



Università degli Studi di Padova
Dipartimento ICEA
Corso di Laurea in Ingegneria Civile – Geotecnica

Analisi dell'effetto di sollecitazioni cicliche nei materiali granulari con simulazioni DEM: il fenomeno del “ratcheting”

*Analysis of the cyclic stress-strain behaviour by means of DEM simulations:
the “ratcheting” phenomenon.*

Relatore: Prof. Fabio Gabrieli

Laureanda: Francesca Faedo

Matricola: 1020021

Anno Accademico 2012/2013

Indice

Indice	3
Introduzione	4
1. Spinta delle Terre	
1.1 <i>Introduzione</i>	6
1.2 <i>Il problema della spinta delle terre</i>	6
1.3 <i>Metodi risolutivi: metodo dell'analisi limite</i>	8
1.4 <i>Metodi risolutivi: metodo dell'equilibrio limite globale</i>	10
2. Ratcheting	
2.1 <i>Il ratcheting</i>	13
2.2 <i>Caratteristiche principali del ratcheting</i>	14
3. Casi di ratcheting	
3.1 <i>Deformazioni termiche</i>	18
3.2 <i>Carichi ciclici</i>	19
3.3 <i>Esempio di carico ciclico: pala eolica offshore</i>	20
4. Studio del fenomeno in laboratorio	
4.1 <i>Descrizione della prova</i>	23
4.2 <i>Risultati</i>	27
5. Il Discrete Element Method	
5.1 <i>Classificazione dei modelli particellari</i>	29
5.2 <i>Il metodo agli elementi discreti</i>	30
6. Risultati e commenti	
6.1 <i>Pre: l'analisi dei risultati</i>	33
6.2 <i>Spinte orizzontali</i>	35
6.2.1 Porosità	35
6.2.2 Periodo	40
6.2.3 Ampiezza	43
6.2.4 Raggio	46
6.3 <i>Cuneo di spinta</i>	49
6.3.1 Spinta passiva	49
6.3.2 Spinta attiva	51
6.3.3 Confronto	52
6.4 <i>Campo di spostamenti</i>	53
6.4.1 Il numero dei cicli	53
6.4.2 Il ratcheting al variare di porosità, periodo, ampiezza e raggio	56
6.4.2.a Porosità	56

6.4.2.b	Periodo	58
6.4.2.c	Ampiezza	60
6.4.2.d	Raggio	63
6.5	<i>Cedimento/sollevamento del piano campagna</i>	65
6.5.1	Porosità	66
6.5.2	Periodo	67
6.5.3	Ampiezza	67
6.5.4	Raggio	68
7.	Conclusioni e sviluppi futuri	70
	Bibliografia	75

Introduzione

Nella progettazione geotecnica e nella valutazione delle spinte che il terreno esercita su un'opera si fa spesso riferimento a teorie classiche come quella di Rankine o di Coulomb. Il comportamento del terreno è tipicamente desunto dai parametri di resistenza che lo caratterizzano al momento della costruzione. Si valuta poi il comportamento del sistema terreno-struttura in regimi sismici, ossia con carichi ciclici ad alte frequenze ed ampiezze, mantenendo tuttavia invariati i parametri meccanici di resistenza.

Spesso inoltre si tende a trascurare l'effetto di sollecitazioni cosiddette "a bassa frequenza"; ne fanno parte per esempio le dilatazioni termiche e alcune sollecitazioni meccaniche, come il traffico viario, il moto ondoso, il vento o la vibrazione causata da alcune macchine industriali. Queste forze esterne agiscono sul terreno attraverso le strutture che le veicolano. Il terreno granulare in particolare, è in grado di modificare la sua struttura interna e di raggiungere una configurazione adatta a sopportare tali sforzi; così, in seguito ad un numero elevato di cicli, varia nel all'aumentare dei cicli la sua risposta.

Quasi sempre all'interno del terreno è possibile identificare una zona statica che rimane tale anche in seguito alla sollecitazione ciclica, e una zona in cui invece inizia un rimescolamento continuo e costante di particelle. Il materiale tipicamente subisce una iniziale compattazione; questo provoca un aumento della spinta passiva. Ma se da un lato dimostra un aumento di resistenza, dall'altro diventa un mezzo più rigido e può quindi dare luogo a rotture fragili ed improvvise.

Da qui nasce l'importanza di indagare il fenomeno descritto, il ratcheting.

Il ratcheting è tipico ad esempio dei fondi marini sabbiosi sollecitati da forze orizzontali, e in generale di ogni terreno granulare che si ritrovi ad essere sollecitato da un numero elevato di cicli di carico e scarico. Per innescare questo fenomeno è necessario comunque che lo sforzo agente superi un valore di soglia.

In letteratura non esistono molti studi di questo genere: la maggior parte di questi sono esperimenti di laboratorio; la modellazione numerica invece è ancora in divenire. Spesso infatti si preferisce rappresentare il terreno come un solido continuo ma intuitivamente si capisce quanto questa schematizzazione non riesca a fornire risposte per questa tipologia di fenomeni che hanno una marcata dipendenza dalle condizioni micromeccaniche, che manifestano grandi spostamenti e scorrimenti cumulati e rotture localizzate multiple.

Un metodo (l'unico fino ad alcuni decenni fa) per indagare il comportamento di un materiale granulare sottoposto a ratcheting è ovviamente riprodurre in scala il problema da analizzare ed eseguire dei test in laboratorio. In questa tesi è riportato uno di questi esperimenti. Si tratta di un volume scatolare riempito di diversi tipi di materiale (sfere di vetro e sabbia dell'Adige), sollecitato da una parete che si muove ciclicamente comprimendo e

decomprimendo il materiale stesso. Vengono variate le ampiezze di movimento della parete, i materiali granulari e il carico in superficie.

Negli anni settanta nasce il metodo agli elementi discreti. Per la prima volta il suolo può così essere rappresentato da un insieme di particelle, bidimensionali (dischi) o tridimensionali (sfere), che interagiscono tra loro con leggi di contatto ad-hoc. Si tenta di spiegare il comportamento di un mezzo multi-body (il terreno) partendo dall'interazione, ben più conosciuta, di due sue piccole componenti (le sfere). Nonostante i numerosi progressi fatti in ambito tecnico-informatico (di software e di hardware), questo metodo presenta comunque ancora numerosi svantaggi, tra cui l'impossibilità di ricreare un numero di particelle elevato e la difficoltà fisica e numerica di descrivere le particelle con la loro forma reale.

La presente tesi utilizza appunto il metodo agli elementi discreti (DEM) rappresentando il materiale attraverso un numero sufficientemente grande di particelle perfettamente sferiche. Questa schematizzazione permette di confrontare i risultati delle simulazioni con alcuni esperimenti di laboratorio eseguiti con le sfere in vetro.

L'obiettivo è quello di valutare l'influenza di alcune variabili sul manifestarsi del ratcheting; si confrontano diverse prove tra loro, variando porosità, ampiezza di movimento della parete (legata all'entità della spinta orizzontale), dimensioni dei grani e infine periodo di movimento (ossia velocità di applicazione del carico).

Viene indagato il fenomeno all'aumentare del numero di cicli. Si analizzano i vari casi misurando le spinte orizzontali che agiscono sulla parete, i cedimenti del piano campagna all'aumentare dei cicli, e il campo di spostamento delle particelle nel corso dei cicli. Si cerca inoltre di localizzare quella parte di terreno interessata da ratcheting in caso di spinta attiva e passiva, che varia durante lo svolgimento della prova, e di analizzare il fenomeno da un punto di vista micromeccanico.

Nella parte finale si riportano in sintesi i risultati trovati e si cerca di spiegare il diverso peso delle variabili indagate.

1. Spinta delle Terre

1.1 Introduzione

La determinazione della spinta esercitata dal terreno contro un'opera di sostegno è un problema classico di ingegneria geotecnica che ad oggi viene affrontato utilizzando due teorie "storiche" opportunamente modificate e integrate alla luce del principio delle tensioni efficaci:

- la teoria di Rankine (1857)
- la teoria di Coulomb (1776).

Entrambe le teorie si basano sull'ipotesi dell'instaurarsi di superfici di scorrimento piane. Nella realtà a causa dell'attrito fra parete e terreno le reali superfici sono in parte curvilinee; i risultati che si ottengono applicando tali metodi, soprattutto per quanto riguarda le condizioni di spinta passiva, sono spesso non cautelativi.

In linea generale per quanto riguarda la spinta attiva si è in sicurezza nell'utilizzo del metodo di Rankine; la spinta passiva è meglio rappresentata dal metodo di Caquot e Kerisel (1948), il metodo più noto tra quelli sviluppati che prevedono una superficie di scorrimento curvilinea.

1.2 Il problema della spinta delle terre

Il problema della determinazione di sforzi e deformazioni nel terreno si avvale delle equazioni indefinite di equilibrio nello spazio e delle equazioni di congruenza e continuità.

Un terreno può infatti deformarsi con continuità, con deformazioni che variano uniformemente nel materiale o deformarsi con uno scorrimento. Generalmente si hanno entrambi i modi di deformazione, ma spesso uno dei due risulta predominante rispetto all'altro.

In molti casi la meccanica delle terre fa riferimento a due modelli costitutivi semplici che descrivono il comportamento tenso-deformativo del terreno.

Il primo modello considera il materiale elastico lineare (figura 1.1) per stati di sforzo lontani dalla rottura e si utilizza nei *problemi di deformazione*, cioè nella verifica agli stati limite di esercizio. Quindi serve per esempio per il calcolo dei cedimenti. Il grafico sottostante mostra il comportamento del modello elastico lineare nel piano tensione-deformazione.

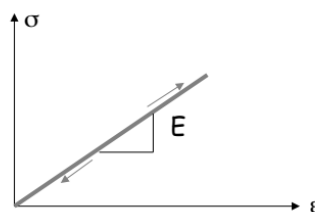


Figura 1. 1 Modello elastico lineare

Un mezzo elastico lineare è tale per cui le deformazioni prodotte da sollecitazioni esterne, ad

esse direttamente proporzionali (linearità), scompaiono una volta rimosse tali sollecitazioni (elasticità). Si possono usare ulteriori semplificazioni come l'ipotesi di materiale isotropo, ossia un materiale che manifesta le sue proprietà uguali in tutte le direzioni.

Il secondo modello considera il materiale rigido plastico (figura 1.2) con il limite di rottura governato dal criterio di Mohr-Coulomb ed è utilizzato nei *problemi di equilibrio limite*, cioè nella verifica agli stati limite ultimi. A questo modello si fa riferimento nel calcolo della capacità portante delle fondazioni e della stabilità dei muri di sostegno.

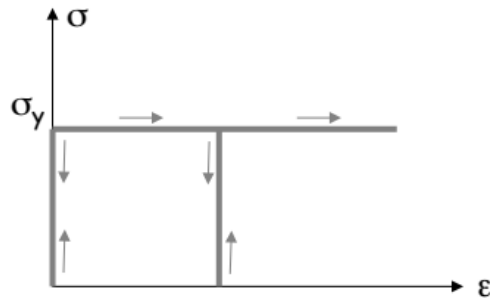


Figura 1. 2 Modello rigido- perfettamente plastico

Altri modelli costitutivi qui riportati sono in figura 1.3

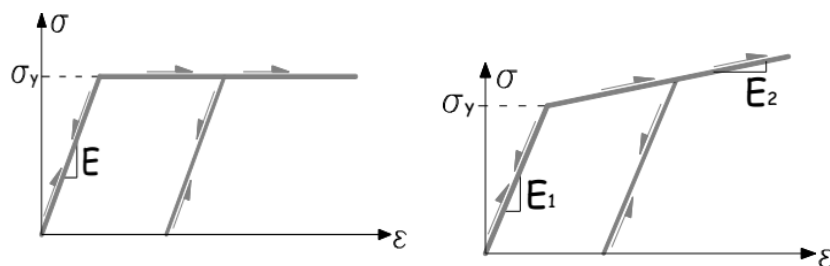


Figura 1. 3 Modello elastico-perfettamente plastico; modello elastico-plastico incrudente

La complessità della descrizione del comportamento tensio-deformativo di un terreno deriva da alcuni aspetti tipici di questo materiale:

- esiste un comportamento *non lineare* a piccole deformazioni;
- c'è una dipendenza dal *percorso di carico* seguito, e quindi dalla sua storia geologica e dalla metodologia e dalle lavorazioni subite per realizzare un'opera
- l'attrito è influenzato dalla densità del materiale, e anche dalla tensione normale;
- esiste una dipendenza dalle variabili temperatura, velocità di carico, indice di saturazione; abbiamo un diverso comportamento tra le condizioni drenate (aumento di volume) e le condizioni non drenate (aumento della pressione neutra);
- il mezzo è anisotropo;

Utilizzare l'uno o l'altro modello costitutivo rappresenta una semplificazione spesso necessaria al raggiungimento di una soluzione al problema ingegneristico.

In effetti una così drastica semplificazione del comportamento del terreno porta si a risolvere alcuni problemi della geotecnica; d'altro lato però può portare a delle contraddizioni. Ad

esempio nel determinare la distribuzione di uno stato di sforzo al di sotto di una fondazione (e quindi i suoi cedimenti) si considera modulo elastico costante. Nella realtà però se si va a determinare attraverso prove edometriche questo parametro si ottiene che il comportamento del terreno non è lineare ed elastico.

La descrizione del comportamento dei terreni quindi mette in evidenza che la teoria elastica non è sufficiente a descrivere il comportamento reale delle terre: essa, infatti, consente di descriverne il comportamento effettivo soltanto *entro limiti ristretti*, finalizzati a talune applicazioni e talvolta limitati a materiali specifici. In particolare, tale teoria non prevede il destarsi di quelle deformazioni permanenti che si evidenziano con le diverse prove sperimentali sui terreni condotte *fino alla rottura*. La descrizione di questo comportamento è compito della teoria della plasticità.

I metodi disponibili per la risoluzione dell'analisi della stabilità di un'opera sono principalmente due e sono illustrati nel paragrafo successivo.

1.3 Metodi risolutivi: metodi dell'analisi limite

Il metodo dell'analisi limite consente di determinare un intervallo di valori del carico di collasso di una struttura, ricercando rispettivamente con un metodo statico ed uno cinematico il limite superiore ed il limite inferiore. E' basato su due teoremi:

- 1) teorema del limite inferiore¹;
- 2) teorema del limite superiore²;

La determinazione del carico al collasso (comprese le forze di massa) è un'operazione molto complessa, per questo vengono in aiuto i teoremi della plasticità che possono essere utilizzati per determinare il limite inferiore e superiore del reale carico al collasso.

Il metodo è applicabile se il materiale è elastico perfettamente plastico (figura 1.3 a sinistra).

Il materiale ha un legame lineare fino ad un certo limite, in cui si sviluppano solo deformazioni elastiche (e quindi reversibili); oltre questo limite si ha scorrimento o deformazione indefinita a tensioni costanti. Oltre la ϵ_{lim} si ha quindi il cosiddetto *collasso plastico*: una parte scivola relativamente alla parte restante dell'ammasso di terreno.

Riguardo il teorema del limite inferiore si considera il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

La resistenza limite per un materiale granulare è data sul piano di Mohr da una retta di equazione $\tau = \sigma \tan \phi'$ con pendenza ϕ' (angolo di attrito del materiale considerato), ipotizzando in questo caso un materiale granulare senza coesione $c=0$.

¹ **Teorema del limite inferiore:** se esiste un sistema di carichi esterni in equilibrio con una distribuzione di sforzi interni tale che in nessuno punto viene violato il criterio di resistenza del materiale allora il collasso non si verifica e il sistema dei carichi esterni risulta non maggiore del vero carico di collasso (non verifico la congruenza)

² **Teorema del limite superiore:** se esiste un meccanismo di collasso plastico tale che il lavoro degli sforzi esterni coincide con quello degli sforzi interni allora si verifica il collasso e il sistema dei carichi esterni risulta non minore del carico di collasso (non verifico l'equilibrio)

Tale retta e la sua simmetrica rispetto l'asse σ individuano 3 regioni: una all'interno delle due rette che individua stati tensionale del terreno possibili e due all'esterno delle due rette che individuano stati tensionali del terreno impossibili (figura 1.4).

La resistenza a rottura si raggiunge quando il cerchio di Mohr, che individua lo stato tensionale dell'elemento considerato all'interno del mio terreno, è tangente alla retta limite.

Quindi la condizione di tangenza è la condizione di rottura; noto il polo del cerchio di Mohr è possibile ricavare le direzioni principali delle tensioni all'interno del terreno e trovare le inclinazioni dei piani su cui avviene la rottura.

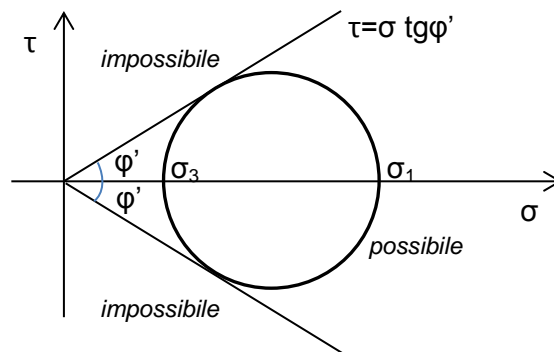


Figura 1. 4 Stati tensionali e rette di rottura

Teoria di Rankine (1857)

La teoria di Rankine considera lo stato tensionale di una massa di terreno in condizioni di equilibrio limite ovvero al momento della rottura. La teoria soddisfa la soluzione del teorema di plasticità del limite inferiore.

Il terreno secondo le ipotesi di Rankine è omogeneo ed isotropo e le tensioni in esso agenti sono ipotizzate *tensioni principali*; queste risultano legate dal parametro k_0 secondo la legge $\sigma'_h = k_0 \sigma'_v$.

Il termine k_0 è legato all'angolo di attrito del terreno ϕ e alla sua storia tensionale (OCR), rappresentativo del comportamento a rottura del terreno. Questo se il terreno risulta a riposo. Rankine dimostra, attraverso un esperimento, che esiste un valore limite per cui il terreno raggiunge l'equilibrio limite; vengono individuate due superfici di rottura coniugate, in stato attivo e passivo.

I criteri di rottura suggeriti da Rankine sono:

- in condizioni drenate

$$\sigma'_{h,a} = k_a \sigma'_v - 2c' \sqrt{k_a}$$

$$\sigma'_{h,p} = k_p \sigma'_v + 2c' \sqrt{k_p}$$

- in condizioni non drenate

$$\sigma_{h,a} = \sigma_v - 2Cu$$

$$\sigma_{h,p} = \sigma_v + 2Cu$$

Nasce però la necessità di operare una netta distinzione tra caso attivo e passivo per diverse motivazioni: primo, il valore di spostamento da maturare per mobilitare la spinta attiva è di molto minore a quello per la spinta passiva. Inoltre la spinta passiva può essere vista come una “resistenza” interna del terreno, mentre la spinta attiva è sollecitante.

