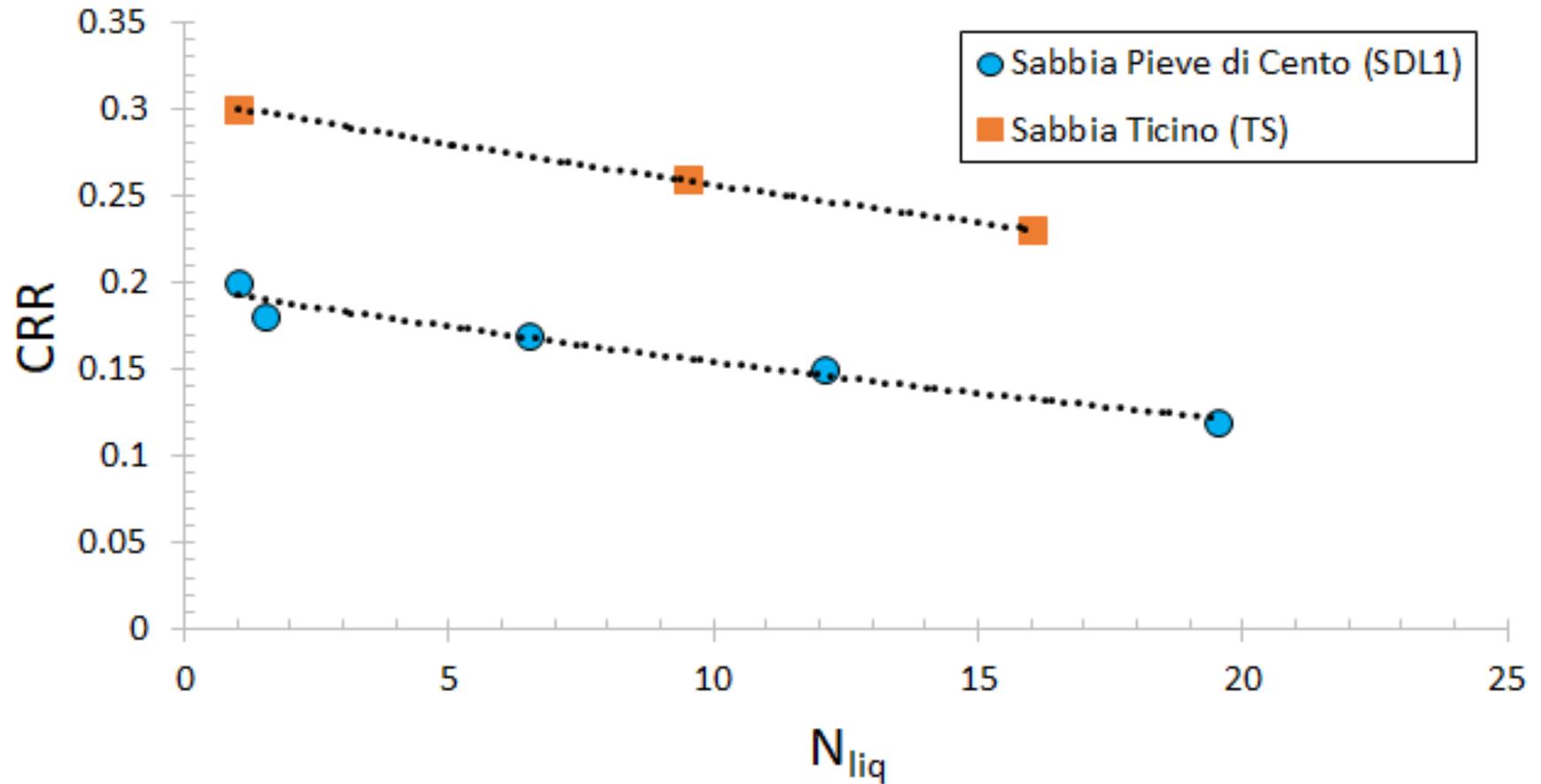


$$CSR = \frac{q_d}{2 \cdot \sigma'_c}$$



Prova SDL1_CTX_3

Risultati di prove triassiali cicliche



Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione
 2. Studio dei meccanismi di liquefazione
 3. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
 4. Simulazione numerica dei risultati sperimentali
 5. Conclusioni
- 

Sviluppo analisi numeriche

- 1. Teoria di base modello GSH
- 2. Parametri del modello e significato fisico
- 3. Calibrazione
- 4. Modifica del modello
- 5. Risultati

Teoria di base modello GSH

Il modello Granular Solid Hydrodynamic (GSH), ideato da Jiang e Liu si basa sui principi della termodinamica:

$$U = Ek + Ep + Q + L \quad (\text{I Legge della termodinamica})$$

$$d\omega = T_g ds_g + \pi_{ij} d\varepsilon_{ij}^e + T ds + \sum_{\alpha=s,f} \mu_\alpha d\rho_\alpha + \Omega_{ij} d\varepsilon_{ij}^L \quad \text{Cheng (2015)}$$

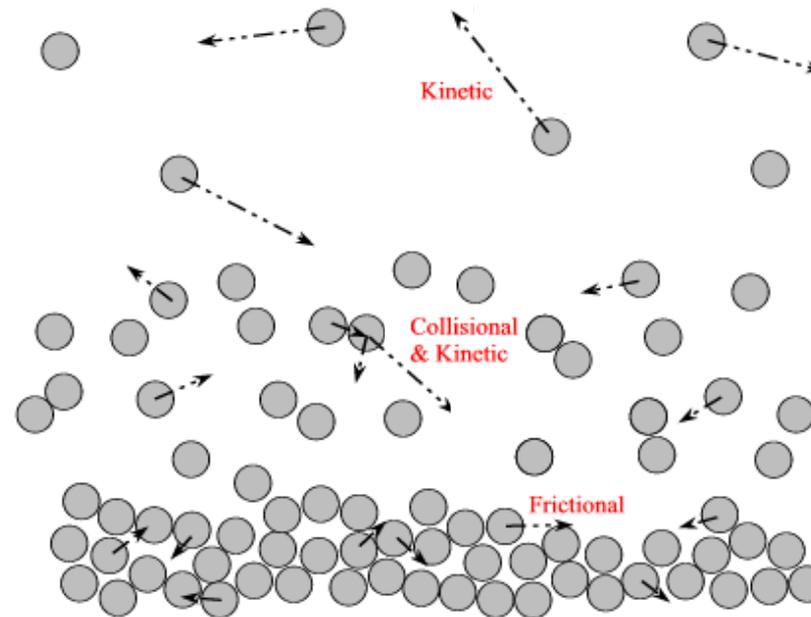
- ω = Densità di energia;
- s_g = Entropia granulare
- π_{ij} = Stress elastico;
- ε_{ij}^L = Energia bloccata;
- T = Temperatura;
- T_g = Temperatura granulare;
- μ = Viscosità dinamica;
- ρ_α = Densità.

Variabili di stato indipendenti	Variabili coniugate alle variabili di stato
s_g	T_g
ε_{ij}^e	π_{ij}
s	T
ρ_α	μ_α
ε_{ij}^L	Ω_{ij}

Teoria di base modello GSH

Entropia granulare

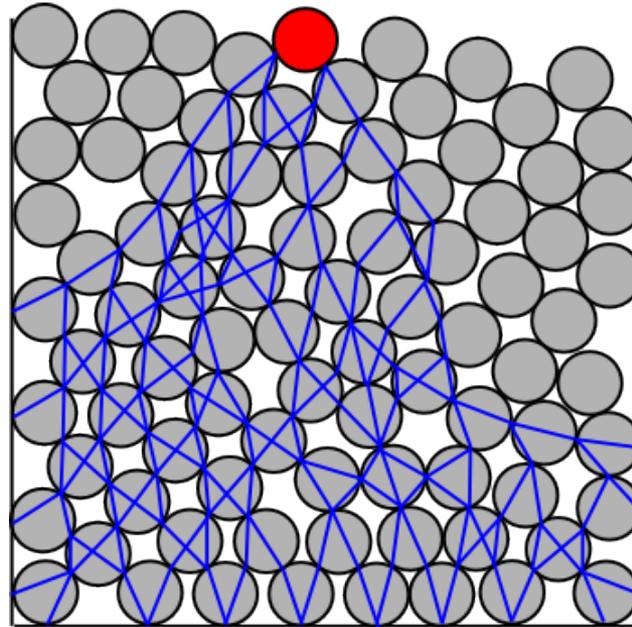
L'entropia granulare si manifesta sotto forma di fluttuazioni granulari, esse consistono in interazioni tra particelle (scivolamento, rotolamento e collisione) durante i cicli di carico-scarico. Questo processo si attenua quando l'energia cinetica del sistema si trasforma in calore (T_g =Temperatura granulare). La temperatura granulare assume una forte rilevanza nel calcolo delle deformazioni plastiche.



Teoria di base modello GSH

Energia bloccata

Annoverabile come deformazione plastica l'energia bloccata è concettualmente il fenomeno che si verifica successivamente all'applicazione di un carico su un terreno, le particelle si comprimeranno elasticamente ma alcune di esse resteranno intrappolate e compresse.



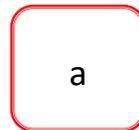
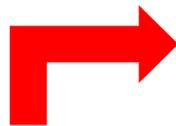
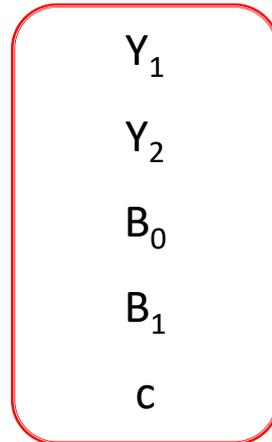
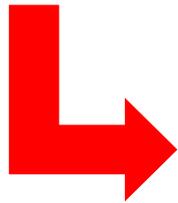
Sviluppo analisi numeriche

- 1. Teoria di base modello GSH
- 2. Parametri del modello e significato fisico
- 3. Calibrazione
- 4. Modifica del modello
- 5. Risultati