Inoltre il fatto che per Rankine le tensioni iniziali debbano risultare principali è una limitazione nell'utilizzo del metodo. Basta infatti aggiungere dell'attrito terreno-muro per far sì che si creino delle tensioni tangenziali che invalidano questa ipotesi.

1.4 Metodi risolutivi: metodo dell'equilibrio limite globale

Il metodo dell'equilibrio limite globale proprio perché risolve il problema attraverso l'utilizzo di un'equazione di equilibrio che tiene conto di tutte le forze.

Individua una superficie di scorrimento più critica, assume una distribuzione di tensioni su tale superficie e risolve il problema mediante un'equazione di equilibrio globale del terreno considerato come corpo rigido al di sopra della superficie considerata.

Teoria di Coulomb (1776)

Coulomb, a differenza di Rankine, tiene conto delle forze tangenziali che si sviluppano lungo il cuneo di spinta e nel contatto terreno/muro, attraverso un equilibrio di forze agenti.

Il terreno è ipotizzato omogeneo, incoerente e asciutto. Si avrà:

- resistenza al taglio (valutata secondo Mohr Coulomb) costante,
- parete verticale e *superficie di scorrimento piana*
- terrapieno delimitato da una superficie inclinata di un angolo β sull'orizzontale
- parete del muro inclinata di un angolo λ rispetto la verticale.

In condizione di equilibrio limite attivo, le forze che agiscono sul cuneo sono: il peso proprio W , la risultante R delle tensioni normali e tangenziali sulla superficie di scorrimento (che è inclinata di un angolo ϕ' rispetto alla normale alla superficie di rottura) del cuneo e la spinta attiva S_a del terreno (che agisce inclinata di δ , angolo di attrito terra-muro, rispetto alla perpendicolare al cuneo).

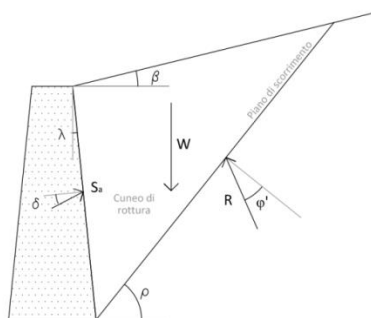


Figura 1. 5 Spinta secondo la teoria di Coulomb

Si vuole ottenere la spinta attiva massima. Per questo si riscrive la spinta attiva in funzione del peso e delle grandezze geometriche del problema. Imponendo $dS_a/d\rho = 0$ si ottiene:

$$S_a = \frac{1}{2} K_{a,c} \gamma_t H^2$$

dove

$$K_{a,c} = (\cos^2(\varphi' - \lambda)) [\cos^2 \lambda \cos(\lambda + \delta) \left(1 + \frac{\sin(\delta + \varphi') \sin(\varphi' - \beta)}{(\cos(\lambda + \delta) \cos(\lambda - \beta))^{(1/2)}}\right)^{(-1)}]$$

Considerando $\delta=0$ e superficie piana e infinitamente estesa ($\beta=0$), la soluzione coincide con quella ottenuta da Rankine.

Si nota però che per quanto riguarda la spinta attiva, le teorie danno circa gli stessi risultati; nel campo passivo però, Coulomb da dei valori molto più alti di spinta. Questo è il risultato dell'assunzione di una superficie planare; infatti, per angolo ρ minori, risulta che il cuneo di spinta da spostare è un volume molto elevato. Ciò comporta ad assumere un valore di resistenza (spinta passiva) molto più alto della realtà.

Nella realtà quindi le superfici di rottura sono curve; nascono metodo per rappresentare al meglio questo aspetto, tra cui quello che segue.

Teoria di Caquot Kerisel (1948)

Kerisel e Caquotte ipotizzano una superficie di rottura a forma di spirale logaritmica, descritta da un angolo di attrito noto a priori e da un raggio vettore (figura 1.6).

Vengono tabulati i valori di K_p e K_a in funzione dell'inclinazione del paramento e dell'angolo di attrito. Si è dimostrato come questo metodo sia il più realistico per descrivere la spinta passiva.

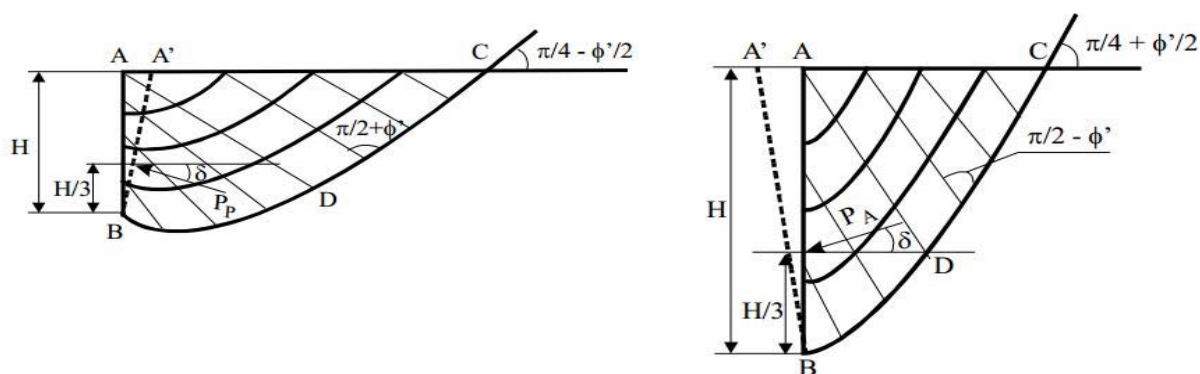


Figura 1. 6 Spinta passiva e attiva: superfici di scorrimento logaritmiche

Una delle tabelle cui si può fare riferimento per calcolare i coefficienti k_a e k_p è in figura 1.7. Permette di tenere conto dell'angolo di inclinazione del muro, dell'inclinazione del terrapieno, dell'angolo di attrito del terreno.

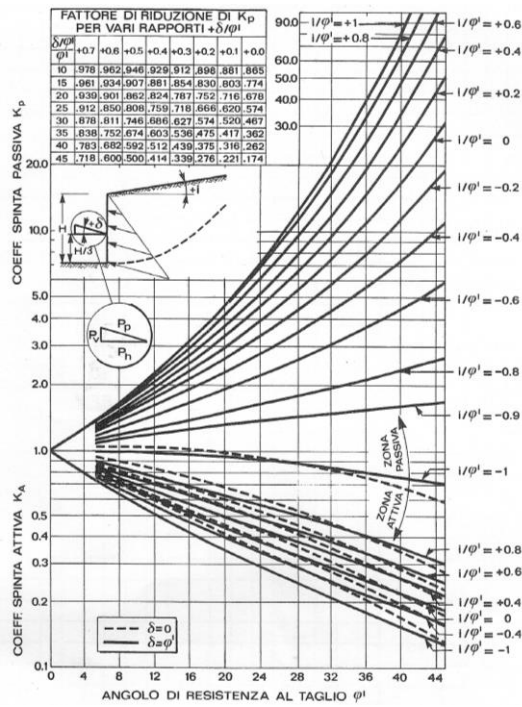


Figura 1. 7 Abaco di Navfac (1971) per inclinazioni della parete del muro $\alpha=90^\circ$

Le precedenti teorie sono affiancate dalla teoria di Mononobe-Okabe, che studia l'equilibrio di un cono di terreno in condizioni sismiche. E' basata dalla teoria di Coulom e ricava la spinta attiva dall'utilizzo del poligono delle forze presenti nel sistema. In questo lavoro non viene riportata.

2. Ratcheting

2.1 Il ratcheting

La parola ratcheting deriva da “ratchet” (rocchetto), un semplice dispositivo, come quello montato sulla ruota posteriore della bicicletta, che permette la rotazione del pignone in un solo verso. Una applicazione termodinamica ideale del fenomeno del ratcheting è stata descritta nel corso universitario di fisica del professor Feynman, pubblicato in più volumi nel 1964 (figura 2.1).

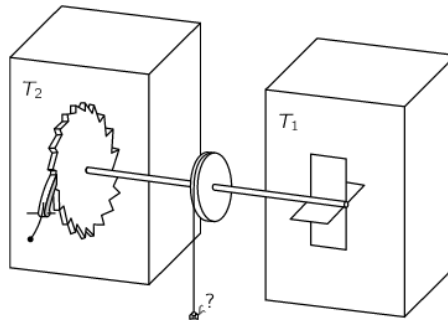


Figura 2. 1 Il dispositivo del ratcheting, per Feynman

All'interno di T_1 veniva posto un gas; le particelle urtavano contro la pala in modo disordinato. La caratteristica principale era che solo gli urti in una direzione facevano ruotare la pala. Questa era infatti fissata ad un albero che all'altra estremità presentava una ruota dentata, in grado di muoversi in una sola direzione, il rocchetto appunto.

Questo dispositivo è stato studiato inizialmente perché pareva fornire un metodo per estrarre lavoro dal disordine interno di un gas. Inoltre è considerato da molti come il fenomeno che regola molti movimenti biologici, come ad esempio la contrazione dei muscoli.

L'analogia con un terreno granulare deriva dal fatto che anche questo può maturare delle deformazioni permanenti (proseguimento dei denti della ruota) se soggetto a carichi ciclici di una certa entità (sollecitazioni delle molecole di gas).

Il fenomeno del ratcheting viene quindi definito da un “graduale accumulo di deformazioni permanenti in materiale granulare soggetto a carichi ciclici” (A. Marroquìn, 2004).

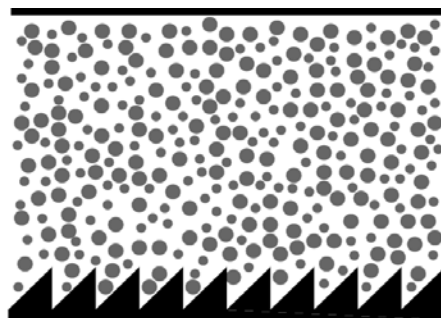


Figura 2. 2 Esperimento che studia il flusso di materiale provocato dal movimento oscillatorio verticale della base dentata. In questo caso la base si muove secondo una legge sinusoidale (non nel nostro caso)

In seguito è stato fatto anche un esperimento riguardante dei terreni granulari (figura 2.2). È stato dimostrato che un terreno granulare soggetto ad una vibrazione verticale per mezzo di

una base asimmetrica dentata manifesta deformazioni cumulate. Questo è dovuto dall'asimmetria dei denti che sconvolgono la simmetria delle forze di contatto. Il materiale è soggetto a delle spinte orizzontali che danno origine al trasporto del materiale. Si crea così un flusso convettivo caratteristico del ratcheting.

Nella realtà non è detto però che tutti i carichi ciclici portino al ratcheting.

Dalla teoria classica di *Drucker-Prager*³ riguardo l'elasto plasticità del materiale deriva infatti la *Shakedown Theory*. Un materiale granulare matura deformazioni plastiche sotto carichi ciclici solo se la magnitudine dei carichi applicati supera un valore limite, chiamato appunto *plastic shakedown limit (PSL)*.

Secondo questa teoria la risposta di un materiale granulare si suddivide in quattro categorie:

- 1) *elastica*; per bassi livelli di carico, non ho deformazioni permanenti
- 2) *elastic shakedown*; il carico è di poco inferiore al PSL. La risposta del materiale è plastica per un numero finito di cicli ma l'ultima del materiale è comunque elastica.
- 3) *plastic shakedown*: il carico è un po' più basso di quello necessario per generare ratcheting ma superiore al PSL. L'accumulo di deformazione si assesta dopo un numero finito di cicli; ho quindi un adattamento plastico del materiale.
- 4) *ratcheting*: in questo caso il carico applicato è relativamente grande. Vengono accumulate in poco tempo delle deformazioni permanenti che possono portare ad un collasso rapido.

Il caso analizzato in questa tesi è ovviamente il quarto.

2.2 Caratteristiche principali del ratcheting

Transitional Boundary Surface.

Un materiale granulare sollecitato dallo spostamento orizzontale di un muro può arrivare a rottura in due stati limite: attiva, nel caso venga decompresso, o passiva, per compressione.

Il volume di terreno coinvolto nell'uno e nell'altro caso è differente. In entrambi i casi però è possibile definire una superficie attiva o passiva che delinea appunto il terreno sollecitato (vicino al muro) e il terreno inattivo (lontano dal muro).

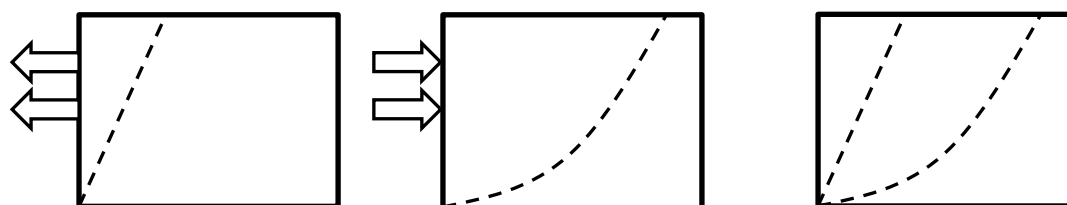


Figura 2. 3 Superfici di rottura: in spinta attiva, passiva e zona delle TBS

³ *Teoria Drucker-Prager*: postula l'esistenza di una regione di spazio tensionale dove sono possibili solo deformazioni elastiche; assunzione non valida per carichi ciclici che non mostrano una distinzione così netta.

Durante una sollecitazione ciclica di carico e scarico però si ha il passaggio dall'una all'altra condizione di spinta.

E' ancora possibile individuare una superficie che divide la zona caricata da quella scarica; questa superficie però varierà nel tempo e sarà chiamata *superficie di transizione* (TBS). Sarà compresa tra quella attiva e quella passiva. In fase di spinta passiva grani caricati per primi saranno quelli a contatto con la parete. La TBS si allontanerà gradualmente dal muro coincidente con la superficie di spinta passiva nella fase 2.

Nella fase di passaggio tra spinta passiva ad attiva invece la TBS si avvicinerà al muro fino a diventare superficie di spinta attiva. In questo caso le particelle scaricate per prime saranno quelle vicine al muro.

La sollecitazione ciclica presenta quindi un continuo passaggio dall'una all'altra spinta

Flusso convettivo di materiale

Il tipo di sollecitazione analizzata in queste prove crea all'interno del provino un flusso convettivo pulsante. Le particelle vicino alla parete scorrono verso il basso, quelle alla base vengono spinte lontane dalla parete e appena a monte del muro mobile i grani risalgono verso l'alto. Tutto questo si manifesta in una zona di ampiezza pari a circa l'altezza del provino.

Il flusso circolare viene spiegato nell'articolo *Towards the Design of Soil Loading For Integral Bridges* attraverso l'utilizzo di un modello "a tre elementi". La chiave del fenomeno sta nel movimento continuo della TBS e nel cambiamento del coefficiente $k = \sigma_v / \sigma_h$.

Si chiama A elemento vicino alla parete; C sarà invece più lontano.

Da un iniziale ed omogeneo k a riposo si arriva in fase attiva; in questa situazione $k_A < k_C$ in quanto la zona A è la prima ad essere scaricata. L'elemento A sarà sollecitato da una tensione verticale minore rispetto al C. Si deformerà assunto forma schiacciata. L'elemento C invece si allunga verso l'alto dato che la sua tensione verticale è diminuita (figura 2.4).

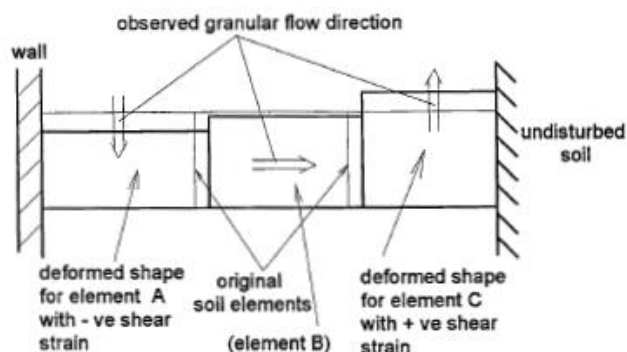


Figura 2. 4 Rappresentazione delle deformazioni all'interno del modello "a tre elementi"

Un continuo carico/scarico causa una variazione continua del volume degli "elementi" A e C che non sono nient'altro che zone del provino; questo fenomeno è facilmente visibile nelle immagini riportate nella parte 5.3.

All'interno di questi elementi si hanno particelle che all'aumentare del numero di sollecitazioni continuano a maturare spostamenti irreversibili. Questi spostamenti si traducono appunto nella variazione di volume degli elementi.

Gli spostamenti sfociano in un flusso circolare, ben visibile, che avviene sempre in direzione della maggior tensione principale. In figura 2.5 viene riportato un esempio di flusso fotografato in un istante delle prove svolte.

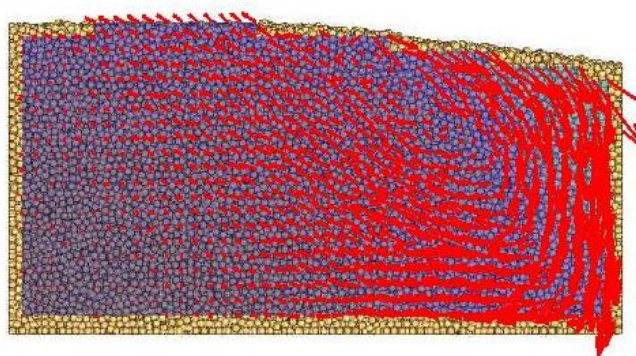


Figura 2. 5 Esempio di flusso convettivo di particelle di raggio $r=10\text{mm}$

Addensamento e sollevamento del piano campagna

E' importante dire che un materiale soggetto a carichi ciclici di entità tali da far entrare in gioco il ratcheting all'inizio presenta un addensamento finchè non raggiunge uno stato stazionario; in seguito la tensione all'interno del terreno rimane costante ma il ratcheting continua (figura 2.8, cicli 25-50) e con esso il flusso di materiale.

Inizialmente la posizione delle particelle nel modello è del tutto casuale ed è dettata dal parametro imposto di porosità. Dopo alcuni cicli iniziali il materiale inizia ad organizzarsi e si possono osservare nuclei di particelle "cristallini", che costituiscono zone a più bassa porosità. Questi nuclei all'aumento del numero di cicli aumentano di dimensione interessando una porzione di materiale sempre maggiore.

Il risultato è un materiale che registra un aumento di resistenza grazie alla compattazione (figura 2.6).

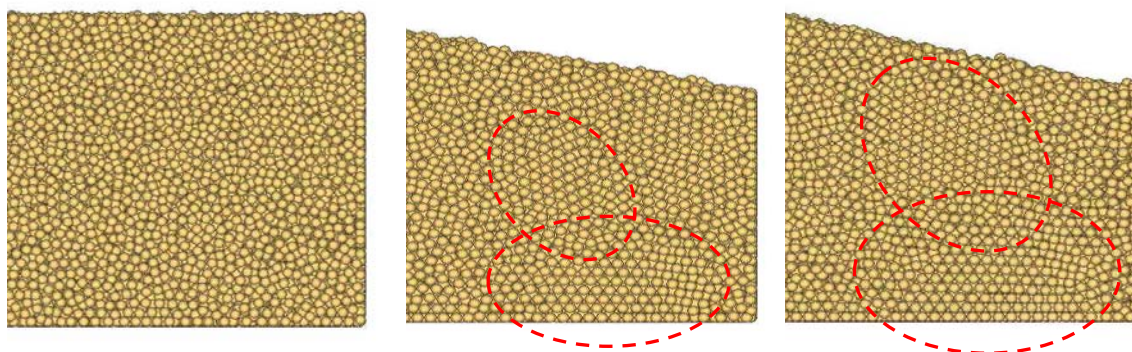


Figura 2. 6 Addensamento; cicli 1-25-50

In concomitanza con il realizzarsi del ratcheting, ad una distanza pari all'altezza del provino circa, il piano campagna risulta sollevarsi. Questo fatto trova una spiegazione nella variazione del volume spiegata sopra. La variazione dei volumi all'interno del provino provoca il flusso; il nuovo materiale che giunge dal basso verso l'alto spinge i grani soprastanti e questo si traduce in un sollevamento del terreno (figure 2.7 e 2.8).



Figura 2. 7 Particelle che “spingono” verso l’alto il piano campagna

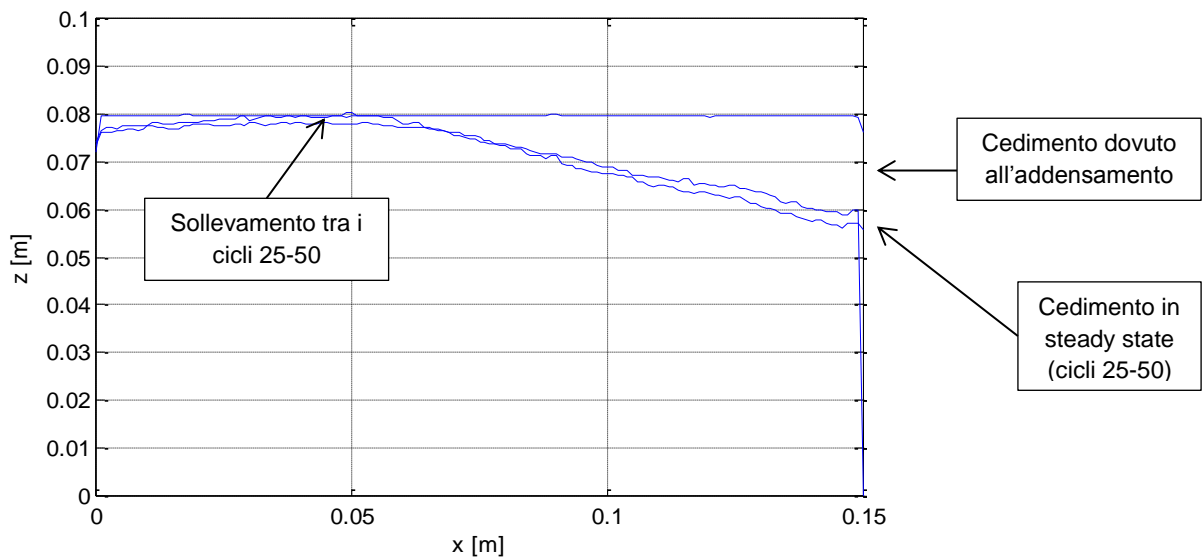


Figura 2. 8 Andamento del piano campagna per i cicli 1-25-50

3. Casi di Ratcheting

Il ratcheting si manifesta nei terreni qualora questi vengano interessati da sollecitazioni cicliche di una certa ampiezza.

Nel campo della progettazione queste situazioni si verificano quando si hanno deformazioni termiche, sollecitazioni meccaniche e/o variazioni di carichi agenti sulla struttura.

3.1 Deformazioni termiche

Nel primo caso si parla di scavi sostenuti (ad esempio con l'ausilio di puntelli o solai) ed in generale opere sotterranee o semisotterranee; nel primo caso l'elemento orizzontale è soggetto a variazioni termiche giornaliere che di solito non sono di grande entità. Qualora queste però superino un valore limite, si innesca il ratcheting nei terreni laterali. Nel secondo caso si parla ad esempio di ponti o strutture scatolari realizzate in calcestruzzo. Le dilatazioni termiche saranno tanto maggiori quanto sarà la luce del ponte (figura 3.1).

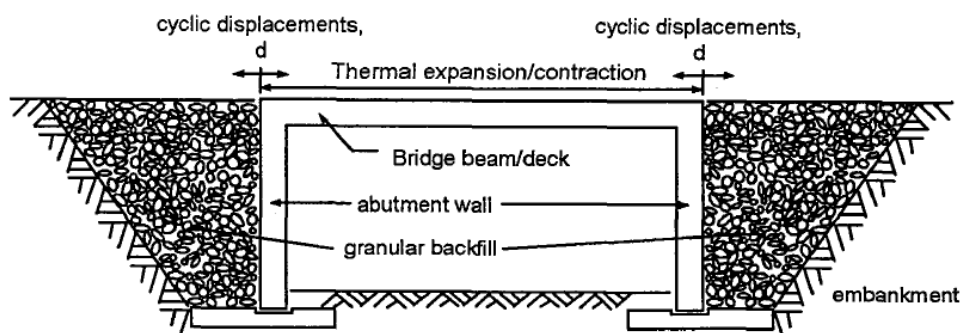


Figura 3. 1 Ponti scatolari in cemento armato; la dilatazione riguarda la trave orizzontale

Un esempio classico di cedimenti dovuti alle dilatazione termiche è la torre di Pisa.

La torre non presenta asse costante ma lievemente curvo, con concavità rivolta verso nord. Questa particolarità è dovuta al fatto che la sua costruzione è avvenuta dilazionata nel tempo. Infatti i lavori sono interrotti per un secolo. Alla ripresa della costruzione si era già verificata una variazione di inclinazione che si cercò di correggere attraverso la correzione dell'asse (l'inclinazione attuale è di $5,5^\circ$, figura 3.2).

Un'inclinazione crea però un'eccentricità del carico sul piano di fondazione di circa 2,3m.

La pendenza aumenta ogni anno di 7 secondi d'arco; in realtà l'andamento dell'inclinazione è oscillatorio (figura 3.3); è la somma di numerose variazioni dell'asse a causa dell'insolazione esterna della torre. Durante questi cicli la torre matura una deformazione permanente cumulata che si manifesta appunto con la variazione annuale di pendenza.

Si è dimostrato che queste variazioni di inclinazione, dovute a movimenti ciclici diurni e stagionali, sono legate sia alla deformazione della struttura di elevazione, sia alla rotazione della fondazione e, quindi, a deformazioni cicliche dei terreni di fondazione. Ben il 30% delle rotazioni periodiche dipende da deformazioni dei terreni, il restante da distorsioni della

struttura muraria. Se ne deduce che il terreno di fondazione della torre è soggetto a cicli di tensione e deformazione di ampiezza assai modesta, ma che, ripetuti un gran numero di volte, diventano un fattore importante per la progressiva inclinazione della torre.

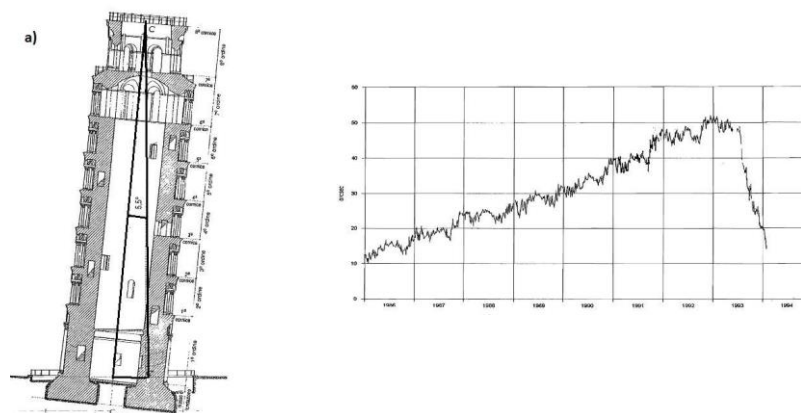


Figura 3. 9 Inclinazione della torre di Pisa e variazione annuale ciclica della pendenza della torre

3.2 Carichi ciclici

Un altro caso particolare di sollecitazione ciclica che può indurre al ratcheting è ad esempio il passaggio del traffico ferroviario.

I materiali previsti nella costruzione di sottofondo stradale o ferroviario sono granulari, grazie alle ottime caratteristiche meccaniche e di resistenza. A causa del passaggio continuo di convogli ferroviari il terreno sottostante può maturare deformazioni cumulate che si traducono in cedimenti.

Questi portano alla diminuzione dell'efficienza della struttura, oltre alla necessità di continua manutenzione e all'aumento dei costi della struttura.

Anche il traffico turistico può provocare ratcheting. E' il caso della città di Petra, in Giordania; infatti classificata da un recente sondaggio tra 100 milioni di persone una delle Sette Meraviglie del Mondo, è stata interessata da un notevole aumento di turismo. Questo flusso ha sortito l'effetto descritto dall'esperimento in figura 2.2, minacciando l'integrità del sito archeologico.

Quando la struttura che si voglia realizzare è soggetta a notevoli carichi orizzontale si preferisce ad una fondazione superficiale una fondazione su pali. Se questa struttura viene sollecitata da carichi caratterizzati da una ciclicità più o meno regolare come il vento, scaricherà al terreno degli sforzi non costanti nel tempo.

3.3 Esempio di carico ciclico: pala eolica offshore

Un caso particolare di variazione della configurazione dei carichi su di una struttura è il caso di una pala eolica soggetta alla sollecitazione data dal vento. La situazione può essere resa ancora più pericolosa dalla presenza di un moto ondoso che insiste su di una pala offshore.

Come già detto il fenomeno analizzato nasce in seguito alla sollecitazione ciclica dei carichi che gravano sulla struttura.

Un esempio di struttura soggetta a questo tipo di carichi è rappresentato dalle pale eoliche offshore. Sono strutture molto grandi, possono arrivare a 8m di diametro con 30m di ammorsamento nel terreno. Le grandi dimensioni sono dettate dalla configurazione dell'ambiente in cui andranno poste; saranno soggette ad alti carichi orizzontali che creano un momento flettente. In aggiunta si ha un altissimo numero di cicli di scarico e carico ad opera del vento e del moto ondoso (nell'ordine di 10^9 cicli) (figura 3.4).

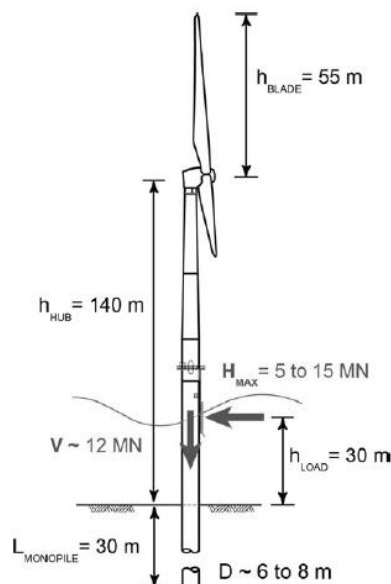


Figura 3. 4 Dimensioni di una pala eolica off-shore

Per ricercare l'interazione tra il palo di fondazione della pala e il terreno sabbioso saturo è stato fatto un esperimento in 2 diverse scale; ad un palo di alluminio inserito in sabbia viene applicato uno sforzo orizzontale che varia ciclicamente (figura 3.5).

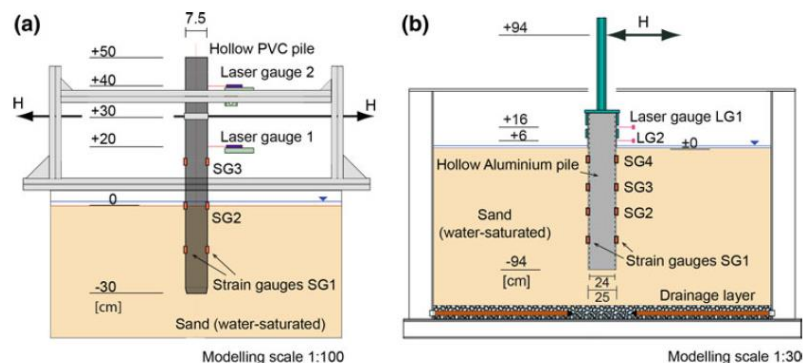


Figura 3. 5 Esperimento eseguito da P.Cuellar, S. Georgi, M. Baebler, W. Rucker

L'esperienza nasce per supplire alla mancanza di letteratura riguardante il caso in cui si abbia un altissimo numero di cicli di carico e scarico sulla struttura.

Si nota la formazione di una superficie di transizione che individua due diversi domini di suolo: uno interessato dal flusso convettivo e l'altro inattivo (figura 3.6).

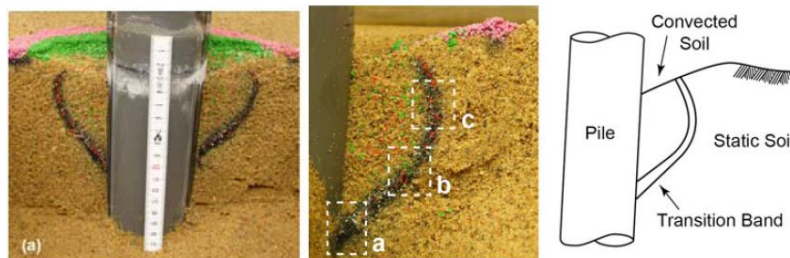


Figura 3. 6 Distinzione tra terreno attivo (interessato dal flusso) e integro

Tra i principali risultati si è notato (come in nel caso analizzato da questa tesi) la formazione di una zona di subsidenza. Questa ha forma specifica a cono con base perfettamente circolare (figura), di diametro $3D$; questo suggerisce l'esistenza di una tendenza del materiale a ridisporsi lungo una superficie non piana.

Il cedimento del terreno è causato dalla densificazione del materiale. Viene anche dimostrato che l'addensamento non è infinito all'aumentare dei cicli; dopo un numero di cicli (tra $N=10^4$ e $N=10^5$) il materiale ha raggiunto il massimo addensamento. A questo punto la percentuale di vuoti presenti nel terreno non dipende più dalle caratteristiche del carico. Questo comportamento è confermato dal fatto che il momento che si misura al di sotto della pala (nello strato superiore del terreno) diminuisce all'aumentare dei cicli, in seguito ad una aumentata capacità di resistenza acquisita.

In questa tesi il terreno dimostra di essere in fase di addensamento (numero ridotto di cicli).

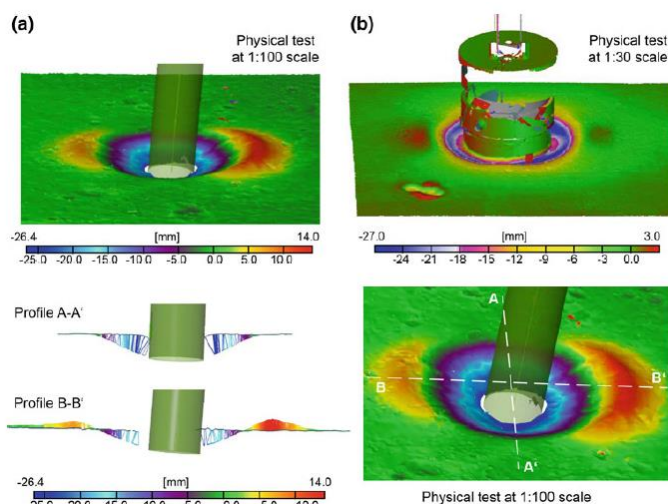


Figura 3. 7 Zona di subsidenza nell'intorno del palo di fondazione

Grazie all'utilizzo di grani colorati (marcatori) si è registrato un flusso iniziale più veloce che poi si assesta attorno a valori medi; il palo funziona come "calamita" e attrae i grani del materiale. I movimenti convettivi continuano senza una fine, all'inizio in modo più marcato.

Dopo un numero di cicli iniziali il flusso continua, ma si stabilizza a velocità regolare, raggiungendo uno “steady-state”.

Interessante riportare che in questo esperimento è stato osservato un flusso di materiale radiale, anche in direzione perpendicolare al carico. Il movimento convettivo è dimostrato anche dal fatto che dopo un alto numero di cicli le particelle inizialmente vicine al palo riemergono ad una qualche distanza da esso. Il terreno inattivo presenta una completa mancanza di grani colorati.

Viene spiegato che la traiettoria che le particelle seguono è dettata dal gradiente di taglio. All’inizio le particelle rotolano sulla superficie del suolo verso il palo; scivolano verso il basso lungo il palo stesso. Poi si dirigono verso le aree di minore confinamento (verso l’alto). Inoltre sono spinte dalle altre particelle che seguono la stessa traiettoria. Questo mette in moto il flusso convettivo nelle vicinanze del palo.

Viene inoltre detto che il flusso può avvenire perché ad ogni ciclo di carico/scarico la natura coesiva della sabbia satura crea un vuoto tra terreno e palo. Questo spazio è prontamente riempito dai grani. Si dice anche che la dimensione della cella convettiva sia dipendente da questa frattura, funzione del tipo di contatto che si instaura tra palo/terreno.

Si conclude dicendo che in seguito ad un numero elevato di carichi ciclici di bassa frequenza in un terreno granulare si verificano dei cambiamenti sostanziali, a livello di ridistribuzione dei vuoti (addensamento); il materiale dimostra un incrudimento. Se da una parte si ha un aumento di resistenza del terreno (che abbatte i movimenti flettenti) dall’altra si ha il rischio di una rottura di materiale rigido, fragile ed improvvisa. Inoltre il terreno non è materiale statico ma è interessato da un flusso continuo e costante (dopo una fase iniziale) originato dal vuoto che si crea ad ogni ciclo.

Si ricorda che in questo lavoro le sollecitazioni che si realizzano sono di diversa natura da quelle sismiche, caratterizzate da una frequenza di molto maggiore rispetto a quella del ratcheting.

4. Studio del fenomeno in laboratorio

Per analizzare il fenomeno del ratcheting è stato fatto in laboratorio un esperimento che simulasse le dilatazioni termiche di una struttura su di un terreno granulare.

In questa tesi non viene analizzata l'influenza di un acrico in superficie che invece è stata studiata nei test sperimentali; inoltre le particelle che saranno simulate sono quelle di vetro, di forma sferica, come quelle generate dal modello DEM. I diametri utilizzati sono quelli pari a 5mm e 3mm (ed un ulteriore diametro di 2mm). Non è stato preso in considerazione il diametro di 1.5 mm per l'eccessiva onerosità di calcolo.

4.1 Descrizione prova di laboratorio

Il Telaio e sue dimensioni

Il telaio utilizzato è formato da una scatola rettangolare in vetro, per permettere di fotografare il materiale nei vari istanti e per poterne studiare gli spostamenti. Essa è formata da due vetri paralleli di 12x30 cm a distanza di 5cm l'uno dall'altro. Entrambi i vetri sono opportunamente incollati alla base, anch'essa in vetro (figura 4.1).