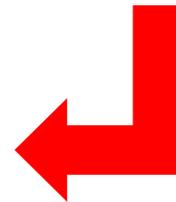
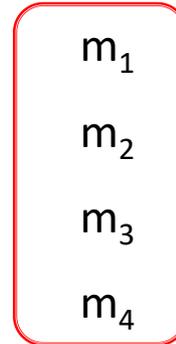
Parametri del modello e significato fisico

Il modello consta di 12 parametri di input che possono essere modificati dall'utente, essi si possono suddividere in 4 categorie:

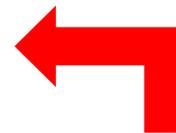
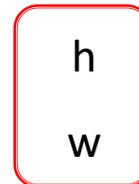
Parametri rilevanti per il calcolo della densità di energia.



Parametro di degradazione ciclica.



Coefficienti di migrazione.



Parametri isteretici.

Parametri del modello e significato fisico

- **Y_1 e Y_2 :**

Y_1 è una costante del materiale che controlla l'angolo di attrito mentre Y_2 consente di tener conto dell'anisotropia del materiale.

- **B_0 e B_1 :**

Modificano la pendenza della superficie limite dello stato di carico (SSBS), inoltre compaiono nel calcolo di B che rappresenta la rigidità del materiale.

$$B = B_0 \exp(B_1 p_s)$$

- **c :**

Deformazione volumetrica elastica massima permessa, è anche collegato alla coesione.

Parametri del modello e significato fisico

- **a:**

Costante che controlla il rate di deformazione e la degradazione di rigidità (la risposta del materiale). Con “a” molto grandi abbiamo un comportamento elastico-lineare (non ci sono dissipazioni), i cicli diventano più compatti e ne modifica la pendenza dello stress path.

- **m₁, m₂, m₃ e m₄:**

m₁ è un parametro utile per il calcolo delle deformazioni elastiche volumetriche, i restanti valori di m gestiscono la variazione della temperatura granulare (T_g)

$$d_t T'_g = m_4 \left(\frac{m_2 d_t e_{ij} d_t e_{ij} + m_2 m_3 (d_t e_{kk})^2}{\rho_g} - \frac{T'_g}{\rho_d} \right)$$

Parametri del modello e significato fisico

- **h:**

Massimo valore per la norma della deformazione bloccata, controlla la risposta meccanica nei cicli (parametro isterico). Aumentando “h” le deformazioni tendono a ciclare simmetricamente, raggiunta la simmetria le deformazioni non cambiano ulteriormente anche aumentando ulteriormente il parametro.

- **w:**

Costante che controlla l'accumulo della deformazione residua nei cicli, può variare tra 0 e 1.

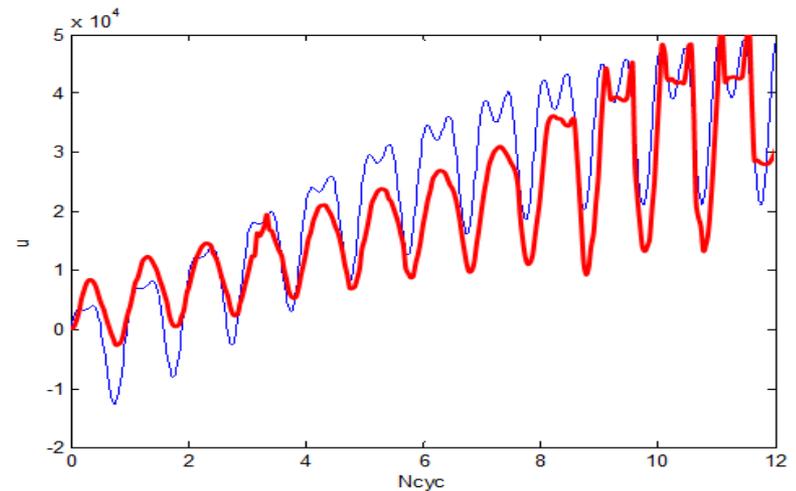
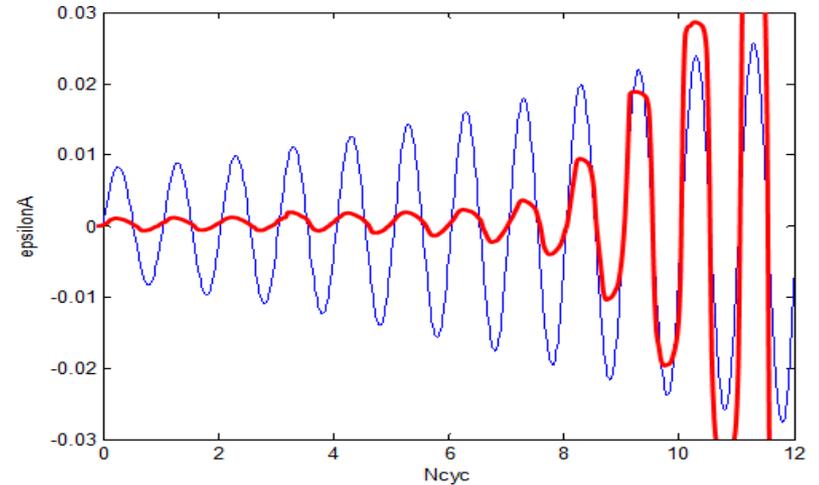
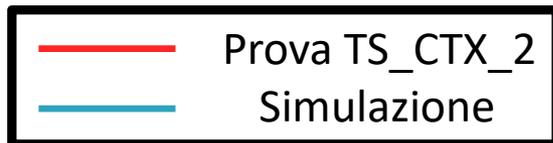
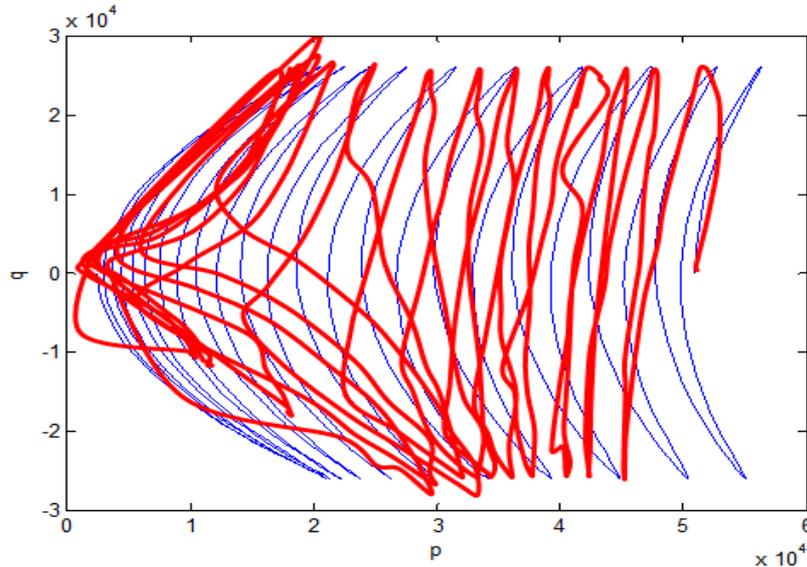
Sviluppo analisi numeriche