Figura 4. 1 Telaio in vetro e mandrino di movimentazione

Successivamente si introducono da un lato una parete in vetro fissa di dimensioni 12x5 cm, saldamente incollata ai vetri verticali, dall'altra parte un'altra parete in vetro delle stesse dimensioni ma mobile per simulare lo spostamento della parete.

Il volume complessivo di materiale diventa di altezza 12cm (l'altezza del materiale inserito sarà 9cm), di larghezza 5cm e di lunghezza 15cm.

L'avanzamento della parete è attuato attraverso una barra filettata che viene mossa tramite un mandrino reso solidale ad una superficie fissa (in questo caso il tavolo di appoggio) tramite morsetti (figura 4.1). Il vantaggio di questo sistema è che crea spostamenti molto precisi applicando uno sforzo minimo, permettendo nel contempo di misurare lo spostamento orizzontale della parete partendo dal numero di giri effettuati. Il passo della barra filettata è di 1,25 mm, per cui, ad ogni giro del mandrino, è possibile conoscere lo spostamento della parete a contatto con il materiale.

Il volume in cui inserire il materiale granulare è stato opportunamente scelto: grazie alla

teoria di Rankine si stima la zona interessata dagli spostamenti, sapendo che l'angolo di attrito critico della sabbia è di 30° e quello del vetro di 28° . Si calcola la dimensione del cuneo di spinta passiva, maggiore a quello di spinta attiva, utilizzando la formula $(45^\circ - \varphi/2)$ che trova l'inclinazione dei piani di rottura rispetto l'orizzontale nella spinta passiva. Quindi

- $(45^\circ - \varphi/2) = 30^\circ$
- lunghezza del volume: 15cm

si trova un'altezza del volume di terreno di 8,66cm, arrotondata per eccesso a 9cm (figura 4.2).

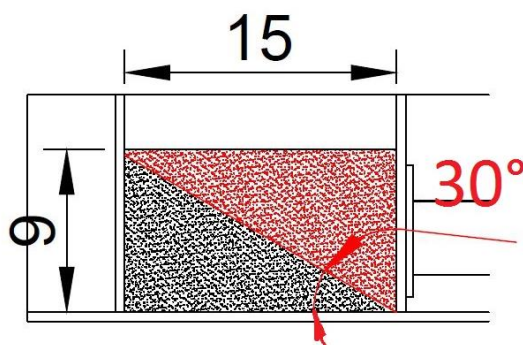


Figura 4. 2 Cuneo di spinta attiva

La misurazione del volume si serve di due metri verticale e orizzontale che aiutano a introdurre sempre lo stesso volume di materiale granulare (e il posizionamento sempre nello stesso punto dei carichi).

Per fotografare i vari spostamenti dei campioni di materiale all'interno del telaio si utilizza una macchina fotografica digitale fissata su di un adeguato supporto, puntata perpendicolarmente al telaio. E' quindi collegata ad un computer e programmata per lo scatto automatico delle fotografie ad intervalli regolari (ogni 4s).

Materiali

I materiali analizzati sono

- *vetro*; peso specifico $G_s = 2532 \text{ kg/m}^3$, indice di sfericità pari a 1, porosità $n=0.405$, coefficiente di uniformità $C_u = 1$ e angolo di attrito critico $\varphi=28^\circ$
- *sabbia dell'Adige*; composizione mineralogica: 25% quarzo, 35% feldspati, 15% carbonati, 25% altri materiali. Il diametro medio delle particelle D_{50} è uguale a 0.42 mm ed il coefficiente di uniformità C_u vale 2.04. Il peso specifico dei grani G_s è 2.71 g/cm^3 ed i pesi di volume secco massimo e minimo, determinati con le procedure standard sono di 13.58 kN/m^3 e 16.51 kN/m^3 . Nel campo tensionale delle prove di compressione triassiale standard, per una densità relativa D_r pari all'85%, il valore medio dell'angolo di attrito di picco risulta di 41° e il valore dell'angolo di attrito critico di 30° .

Il vetro introdotto nella prova ha 3 diversi diametri: 5mm, 3mm, 1.5mm; la sabbia ha un D_{50} pari a 0.42mm.

Variabili della prova

In questo esperimento si è deciso di considerare le variabili che potessero maggiormente influenzare i risultati:

- tipo di *materiale* scelto (in figura 4.3);

si è deciso di scegliere tre materiali industriali (biglie in vetro) e un materiale naturale (sabbia sciolta).

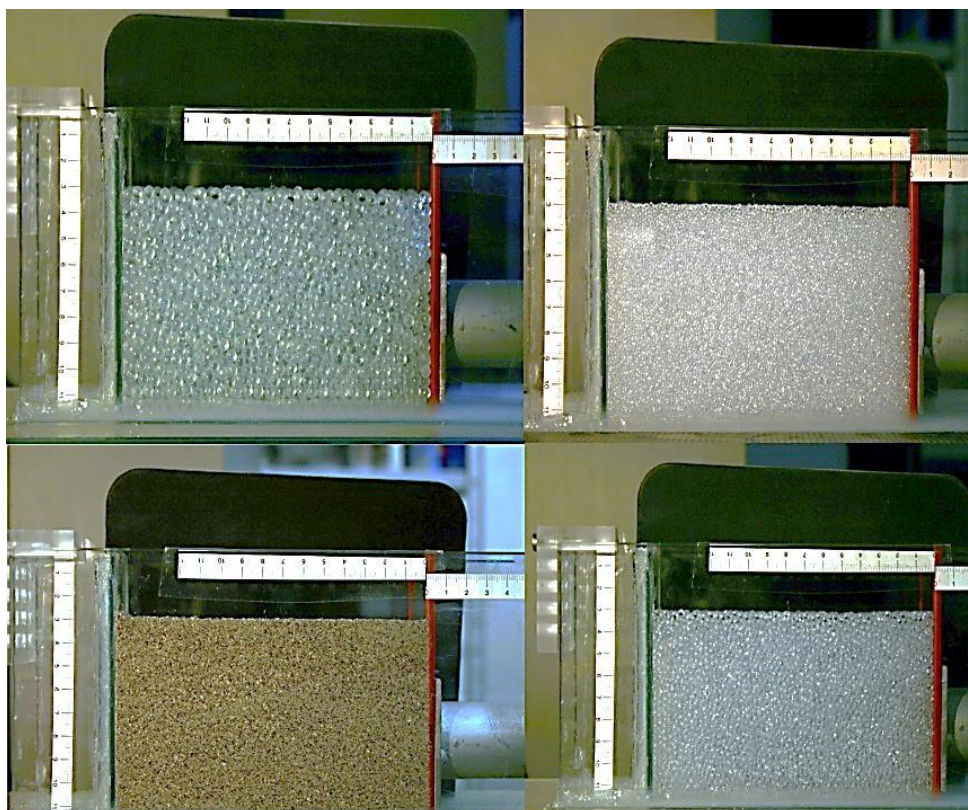


Figura 4. 3 Materiali utilizzati

- *entità dello spostamento;*

Nella realtà le dilatazioni sono molto piccole rispetto l'intera struttura e ciò non si potevano rispettare anche in questa prova. Si è deciso di considerare degli spostamenti molto più accentuati per far risaltare i risultati. Per ogni materiale sono stati eseguiti due entità di spostamento. Lo spostamento è stato misurato attraverso il passo della vite che traslava orizzontalmente: un giro della ruota corrispondeva ad un avanzamento di 1,5mm;

- *carico agente sul piano.*

E' stato considerato per ogni materiale e per ogni spostamento tre diverse configurazioni di carico. Una prima prova senza alcun carico, una seconda con un peso leggero che chiameremo "PESO1" di 0,026 kg e una terza con un peso più pesante che chiameremo "PESO2" di 0,1 kg entrambi avente un area di base di 5x4,5 cm.

La scelta dei pesi non è stata fatta secondo alcuna teoria di scala o posizionamento in quando si voleva solo vedere il comportamento in generale del terreno. Si è deciso di rispettare solo lo stesso punto di posizionamento del carico in ogni prova cioè a 3 centimetri

dalla parete.

Ci sarebbero stati altri parametri da mettere in gioco, come il grado di addensamento, addensamento che si è cercato di evitare inserendo velocemente il materiale senza alcuna vibrazione nel telaio; la velocità con cui veniva effettuato lo spostamento, in questo caso si è mantenuta una circa costante in tutte le prove.

Funzionamento della prova.

Durante tutte le prove è rimasta invariata la posizione relativa tra telaio, macchina fotografica e fonte di luce. E' stato usato anche un cartone nero dietro al telaio per aumentare il contrasto del contorno superficiale dei materiali.

La parete segue il movimento di un *dente di sega*. Un ciclo è composto da 4 fasi: parte dalla posizione 1 (larghezza volume: 15cm) ed inizia la compressione fino ad arrivare al punto tre. Se si chiama a la massima ampiezza con cui si muove la parete, al punto due il volume misurerà $(15-a/2)$ cm (fase 1, punti 1-2); al punto tre $(15-a)$ cm (fase 2, punti 2-3)). Allo stesso modo decomprimerà il provino, avendo volume di nuovo 15cm alla fine della fase 4 (punti 4-5). Due cicli sono illustrati in figura 4.4.

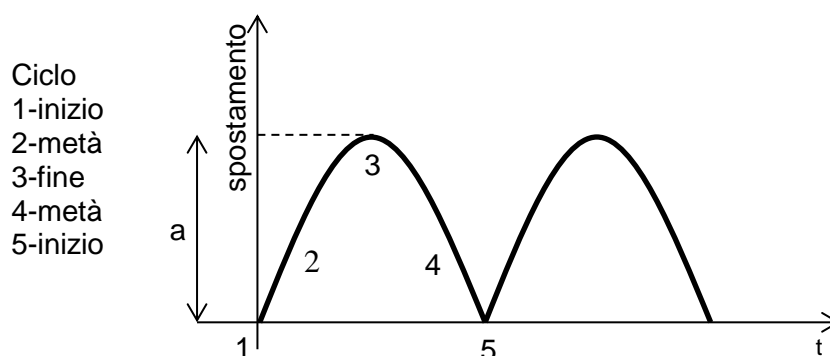


Figura 4. 4 Movimento a dente di sega della parete laterale del provino

Le prove svolte riguardano il vetro (3 diametri) e sabbia, scarichi, con il peso 1 e con il peso 2, variando poi l'ampiezza (da 3mm a 6mm), come si vede nella tabella successiva.

Materiale	Diametro (mm)	Ampiezza (mm)	Carico
Vetro	5, 3, 1.5	3, 6	Scarico
			Peso 1
			Peso 2
Sabbia	0.42	1.5, 0.75	Scarico
			Peso 1
			Peso 2

Programmi ed elaborazione dei dati

Le immagini vengono elaborate utilizzando GeoPIV, un software che implementa la tecnica del Particle Image Velocimetry (PIV) cioè misura i campi di spostamento di un oggetto o particelle attraverso l'analisi e confronto di una serie di immagini digitali acquisite da un esperimento.

Sull'area d'indagine dell'immagine iniziale viene approntata una mesh, una figura chiusa di forma qualsiasi con all'interno dei quadrati di opportuna grandezza chiamati patch. Il centro di ogni singola patch è definito da delle coordinate di posizione all'interno della mesh.

Confrontando due immagini successive si ritrova lo spostamento totale o successivo della stessa patch tra due tempi t_1 e t_2 ; quest'operazione è svolta per tutti gli elementi della griglia.

Se questa operazione viene ripetuta per tutta la serie di immagini si ritroverà

Il risultato finale sarà il campo di spostamenti da un tempo iniziale ad un tempo finale. E' importante dire che più immagini vengono acquisite all'interno di questi due tempi più il programma riesce a seguire correttamente lo spostamento di ogni singola patch aumentando la precisione dell'elaborato finale. L'output è un file testo che reca tutti gli spostamenti tra l'immagine i e $i+1$. Questi spostamenti sono caricati in matrici e poi plottati attraverso le funzioni di Matlab così da poter osservare attraverso delle scale cromatiche le deformazioni avvenute nel nostro terreno granulare.

I grafici finali sono :

- spostamenti in x,y e totali;
- spostamenti cumulati in x,y e totali;
- sovrapposizione tra l'immagine e il grafico degli spostamenti cumulati;
- deformata della superficie all'aumentare dei cicli;
- spostamento di una singola Patch all'aumentare dei cicli.

Si hanno anche gli spostamenti cumulati in funzione del tempo.

4.2 Risultati

Si riportano in sintesi i risultati ottenuti alla fine di questo esperimento (ad opera dei laureandi Zorzi e Calvi, anno 2013).

I terreni soggetti a questo tipo di sollecitazioni si comportano allo stesso modo; i materiali granulari presentano un comportamento sforzo/deformazione non lineare, accumulando nel tempo una deformazione residua.

Il fenomeno del ratcheting si manifesta all'aumentare dei cicli creando deformazioni accumulate, sempre con le stesse modalità. L'entità del fenomeno si manifesta tanto prima quanto maggiori sono le ampiezze; inoltre maggiori ampiezze portano a maggiori deformazioni

Bisogna ricordare che dato che le variazioni termiche sono di molto inferiori a quelle

ipotizzate nell'esperimento, il ratcheting dovuto a queste ci metterà più tempo a manifestarsi. Tuttavia esistono altre sollecitazioni termiche che possono avere effetto in tempi più brevi.

Le prove con i carichi hanno fatto notare che questi influiscono sulla risposta deformativa del terreno e le sollecitazioni cicliche hanno delle ripercussioni anche sulla stabilità dei pesi presenti sul piano campagna. Quindi la presenza di un peso fa aumentare la massa di terreno sollecitata a parità di materiale, numero di cicli e ampiezza di spostamento della parete.

In tutte le prove si nota che il materiale granulare si deformava fino a 7-8 cm dalla parete in una prova senza peso, mentre introducendo il peso² il materiale si deforma fino a 12-13 cm dalla parete. A sua volta il peso subisce dei cedimenti sprofondando all'interno del terreno quindi si sono osservate delle deformazioni anche a livello locale sotto il peso. Un'osservazione molto interessante sta nel fatto che all'aumentare del peso e dell'ampiezza di spostamento della parete diminuiscono i cedimenti retrostanti il muro.

La tradizionale progettazione dei muri di sostegno utilizza le classiche teorie già esposte di Rankine e Coulomb. Si sa che questi metodi si basano sui coefficienti di spinta attiva e passiva che a loro volta dipendono dall'angolo di attrito del terreno, ma durante i cicli abbiamo visto che si ha un progressivo addensamento e quindi questi metodi perdono di validità.

Quindi i movimenti ciclici dei muri di sostegno introducono nuove variabili che non sono presenti in fase di progettazione statica del muro.

Le prove di laboratorio fatte comprendono 50 cicli di carico e scarico.

Immaginando quindi dei cicli di carico scarico annuali, cioè legati alle deformazioni termiche stagionali di una opera di collegamento, si può notare come le prove siano esemplificative dei cedimenti durante la vita di opera d'arte. A rigore, va fatto notare che il fenomeno del ratcheting tende, per ovvi motivi legati alle variazioni delle caratteristiche interne del materiale stesso, ad esaurirsi dopo un certo numero di cicli.”

5. Il Discrete Element Method

5.1 Classificazione dei modelli particellari

Nel campo dei problemi quasi-statici, con deformazioni contenute, il terreno spesso viene schematizzato come un elemento continuo. Questa semplificazione non è più valida una volta che si vada ad analizzare problemi riguardanti la rottura del materiale. Un terreno si presta più naturalmente ad essere descritto come un aggregato di particelle elementari piuttosto che un continuo. In effetti il materiale granulare viene spesso considerato un quarto stato di materia, diverso dallo stato solido, dal liquido e dal gassoso.

Nascono quindi dei modelli particellari. Vengono classificati in base alla legge fisica di conservazione che implementano, all'approccio numerico utilizzato per risolverla, alla variante indipendente che viene discretizzata (ad esempio il tempo, lo spazio...).

La prima categoria di modelli è il *Metodo agli Elementi Discreti* (DEM). Nasce per descrivere delle simulazioni atomistiche di dinamica molecolare elaborate alla fine degli anni '50. In seguito trova applicazione anche in altri campi (come quello geotecnico).

I metodi agli elementi discreti sono tra i più conosciuti metodi particellari in campo geomeccanico. Essi riproducono gli spostamenti delle singole particelle senza che vi sia un contatto tra queste, ma a partire dalla conoscenza del potenziale interatomico tra le coppie di atomi.

Una seconda categoria di modelli (*Event Driven*, *Contact Dynamic* e *Monte Carlo*) sfrutta invece le leggi di conservazione della quantità di moto, simulando gli urti elastici ed anelastici tra le particelle. Questi possono essere descritti da una legge deterministica (event driven) o stocastica (teorie cinetiche con i metodi di Montecarlo).

Il vantaggio di questi metodi, rispetto ai DEM, sta nella soluzione implicita di ogni singolo urto e quindi della possibilità di utilizzare passi temporali molto grandi, diminuendo così i tempi di calcolo.

Una terza categoria di modelli sfrutta i metodi stocastici tipo *Random Walk* e trova applicazione quasi esclusivamente nello studio di gas e liquidi, ossia materiali isotropi a tutte le scale di indagine (dalla particella in su) e per i quali la densità ha distribuzione sufficientemente regolare.

Una quarta categoria è rappresentata dai metodi reticolari come il *Lattice Boltzmann Method*. Sono un'evoluzione dei modelli gas automata utilizzati sempre per lo studio dei gas. Viene discretizzato il dominio spaziale ed anche il tempo e la velocità.

5.2 Il Metodo agli Elementi Discreti

Introduzione

Inizialmente il DEM è stato utilizzato per studiare problemi riguardo la meccanica delle rocce ma erano già conosciuti sotto il nome di Dinamica Molecolare (DM). Attualmente questo modello viene impiegato per lo studio delle particelle in molti settori fisico scientifici: dallo studio di fenomeni in scala riguardanti le molecole a quelli alla scala di granelli di sabbia, dal movimento delle placche tettoniche allo studio delle galassie.

Nel campo geotecnico, dell'ingegneria mineraria e della geofisica le particelle del DEM possono rappresentare singoli grani di terreno, blocchi di roccia o grandi placche tettoniche

Equazioni

I DEM risolvono in maniera esplicita il moto di ciascuna particella del sistema a partire dalla determinazione delle forze agenti su di essa, usando la seconda legge della dinamica di Newton per il moto traslazionale e le leggi della dinamica del corpo rigido per il moto rotazionale.

Le tre equazioni nelle tre direzioni dello spazio che descrivono la traslazione di una sferica particella trattata come corpo rigido 3D sono del tipo $F_i = m (x_i'' - g_i)$ dove x_i rappresenta x, y o z , x_i'' è l'accelerazione lineare in direzione i e g_i l'eventuale accelerazione esterna. m è la massa della particella con peso ρ e volume $4/3\pi R^3$.