- 1. Teoria di base modello GSH
- 2. Parametri del modello e significato fisico
- 3. Calibrazione
- 4. Modifica del modello
- 5. Risultati

Calibrazione

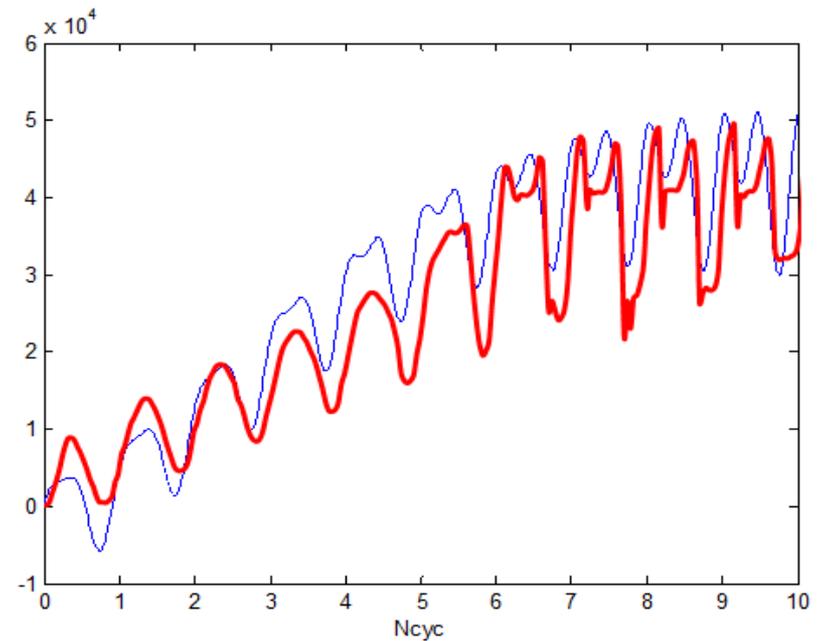
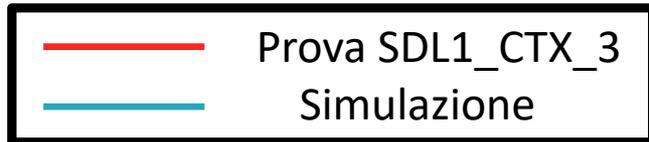
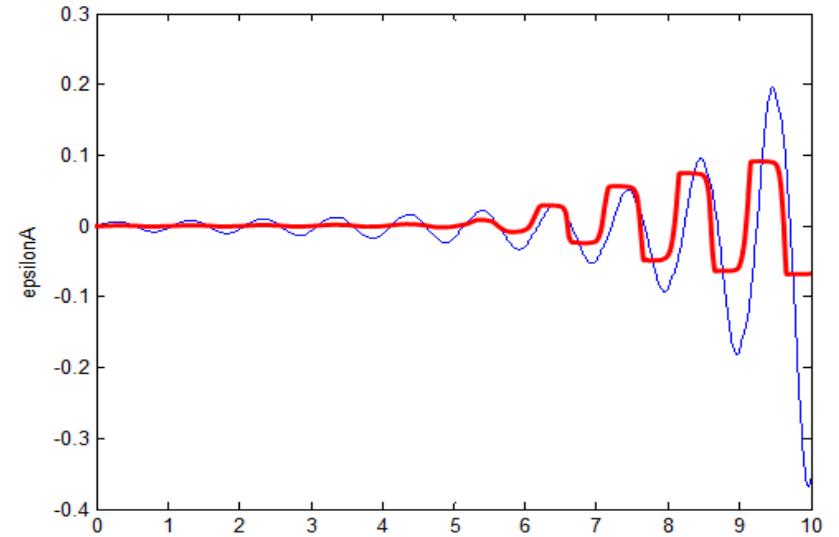
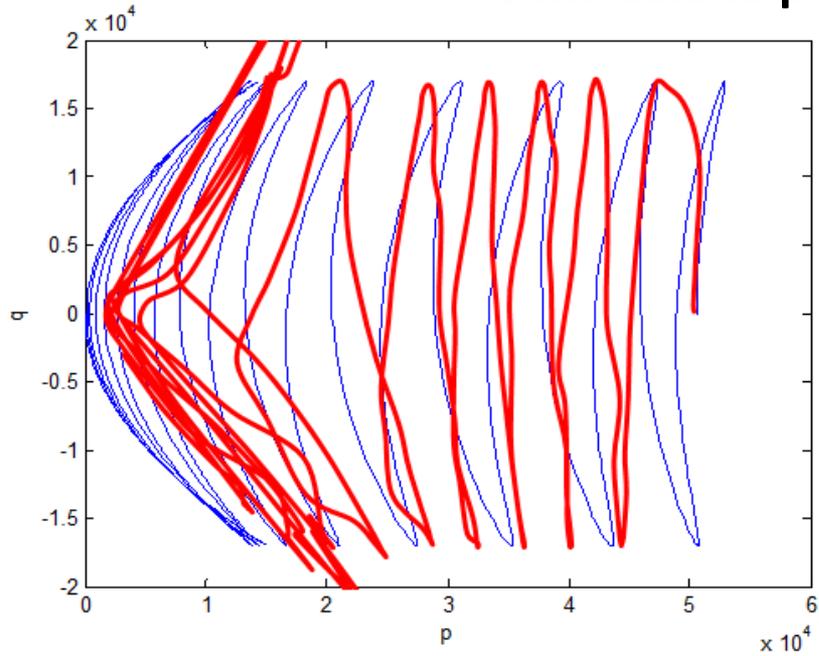
Simulazione prova CTX per sabbia Ticino

Per la calibrazione del modello sono stati presi in considerazione i risultati ottenuti nella prova TS_CTX_2 dalla cella triassiale Bishop & Wesley dalla quale abbiamo ricavato 3 grafici significativi: p' - q ; N_{cyc} - ϵ_a ; N_{cyc} - Δu . I parametri del modello sono stati poi calibrati in modo tale da ottenere dei grafici quanto più simili a quelli del caso reale.

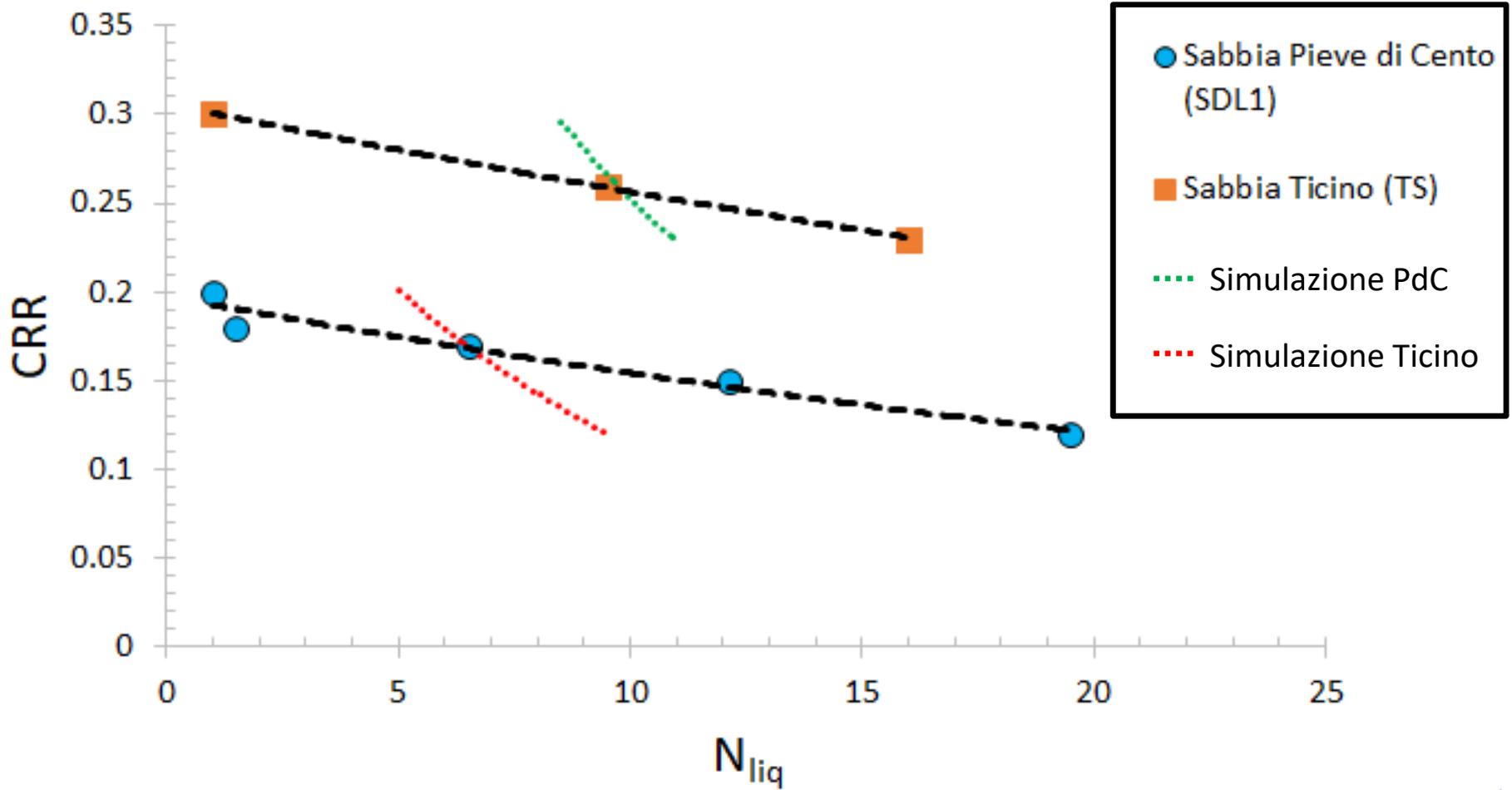


Calibrazione

Simulazione prova CTX per sabbia grigia



Calibrazione



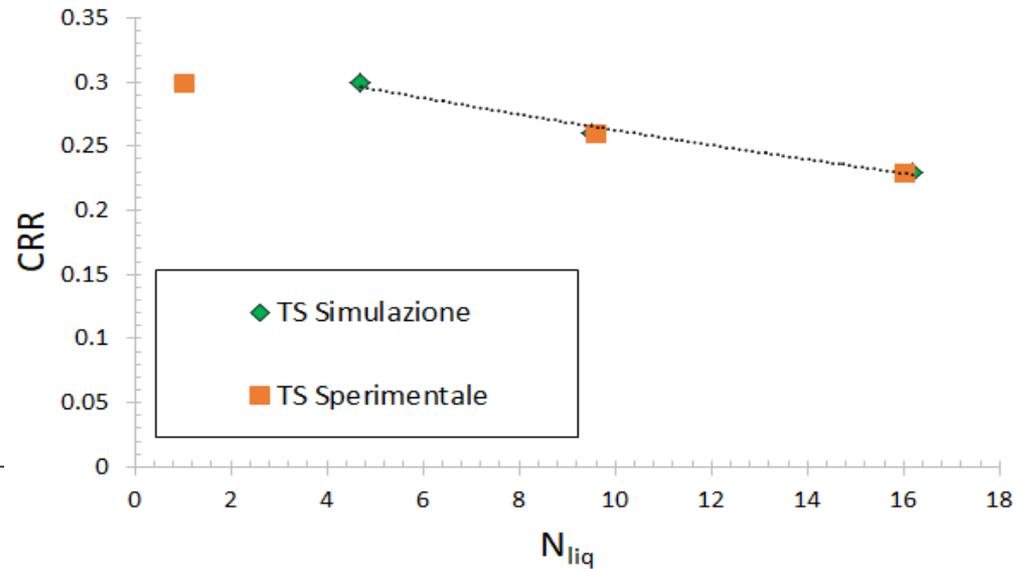