Le equazioni che per un corpo rigido descrivono la sua rotazione (nel sistema di riferimento solidale al corpo stesso) sono del tipo $M_i = I_i \omega_i' - \omega_1 \omega_1 (I_j I_k)$, dove M_i sono i momenti esterni applicati al corpo nelle tre direzioni principali, I_i i momenti di inerzia principali del corpo e ω_i le velocità angolari.

Per particelle sferiche i momenti di inerzia sono uguali.

La dinamica del moto di ogni particella viene determinata risolvendo le forze e i momenti risultanti agenti su di esse per ogni passo temporale e poi ricavando per integrazione dalle accelerazioni lineare ed angolare posizioni, velocità e rotazioni.

Lo scopo del DEM è di modellare in modo esplicito il processo di un sistema di particelle partendo da ciò che avviene alla singola particella. In questo modo è possibile descrivere elementi che presentano comportamenti non lineari o non comprensibili partendo dalla meccanica del contatto tra due particelle.

Il DEM possiede quindi un approccio modellistico di tipo riduzionista, a partire dalla piccola scala è possibile descrivere fenomeni di grande scala.

La versatilità di questi modelli sta nel fatto che scindono le leggi del moto (universalmente riconosciute e certe) e quelle del contatto. Le seconde cambiano in funzione della forma delle particelle, della complessità del modello e al tipo di applicazione da indagare.

Particle Flow Code

Il software qui utilizzato è PFC3D, Particle Flow Code in tre dimensioni; è un'evoluzione del codice originale di Cundall e Strack (1979). Al suo interno contiene delle semplificazioni, alcune comuni a tutti i DEM altre proprie del PFC3D:

- Tutte le particelle sono sferiche
- Tutte le particelle sono corpi rigidi non deformabili
- Il contatto tra particelle avviene in un punto
- I contatti sono dei soft-contacts, ossia le particelle possono sovrapporsi l'una all'altra nel punto di contatto, ma solo per una distanza che piccola rispetto alle dimensioni delle particelle. Questa rappresenta la deformazione della particella
- Il grado di sovrapposizione è legato alla forza di contatto tra le particelle tramite il modello di contatto

La prima semplificazione può ben rappresentare grani ben arrotondati. Nella realtà però è una limitazione che porta a problematiche non trascurabili: difficoltà a simulare la reale dilatanza del terreno; impossibilità a raggiungere angoli di attrito ed angoli di natural declivio superiori a 28° , tipici di molte sabbie; difficoltà a simulare correttamente la rotazione delle particelle, ridotta nei grani spigolosi; non rappresenta la naturale anisotropia del terreno; parziale variazione dei parametri di contatto che in particelle spigolose sono diversi da quelli di contatto sfera-sfera.

Le ultime tre semplificazioni sono corrette se la rigidità al contatto è sufficientemente elevata. Il DEM non è quindi adatto a materiali eccessivamente deformabili (deformazione al contatto maggiore del 5% della dimensione della particella).

Uno dei limiti maggiori del DEM che si è riscontrato molto spesso durante la stesura di questa tesi è l'elevato onere computazionale che esso richiede. Ciò dipende dal numero di particelle e dall'algoritmo di ricerca dei contatti.

In questo lavoro il programma è stato impostato per fotografare la situazione del modello ogni quarto di ciclo; per ogni istante restituisce 6 file di output

- Un file immagine a colori: il materiale è stato suddiviso e colorato in base alla profondità z; questa immagine è utile per capire la subsidenza vicino alla parete
- Un file immagine a 2 colori: si notano bene le zone di addensamento del provino
- Un file immagine che reca la rete di forze che agiscono durante la prova e la velocità delle particelle. E' misurata anche la massima forza di trazione e compressione cui sono sottoposti i grani

- Due file testo che recano informazioni riguardanti la posizione e la velocità di ogni particella ad ogni istante. Saranno utilizzati per ricavare l'elaborazione dei cedimenti grazie a matlab.
 - Un file "di salvataggio" che fotografa la configurazione del provino in quello step
- Infine per ogni elaborazione è fornito un file testo finale che riporta le spinte nelle tre direzioni in funzione del tempo della prova e dello spostamento della parete. Questo file è usato nelle elaborazioni in excel.

Modello di contatto

Le forze esterne che intervengono all'interno dell'algoritmo agli DE sono di due tipi: forze di massa, proporzionali al peso della particella; forze di contatto, a loro volta di contatto grano-grano o di contatto parete-grano. Queste sono determinate dalla legge di contatto che si sceglie di attribuire al DEM, in questo caso una legge elasto-plastico lineare. La forza si manifesta nel punto di contatto ad una distanza inferiore o uguale al raggio della particella e possono produrre traslazione e rotazione della stessa.

Le particelle sono schematizzabili da una serie di punti di massa m e di molle con rigidità k . Essi rappresenteranno idealmente una serie di particelle. In seguito al contatto tra due grani, questi immagazzineranno energia elastica per poi usarla, respingendosi con una forza uguale e contraria

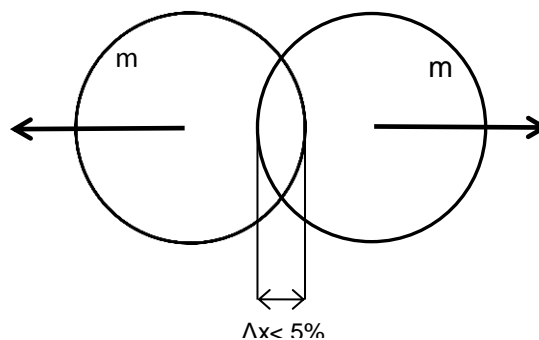


Figura 5. 1 Contatto tra due particelle

Ciò che rallenta la risoluzione di un problema agli elementi finiti sono i seguenti fattori: il numero di particelle, la loro forma, il time-step (una combinazione della rigidità al contatto e della massa o dimensione delle particelle).

I parametri per definire il moto della particelle possono essere relativi al modello nella sua globalità o alle particelle stesse. Alle particelle verrà attribuita una massa, la dimensione (il loro raggio), la rigidità normale e quella tangenziale al contatto, l'angolo di attrito.

6. Risultati e commenti

6.1 Pre: l'analisi dei risultati

Come già detto il programma PFC3D restituisce per ogni fase misurata 6 file di output. Inoltre per ogni simulazione è disponibile un file finale che misura le spinte all'aumentare dei cicli.

L'analisi dei dati viene svolta attraverso l'utilizzo del programma MATLAB. MATLAB è un linguaggio di alto livello e un ambiente interattivo per il calcolo numerico, l'analisi e la visualizzazione dei dati e la programmazione. Consente di analizzare dati, sviluppare algoritmi e creare modelli e applicazioni. Il linguaggio, gli strumenti e le funzioni matematiche incorporate consentono di esplorare diversi approcci e di raggiungere una soluzione più velocemente rispetto all'uso di fogli di calcolo o di linguaggi di programmazione tradizionali, quali C/C++ o Java.

È possibile usare MATLAB in un'ampia gamma di applicazioni, tra cui l'elaborazione di segnali e i sistemi di telecomunicazione, l'elaborazione di immagini e video (è questo il caso), i sistemi di controllo, test and measurement, la finanza computazionale e la biologia computazionale.

Gli algoritmi utilizzati sono due; ciò che varia di volta in volta è la fase che si sceglie di analizzare (e quindi i file di input).

PlottaElaborazionePalline

Questo algoritmo restituisce tutti i grafici dei paragrafi 6.1 e 6.2.

Vengono utilizzati i file contenenti le posizioni di tutte le particelle del modello; questi dati vengono registrati all'interno di una matrice. Grazie alla differenza di posizione tra due istanti successivi è possibile ricavare gli spostamenti di ogni grano.

Grazie alla funzione Griddata è possibile creare una mesh in grado di rappresentare il sistema in un numero limitato di punti ben definiti; viene creata una griglia (di diametro pari a quello delle particelle che si va ad elaborare). Il generico nodo della griglia media i valori spostamento nell'intorno del nodo stesso e assume il valore spostamento.

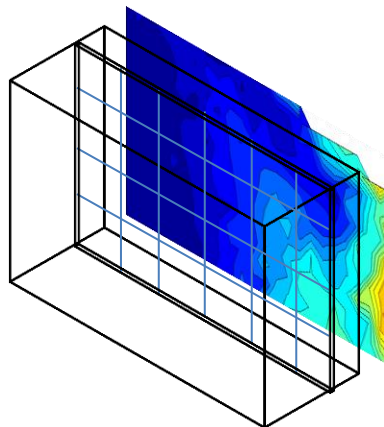


Figura 6. 1 Volume di prova e griglia rappresentativa

Per ogni valore di profondità si ha la descrizione completa di tutto il provino. Poi questi valori vengono ancora mediati e proiettati in un'unica superficie che diventa rappresentativa di tutto il volume (figura 6.1).

In seguito viene fornito un grafico che descrive gli spostamenti in funzione della posizione della particella. Una scala di colori rappresenta l'entità dello spostamento stesso;

Per ogni differenza di istanti inseriti gli outputs creati da questo algoritmo e qui utilizzati sono di due tipi:

- Spostamenti totali: reca la differenza di spostamento di un grano tra un istante e quello precedente
- Spostamenti cumulati: è la somma degli spostamenti dall'inizio dell'elaborazione all'istante che si sta analizzando

Viene fornito anche un file in cui si sovrappongono le immagini ottenute da PFC3D con i valori di spostamento e di velocità; si ha anche le posizioni del punto centrale del nodo della mesh (utile se si vuole analizzare lo spostamento della particella, figura 6.2).

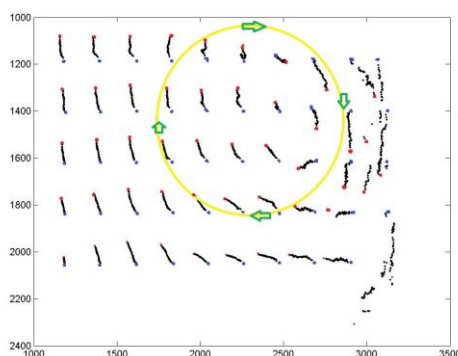


Figura 6. 2 Spostamento dei nodi della mesh

EstraiPianoCampagna

Come per i cedimenti viene utilizzata una mesh che porta dal caso tridimensionale ad un caso bidimensionale. Vengono indagati solo i punti della griglia alla sommità del provino.

Si utilizza un array; questo scorre sovrapposto a tutte le palline in superficie ed è suddiviso in "tacche" di dimensione pari al diametro della particella della simulazione. Ogni cella viene riempita con i valori di spostamento massimi in direzione x di tutte le palline nell'intorno di quella tacca.

Il risultato di questo lavoro è un grafico che riporta in funzione della posizione delle particelle il valore di quell'array che descrive l'andamento del piano campagna.

Questo algoritmo è utilizzato per il paragrafo 6.5.

Excel

Per il paragrafo 6.2 viene utilizzato il file .his delle varie simulazioni. Questo file che riporta la misura delle spinte durante la simulazione viene usato per importare i valori in excel. In seguito questi valori vengono elaborati e se ne ricava i vari grafici sotto riportati.

6.2 Spinte orizzontali

Si procede ora nel valutare l'influenza delle variabili in gioco riguardanti il modello; mantenendo costanti gli altri parametri si confronteranno simulazioni con diversa porosità (n), diverso periodo di movimento del dente di sega (T), diversa ampiezza (A) e diverso raggio (r_{me}).

Le simulazioni fatte sono elencate in tabella 6.1.

Raggio (mm)	Ampiezza (mm)	Porosità n	Periodo T (s)
2.5	3	0.45, 0.47, 0.50	1
	6	0.45, 0.47, 0.50	1
		0.47	0.5
1.5	3	0.47, 0.52	0.5
1.5	6	0.47	0.5
1.0	6	0.50	0.5

Tabella 6. Prove svolte

6.2.1 Porosità

Per i due raggi maggiori ($r_{me}=2.5\text{mm}$ e $r_{me}=1.5\text{mm}$) si generano tre configurazioni del provino, aventi come unica differenza la porosità:

- caso a) per $r_{me}=2.5\text{mm}$: porosità $n=0.45; 0.47; 0.50$ $A=3\text{mm}$
- caso b) per $r_{me}=2.5\text{mm}$: porosità $n=0.45; 0.47; 0.50$ $A=6\text{mm}$
- caso c) per $r_{me}=1.5\text{mm}$: porosità $n=0.47; 0.52$ $A=3\text{mm}$

Il numero di particelle create varia da un minimo di 5127 palline ($r_{me}=2.5\text{mm}$; $n=0.50$) ad un massimo di 25277 palline ($r_{me}=1.5\text{mm}$; $n=0.47$).

Si indaga il comportamento del materiale per le due ampiezze in questione.

Come primo passo si confronta l'andamento generale delle simulazioni, graficando il variare della forza allo scorrere del tempo.

Nel caso a) si ottengono i grafici 6.1 e 6.2, riguardanti i cicli iniziali 2, 3, 4, 5 e quelli finali 46, 47, 48 e 49.

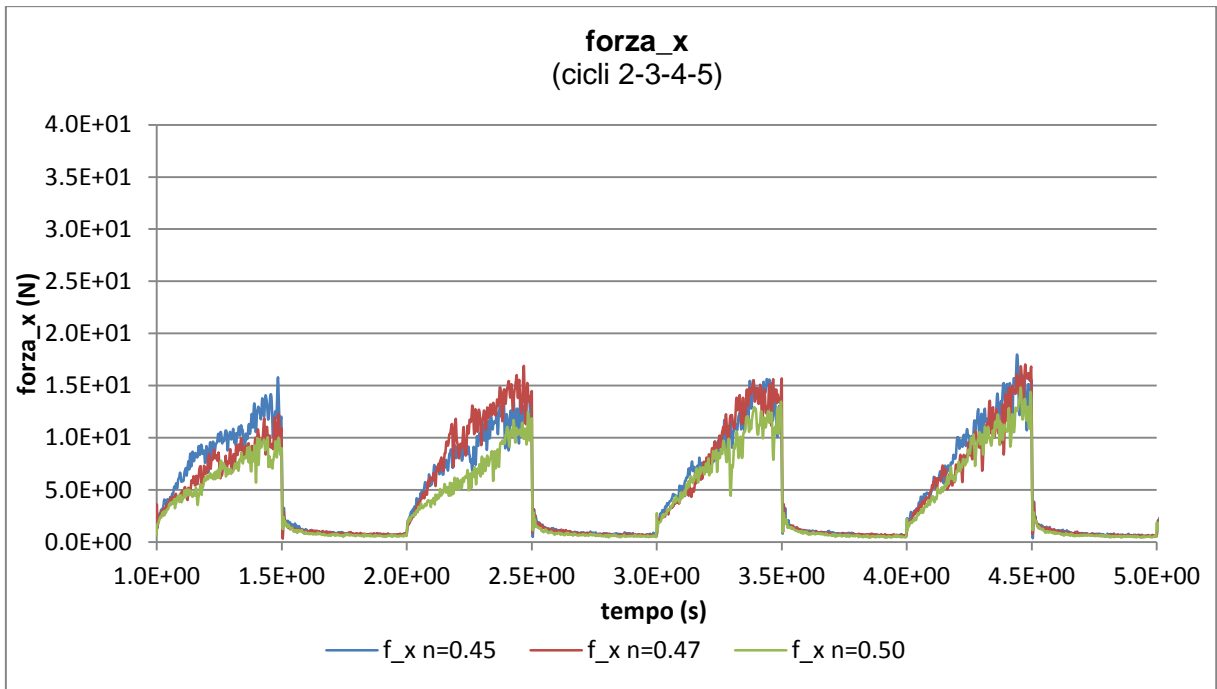


Grafico 6. 1 $r_{me}=2.5mm$, $A=3mm$; cicli iniziali

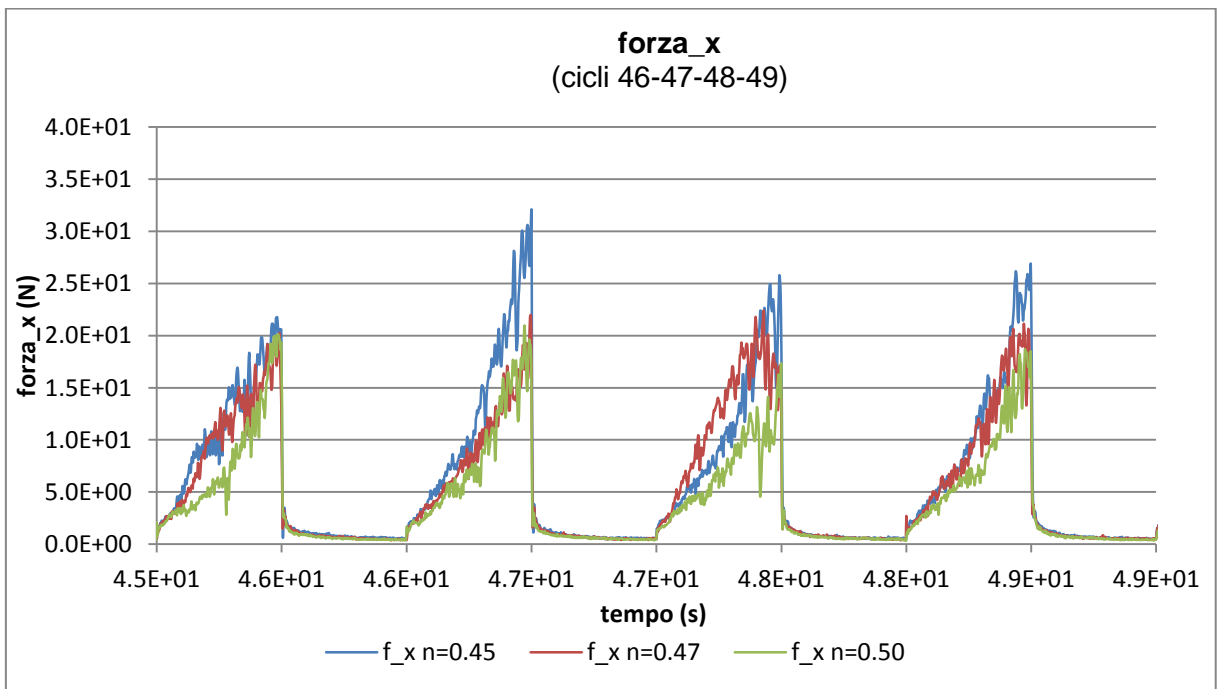


Grafico 6. 2 $r_{me}=2.5mm$, $A=3mm$; cicli finali

All'inizio della simulazione i valori massimi sono raggiunti prima dalla simulazione con $n=0.45$ (in blu) e poi da quella con $n=0.47$ (in rosso). Alla fine la situazione si capovolge; il massimo infatti è della porosità minore. Questa differenza può essere spiegata dal fatto che durante i primi cicli il materiale non si è ancora ben assestato e il suo comportamento dipende principalmente dalla casualità con cui è stato generato il modello. I valori comunque non differiscono di molto l'uno dall'altro.