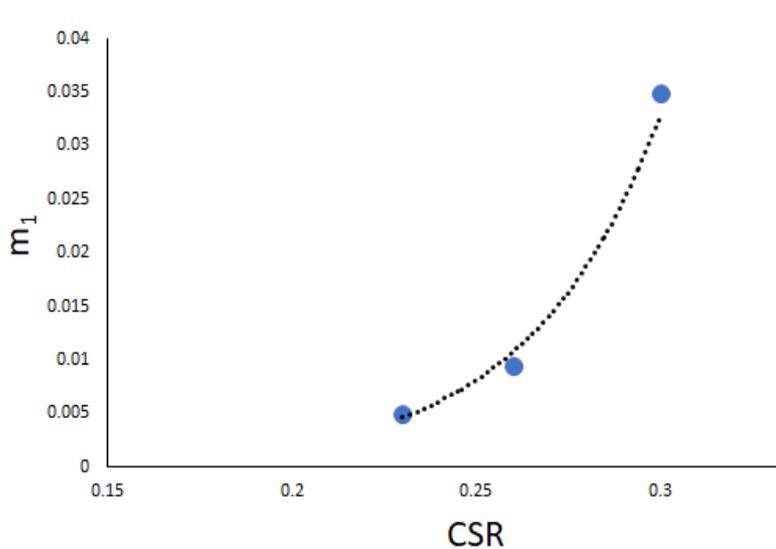
Il modello Cheng non riesce a simulare in maniera corretta la curva di resistenza ciclica