In generale per tutte le porosità, la forza passiva segue un andamento crescente all'aumentare del numero di cicli. L'andamento irregolare del valore di forza è da imputare al basso numero di catene di sforzo che le particelle condividono con la parete mobile: lo spostamento di poche particelle produce infatti grandi variazioni del valore di forza.

Nei primi cicli l'andamento pare assestarsi attorno ad un valore asintotico orizzontale; nel corso degli ultimi cicli invece c'è un cambiamento della forma, più esponenziale e tesa a crescere.

Queste osservazioni non riguardano però il caso della spinta attiva; questa infatti è sostanzialmente costante, a parte la prima parte di decompressione in cui decresce rapidamente (figura 6.5).

Nel caso b) (con ampiezza di spostamento maggiore) queste osservazioni risultano ancora più evidenti (grafici 6.3 e 6.4).

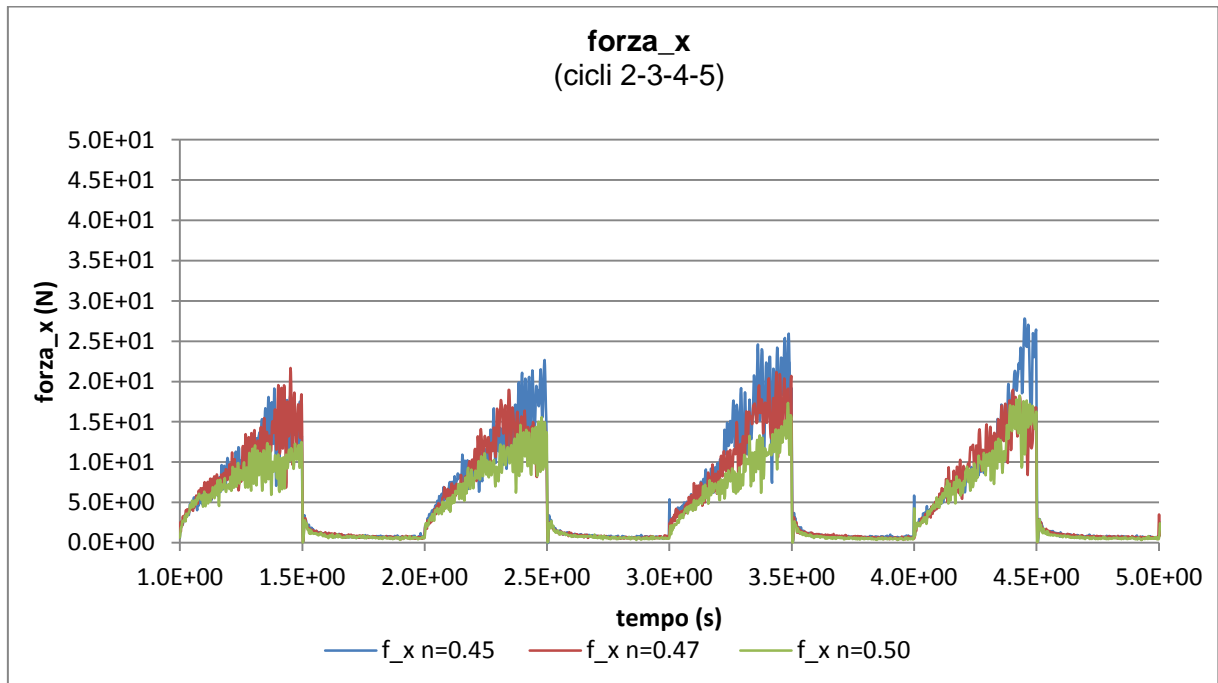


Grafico 6. 3 $r_{me}=2.5mm$, $A=6mm$; cicli iniziali

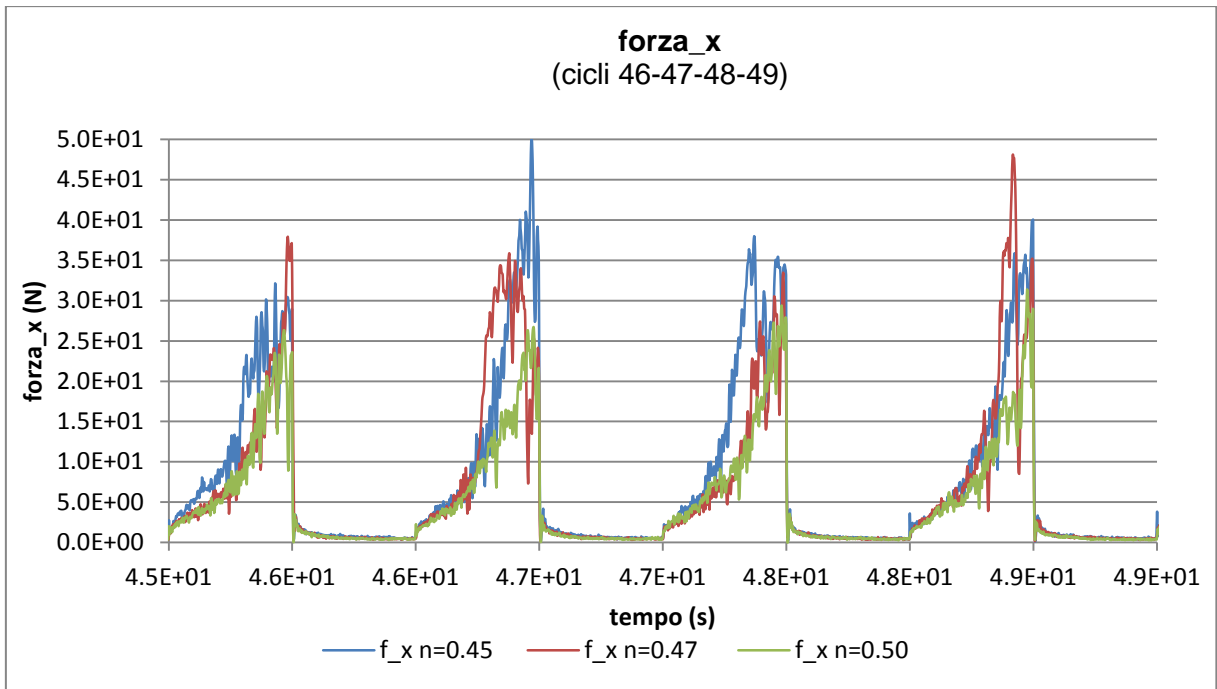


Grafico 6. 4 $r_{me}=2.5mm$, $A=6mm$; cicli finali

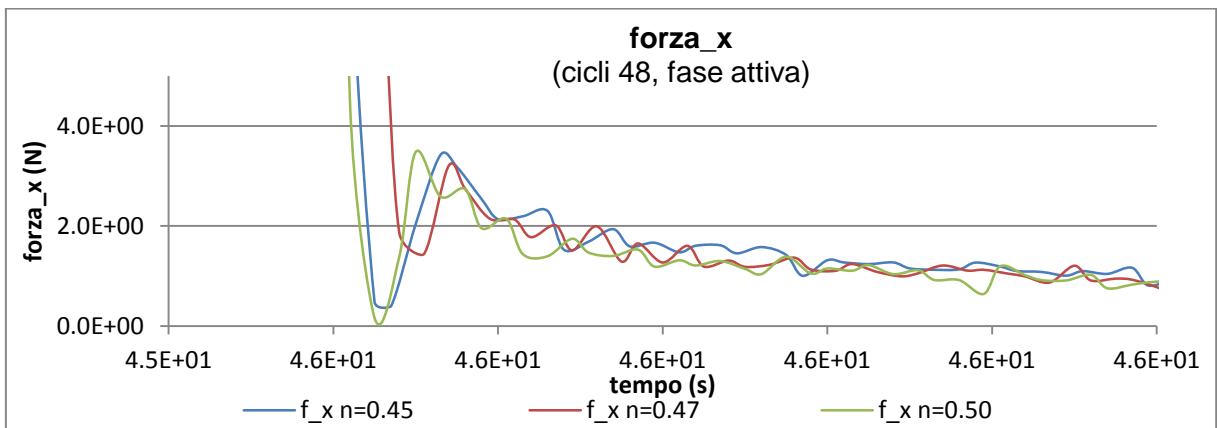


Grafico 6. 5 Particolare della spinta attiva

In questo caso si la differenza di comportamento tra due simulazioni di diversa porosità è accentuata, ma in sostanza l'andamento risulta essere lo stesso.

Il grafico 6.6 riguarda il caso c) cioè ampiezza come il caso a ma con sferette di granulometria più piccola. Vengono rappresentate le medie delle spinte per ogni ciclo, in fase passiva e attiva, degli ultimi valori corrispondenti a $0,5T$ (ossia 100 valori). Si è deciso di prendere solo gli ultimi valori in quanto una media di tutta la fase passiva (o attiva) di un ciclo è poco rappresentativa di un andamento crescente all'aumentare dei cicli come avviene invece negli ultimi cicli.

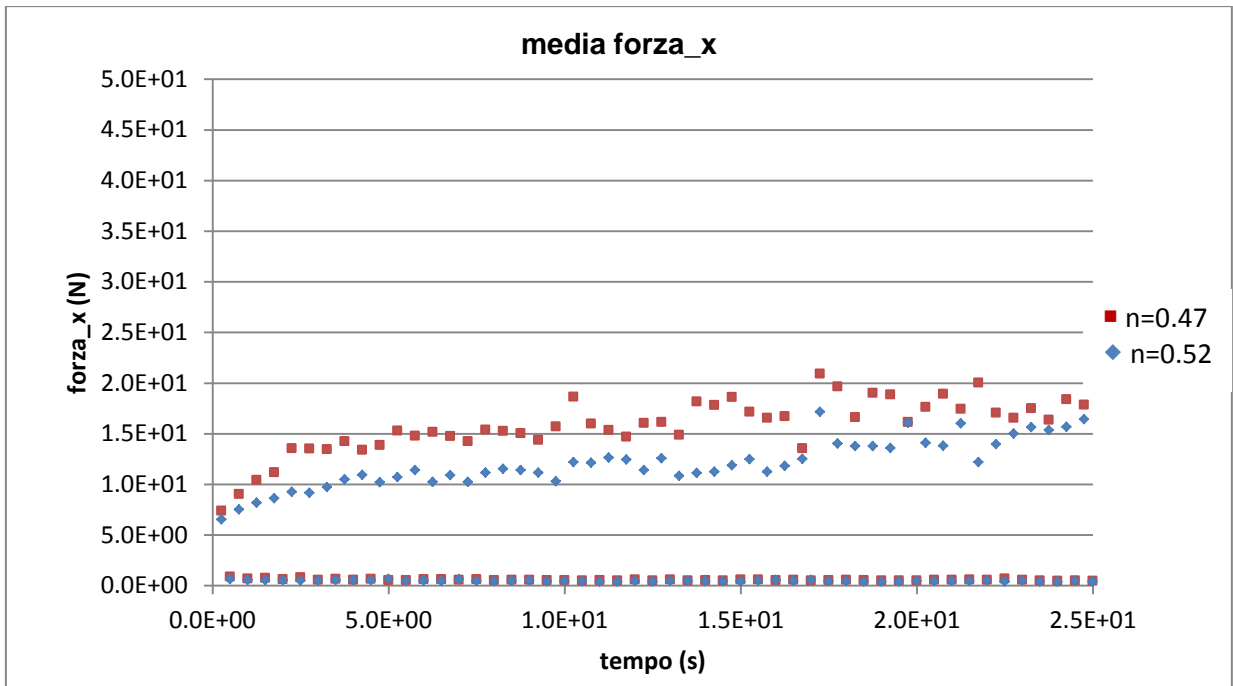


Grafico 6.6 Medie delle spinte_x per $r_{me}=1.5\text{mm}$, $A=3\text{mm}$

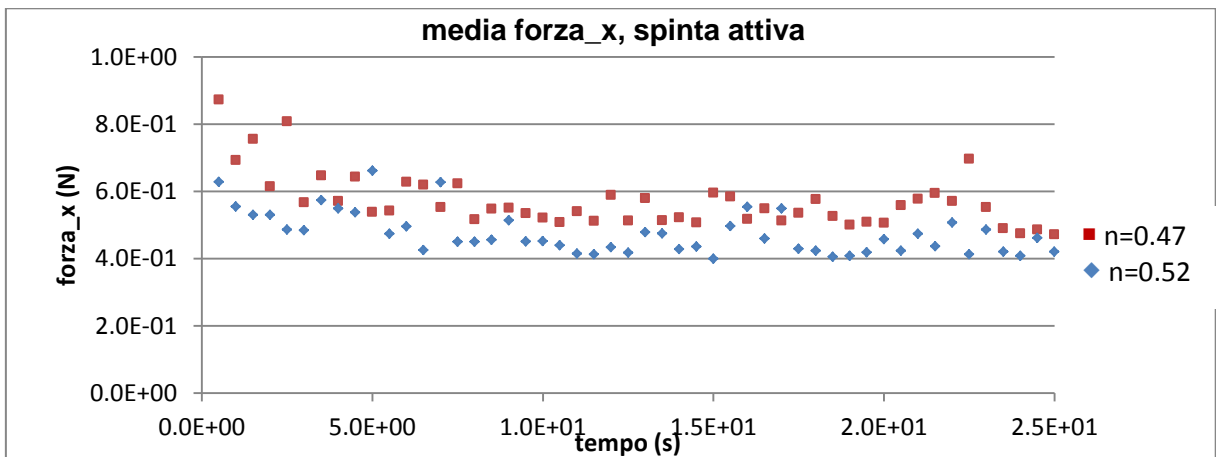


Grafico 6.7 Medie delle spinte_x per $r_{me}=1.5\text{mm}$, $A=3\text{mm}$

In questo terzo caso è più immediato notare i valori massimi delle medie delle spinte raggiunti ancora una volta dal provino con porosità minore.

La forza opposta dalla parete durante le spinte passive cresce all'aumentare dei cicli, più velocemente all'inizio; negli ultimi istanti sembra assestarsi attorno ad un valore costante (tra 15N e 25N).

I dati risultano però più disturbati per la porosità minore e nella parte finale.

La spinta attiva media invece risulta diminuire all'aumentare dei cicli.

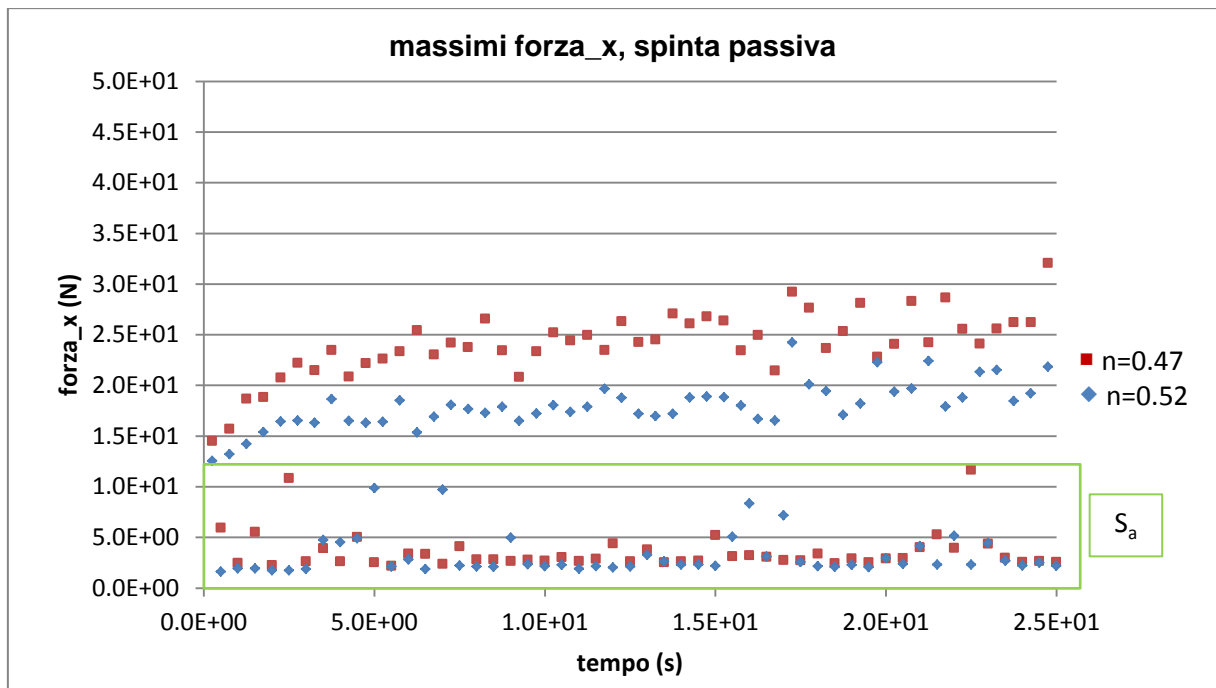


Gráfico 6. 8 Massimi delle spinte attiva(nel basso) e passiva(più alta)

6.2.2 Periodo

Dato che anche il periodo e quindi la velocità con cui si muove la parete è una variabile del problema, si è pensato di valutarne l'effetto eseguendo due simulazioni con due periodi T differenti.

Le caratteristiche della simulazione utilizzata per questo confronto sono:

- raggio delle particelle: $r_{me}=2.5\text{mm}$;
- porosità: $n=0.47$;
- ampiezza di movimento: $A=6\text{mm}$.

Il periodo verrà modificato da 1s a 0.5s.

Si analizza, come per il paragrafo 6.2.1, l'andamento delle spinte orizzontali registrate sulla parete (grafici 6.9 e 6.10).

Si nota come per il periodo di 0.5 s si hanno oscillazioni più ampie nei primi cicli. Le ampiezze vanno comunque a diminuire con l'aumento del tempo.

Il valore massimo di forza raggiunto è lievemente superiore per la simulazione con periodo più lungo (1 secondo), cioè quella con velocità della parete più bassa.