Sviluppo analisi numeriche

- 1. Teoria di base modello GSH
- 2. Parametri del modello e significato fisico
- 3. Calibrazione
- 4. Modifica del modello
- 5. Risultati

Modifica del modello

Rispetto ad un'argilla, la sabbia deve avere una Tg maggiore a causa della mobilità delle particelle che è tanto maggiore quanto maggiore è il carico applicato (CSR). Una relazione tra il parametro m_1 e CSR è stata individuata per la TS.



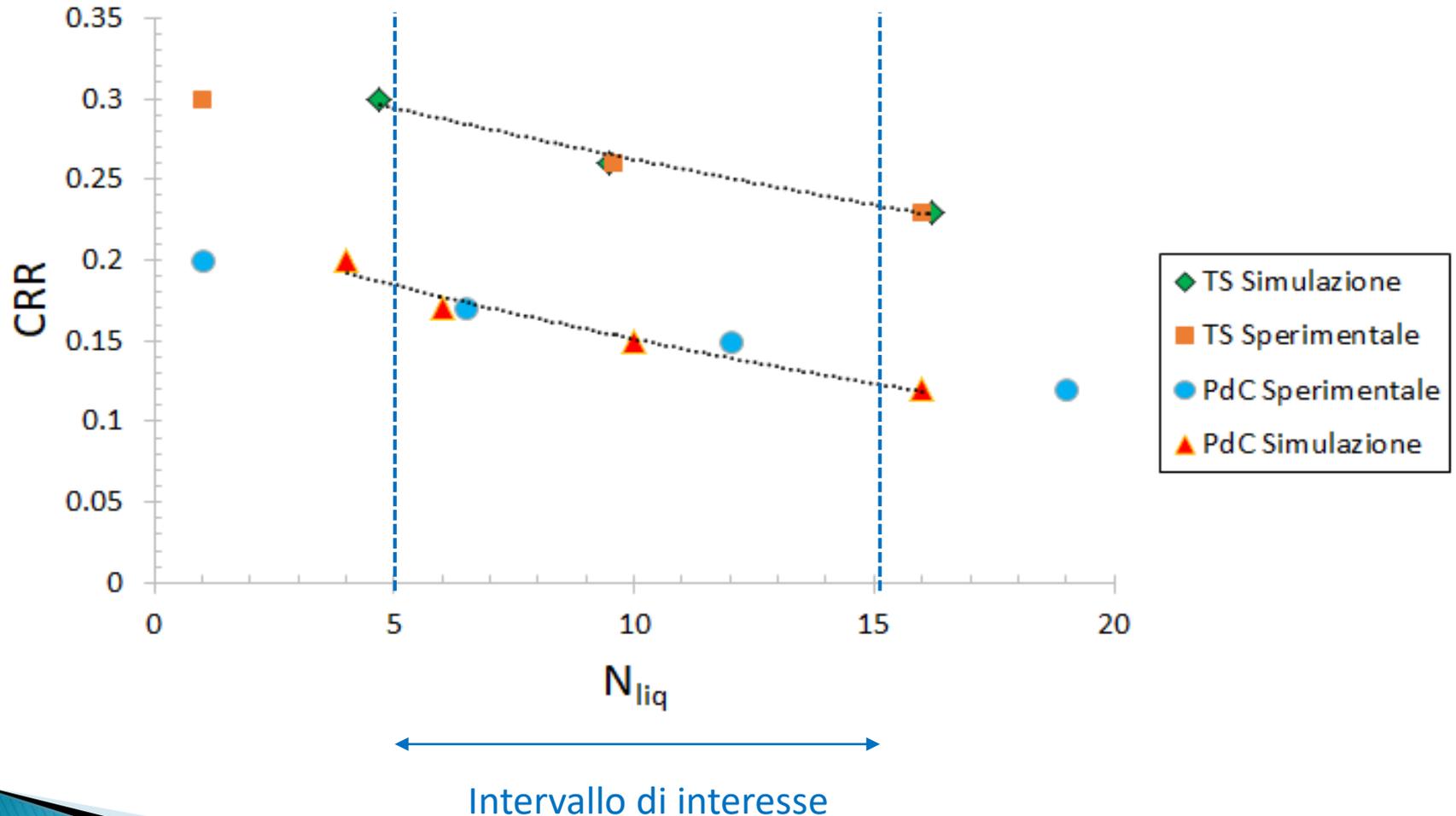
$$m_1 = 0.0001e^{26.15CSR}$$

Sviluppo analisi numeriche

- 1. Teoria di base modello GSH
- 2. Parametri del modello e significato fisico
- 3. Calibrazione
- 4. Modifica del modello
- 5. Risultati