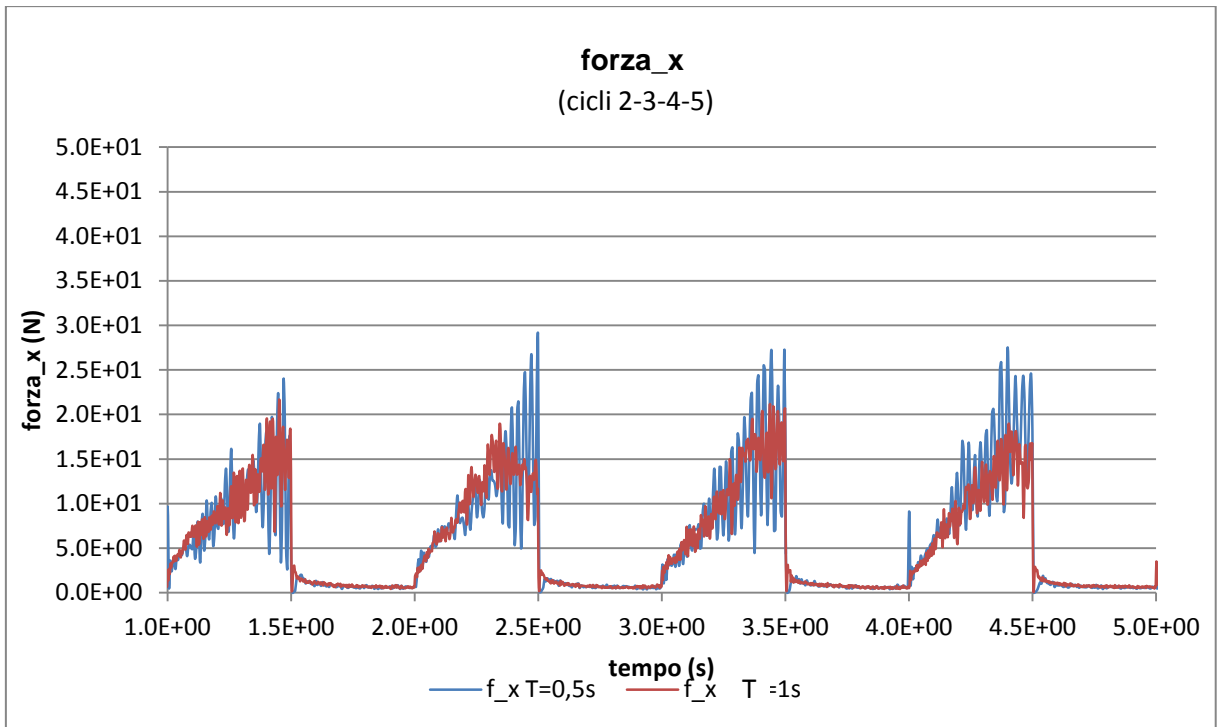


Grafico 6. 9 $r_{me}=2.5\text{mm}$, $n=0.47$, $A=6\text{mm}$; cicli iniziali

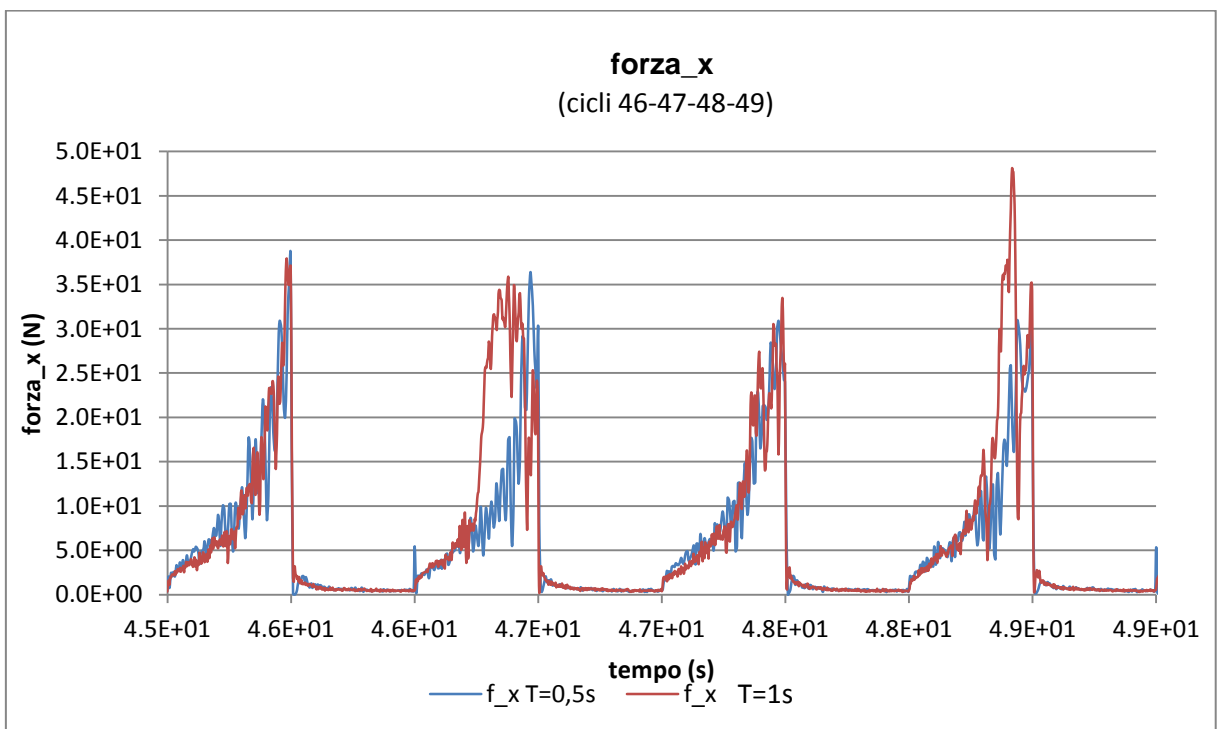


Grafico 6. 10 $r_{me}=2.5\text{mm}$, $n=0.47$, $A=6\text{mm}$; cicli finali

Tuttavia osservando i valori medi della forza per ciascun ciclo (grafico 6.11 e grafico 6.12) non pare esserci un legame tra periodo e valori di media massimi; sembra invece che questi valori siano casualmente distribuiti senza che gli uni prevalgano sugli altri.

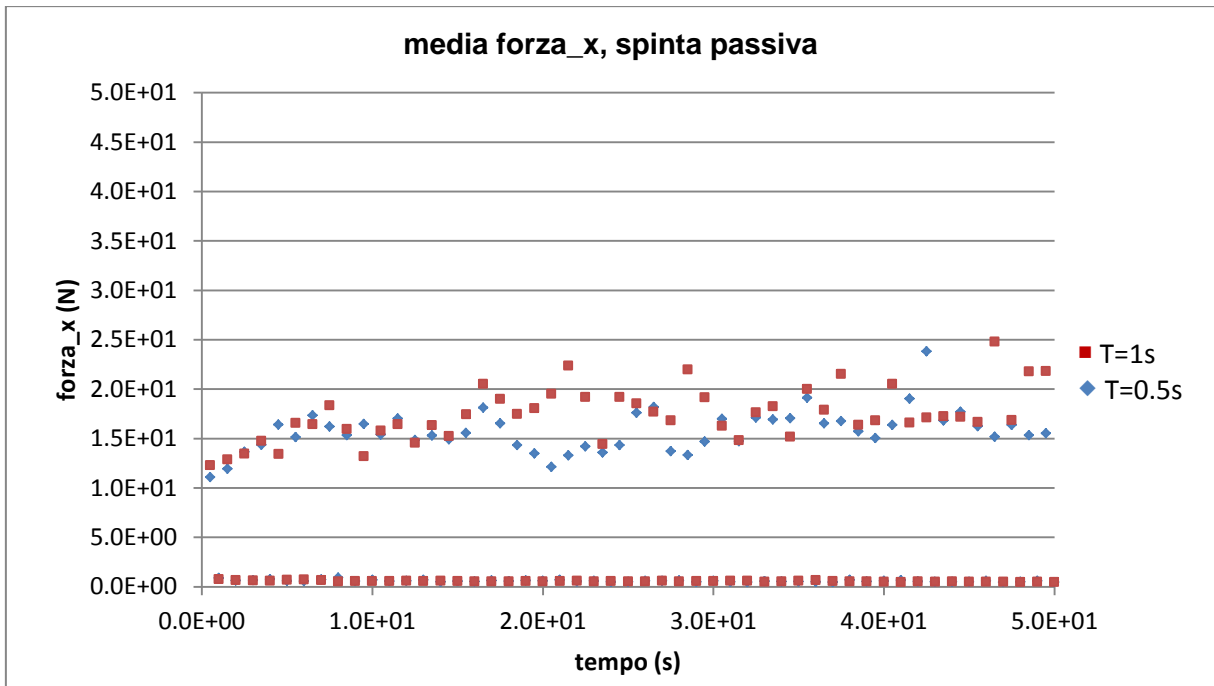


Grafico 6. 11 Medie delle spinte_x passive per $r_{me}=2.5\text{mm}$, $n=0.47$, $A=6\text{mm}$

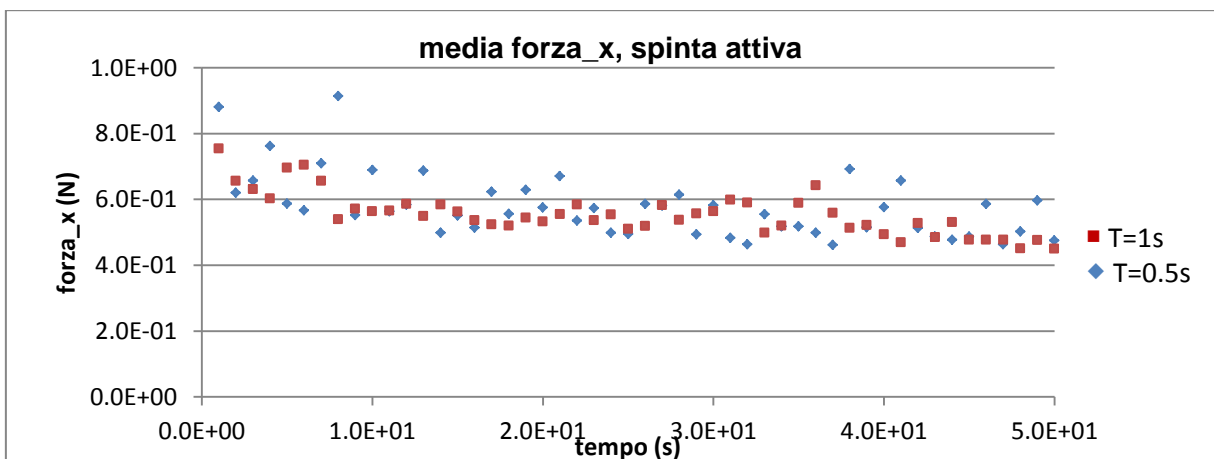


Grafico 6. 12 Medie delle spinte_x attive per $r_{me}=2.5\text{mm}$, $n=0.47$, $A=6\text{mm}$

I valori di forza medi delle due simulazioni sono state determinati per gli ultimi 50 valori misurati per la simulazione con $T=0.5\text{s}$ e per gli ultimi 100 valori misurati (corrispondenti a $0.5T$); questo proprio per la maggior disponibilità di valori nel secondo caso.

Dal grafico dell'andamento delle medie si nota come negli ultimi cicli i valori della forza passiva risultino più disturbati; questo dipende dal fatto che la spinta passiva presenta un picco finale sempre più accentuato all'aumentare del tempo. In questi ultimi cicli quindi la media non risulta più molto rappresentativa.

Dato che le due simulazioni con $T=1\text{ s}$ e $T=0.5\text{ s}$ presentano solo piccole differenze per quanto concerne le spinte sulla parete, la variabile periodo (legata alla velocità di spostamento della parete) può essere considerata ininfluente su questo tipo di problema e verrà in seguito esclusa dall'analisi.

6.2.3 Ampiezza

Viene valutata l'influenza dell'ampiezza di movimento della parete sul comportamento del modello; le simulazioni confrontate hanno entrambe $r_{mr}=1.5\text{mm}$, $n=0.47$ e $T=0.5\text{s}$.

Nei grafici 6.13 e 6.14 vengono raffigurate le spinte orizzontali misurate sulla parete mobile durante i primi e gli ultimi cicli.

Si osservano delle oscillazioni maggiori per una ampiezza di movimento della parete di 6mm. Durante i primi cicli (grafico 6.13) ad un movimento più ampio della parete corrispondono delle spinte orizzontali sull'aparte con un valore leggermente più alto.

Questo risultato è più marcato per i cicli finali di spinta passiva (grafico 6.14); infatti sembra che la forza misurata durante la simulazione con $A=6\text{mm}$ cresca più velocemente rispetto alla simulazione con $A=3\text{mm}$.

Viene riportato anche il grafico riguardante le medie della spinta (grafico 6.15).

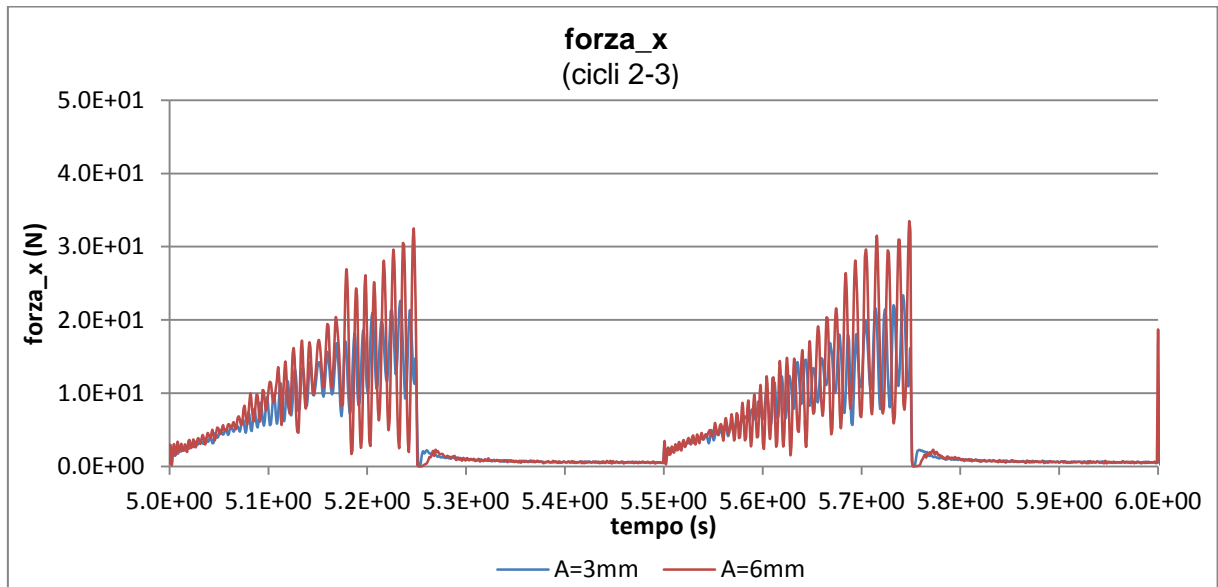


Grafico 6. 12 Andamento generale per i cicli iniziali

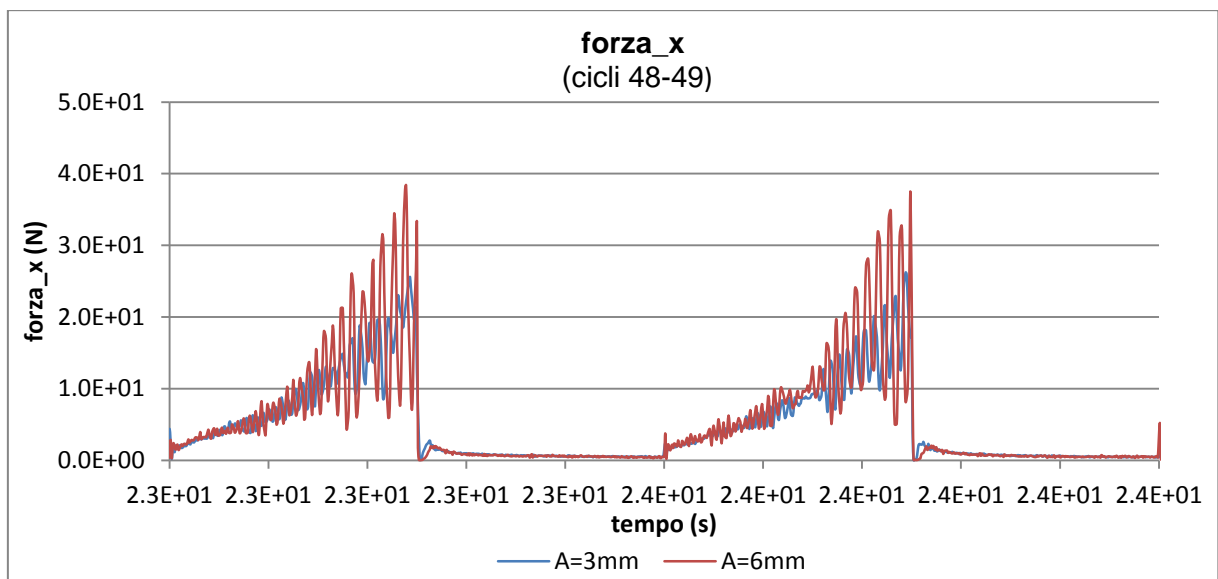


Grafico 6. 13 Andamento generale per i cicli finali

Osservando il grafico 6.15 i maggiori valori di spinta si vedono bene per i primi cicli.

Riguardo la spinta passiva la media risulta però poco adeguata nel descrivere l'ultima parte della prova: i valori infatti sono molto oscillanti, anche se complessivamente si può vedere come la maggior parte dei valori di spinta per ampiezze $A=6\text{mm}$ sia più grande dei valori per $A=3\text{mm}$.

Il discorso è un po' diverso per la media della spinta attiva; i valori si alternano in modo apparentemente casuale. Non si nota una legge chiara forse anche perché si sta sempre parlando di media. In seguito si indagano i massimi delle spinte.