Risultati

La funzione esponenziale individuata che lega il parametro m_1 al CSR è stata implementata nel listato. La curva di resistenza ciclica simulata per la sabbia di Pieve di Cento è di seguito riportata:

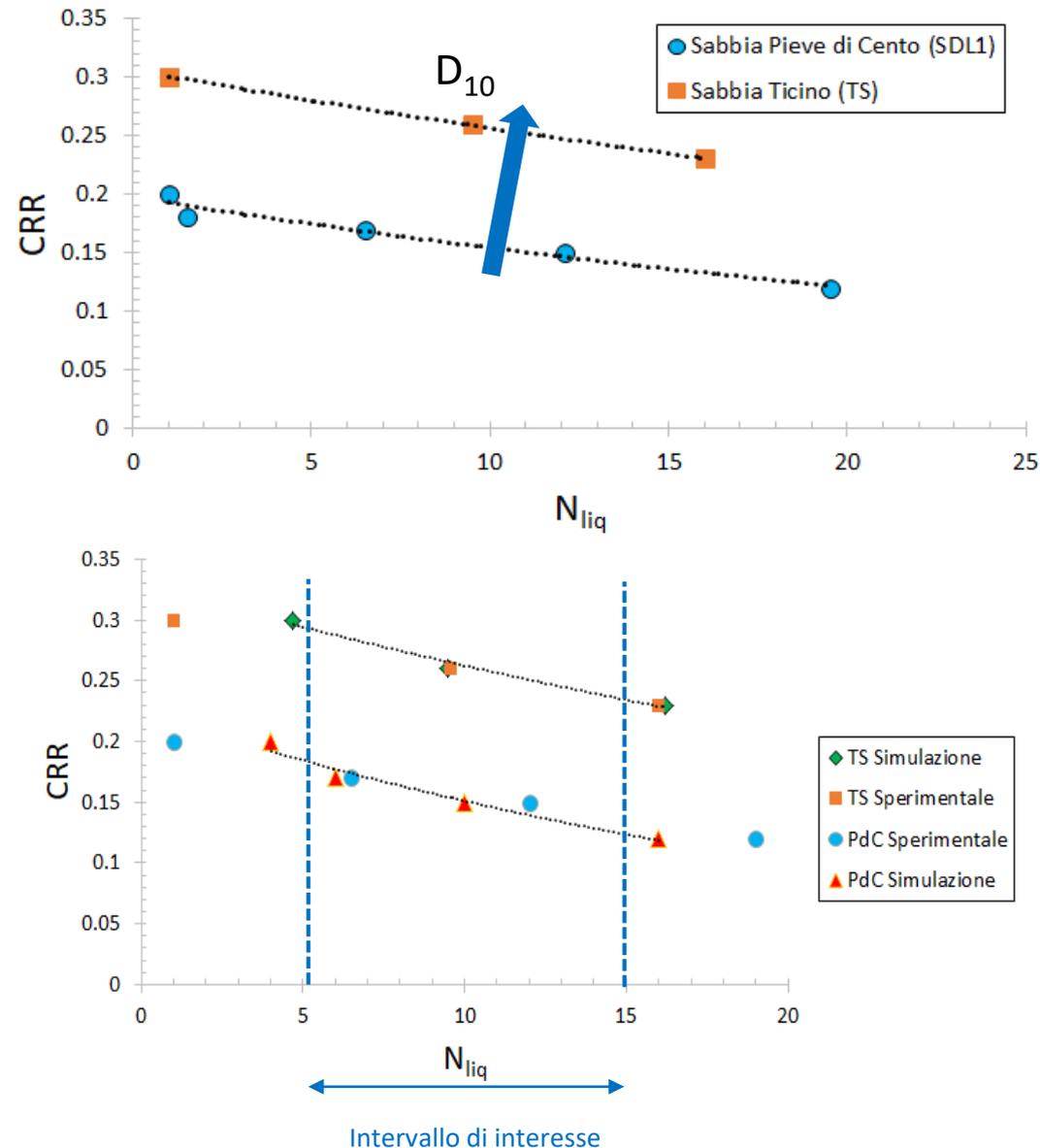


Sviluppo del lavoro di tesi

1. Introduzione
 2. Studio dei meccanismi di liquefazione
 3. Attività sperimentale al laboratorio DICEA
 4. Simulazione numerica dei risultati sperimentali
 5. Conclusioni
- 

Conclusioni

- ❖ La sabbia Pieve di Cento presenta una resistenza a liquefazione minore rispetto alla sabbia Ticino a causa della diversa distribuzione granulometrica.
- ❖ Il modello Cheng riesce a simulare adeguatamente le singole prove ma si hanno difficoltà a simulare le curva di resistenza ciclica (CRR- N_{liq}).
- ❖ La modifica introdotta consente di ottenere un risultato migliore nel piano CRR- N_{liq}



Grazie per
l'attenzione!!!