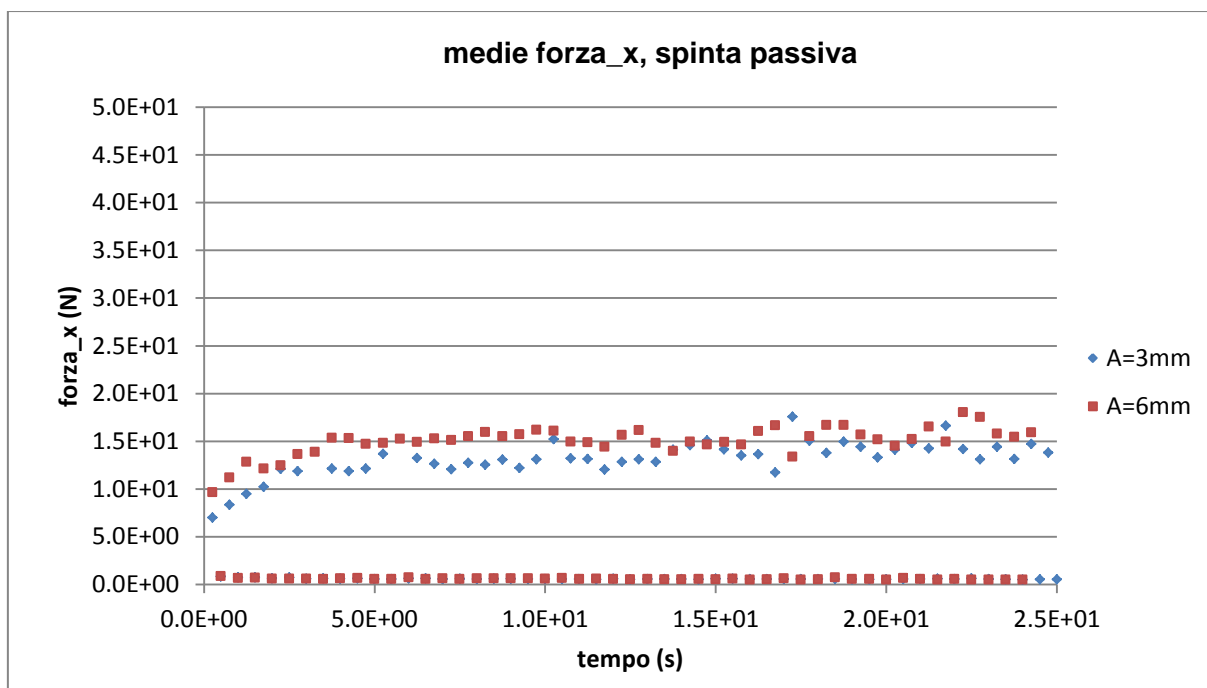


Grafico 6. 14 Medie delle spinte_x passive

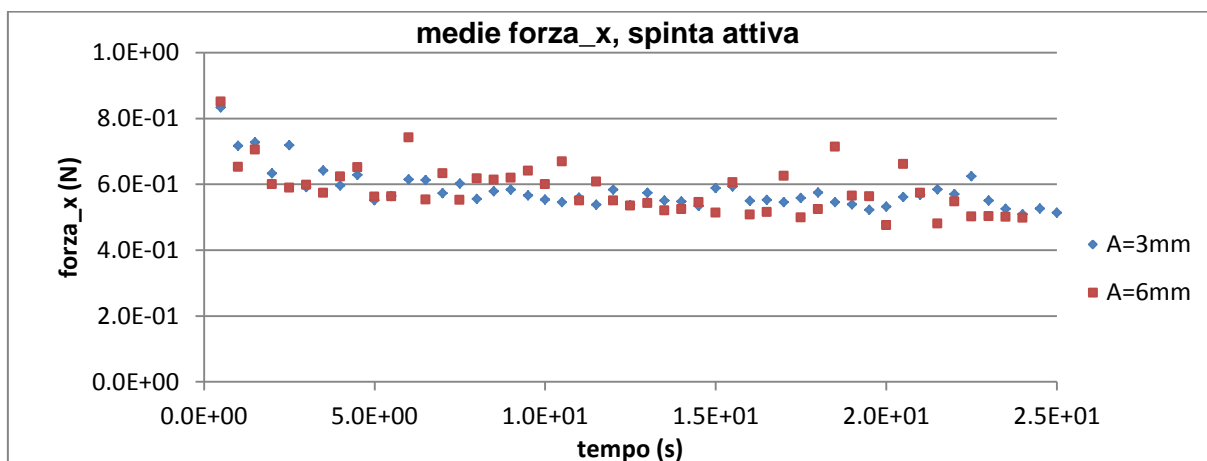


Grafico 6. 15 Medie delle spinte_x attive

Nei grafici 6.17 e 6.18 vengono raffigurati i massimi delle spinte. Si nota come la spinta attiva in realtà non abbia sempre un valore regolare anche se, per la maggior parte dei cicli, questo valore è maggiore per ampiezze maggiori.

Per quanto riguarda i massimi della spinta passiva, questi sono sempre maggiori per ampiezze maggiori.

L'andamento più "ordinato" delle medie non deve trarre in inganno in quanto in realtà il materiale viene sollecitato da sforzi di entità maggiore.

I grafici riguardanti medie e massimi sono sempre e comunque da considerare con cautela; sia per il carattere ciclico del fenomeno che si sta analizzando sia per il numero sempre modesto di particelle che sono rappresentate. Le medie e i massimi forniscono informazioni indicative che a volte possono mal rappresentare la variabile.

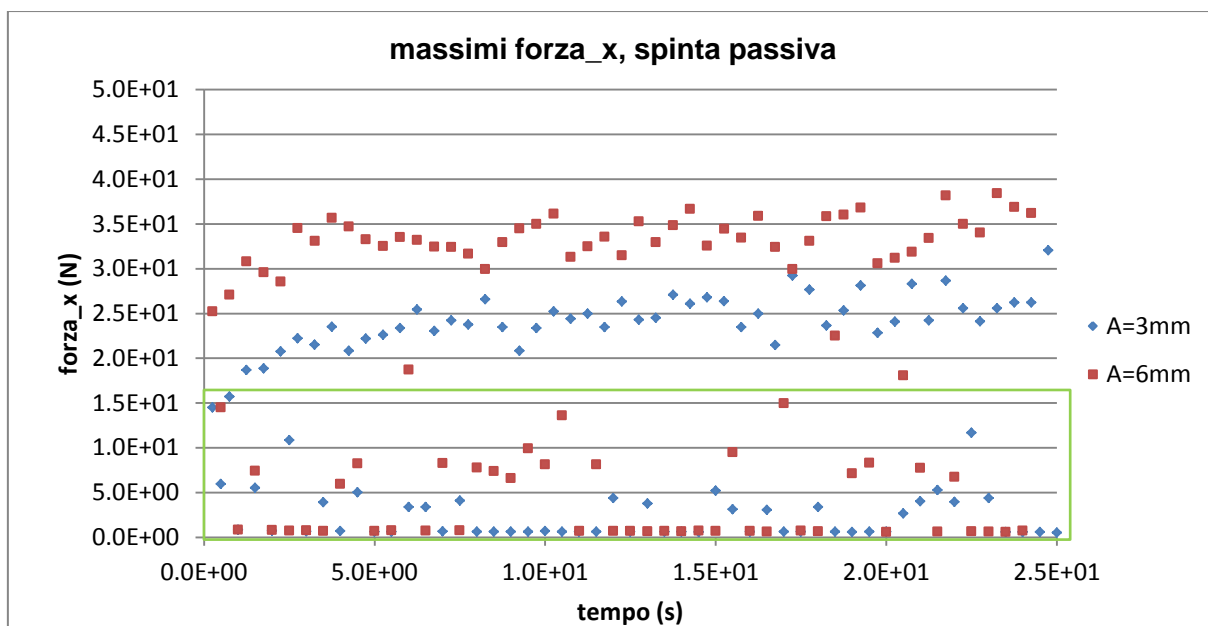


Grafico 6.16 Massimi delle spinte_x

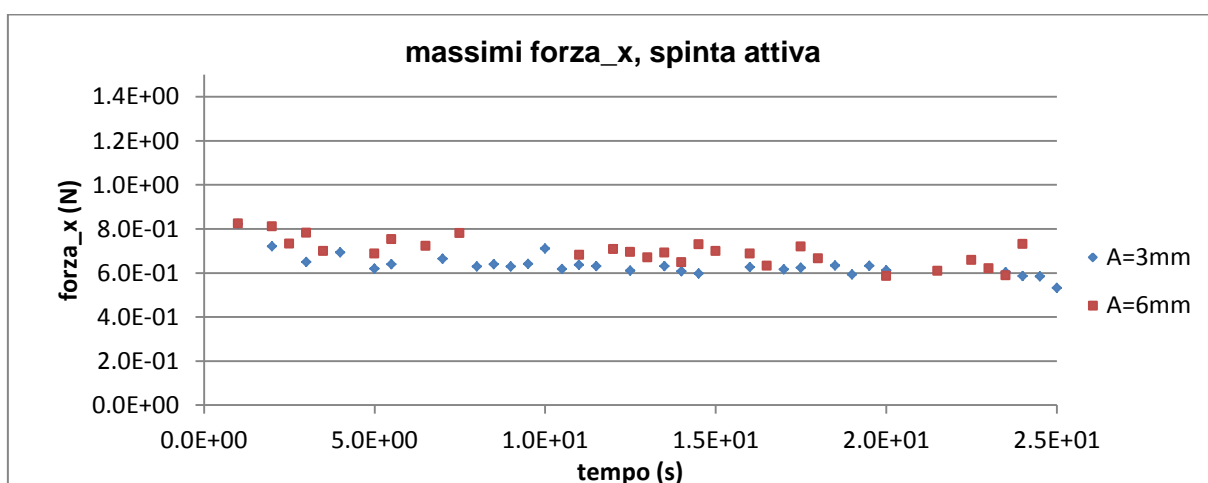


Grafico 6.17 Massimi delle spinte_x

In conclusione dai grafici raffiguranti i valori massimi si può ricavare che, per quanto riguarda la spinta:

- passiva: è maggiore per ampiezze maggiori
- attiva: solo per una metà sono più grandi i valori riguardo A=6mm
- attiva: alcuni valori sono molto più alti per A=6mm

6.2.4 Raggio

In questo paragrafo si confronteranno, a parità delle altre variabili, le simulazioni ottenute con particelle di diverso raggio. Si analizza il caso in cui l'ampiezza di spostamento sia $A=6\text{mm}$.

Le simulazioni che si confronteranno hanno due diverse porosità: $n=0.50$ ($r_{me}=1.0\text{mm}$) e $n=0.47$ ($r_{me}=2.5$ e 1.5mm). Si è provato a confrontare comunque queste tre simulazioni, non scordando questo fatto.

Ancora una volta si analizza per primo l'andamento generale del fenomeno in termini di forza orizzontale sulla parete mobile.

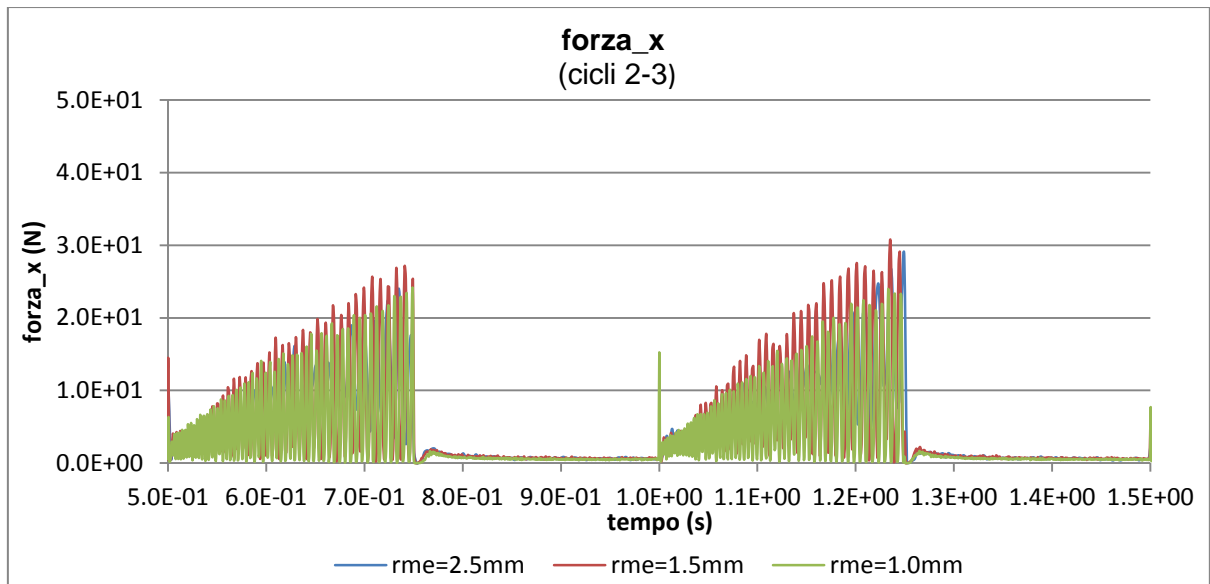


Grafico 6. 18 Andamento generale per i primi cicli

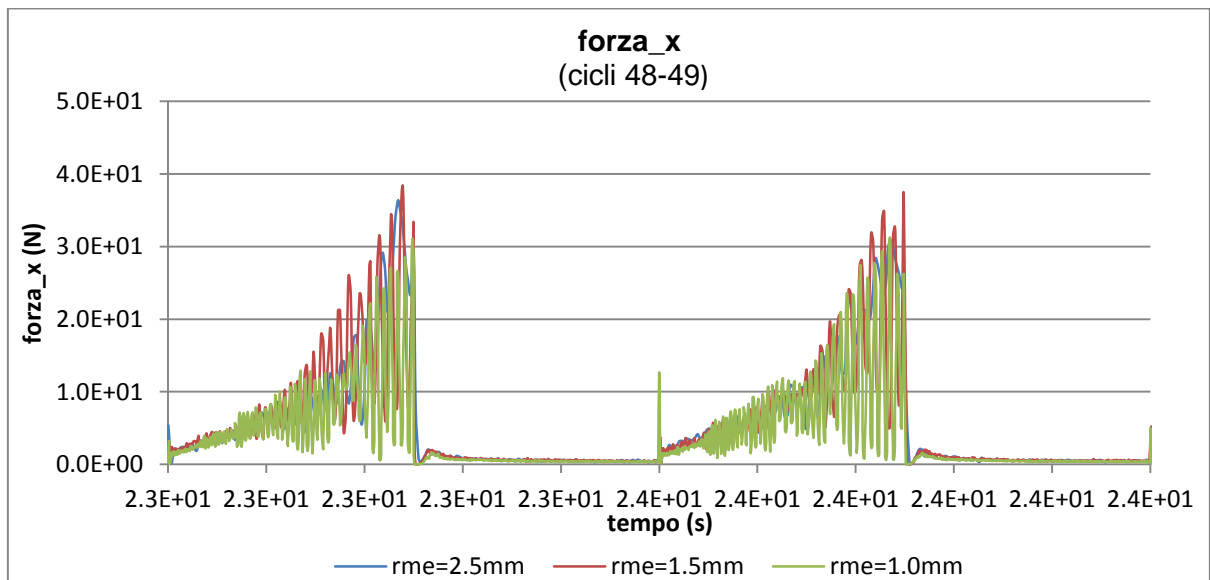


Grafico 6. 19 Andamento generale per gli ultimi cicli

L'andamento si differenzia al passare dei cicli. In linea generale per i primi cicli si nota un'oscillazione maggiore per le palline con raggio di 1.5mm . Ancora una volta le differenze riguardano solo la spinta passiva.

Per quanto riguarda la spinta attiva una piccola differenza è proprio all'inizio della fase attiva (grafico 6.21); tutte le simulazioni presentano un minimo che poi risale velocemente al valore massimo, raggiunto qui dalle particelle con raggio maggiore. Da qui la forza diminuisce molto velocemente per oscillare attorno ad un valore circa costante. Questo valore diminuisce all'aumentare dei cicli (grafico 6.23, spinta attiva)

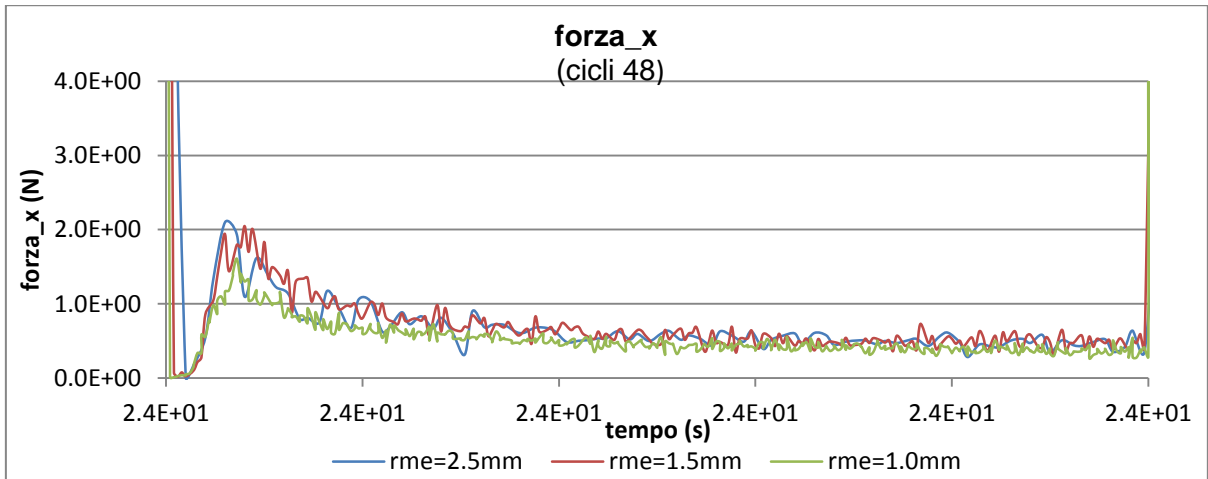


Grafico 6. 20 Particolare della spinta attiva

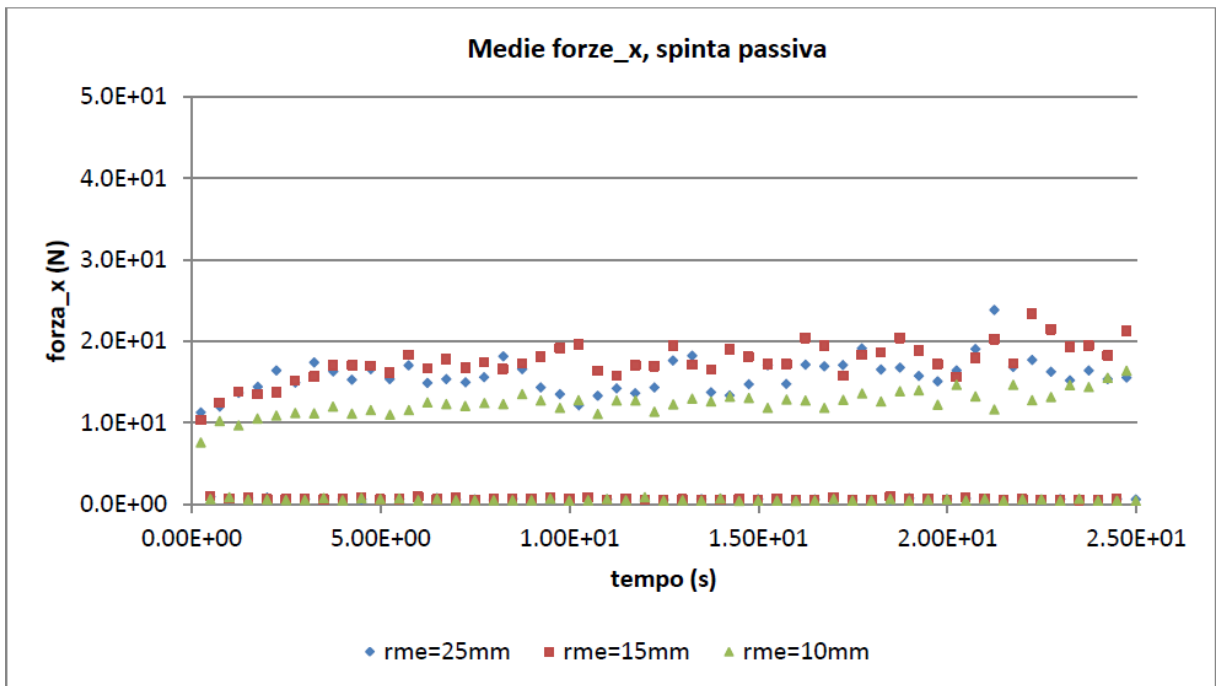


Grafico 6. 21 Medie delle spinte

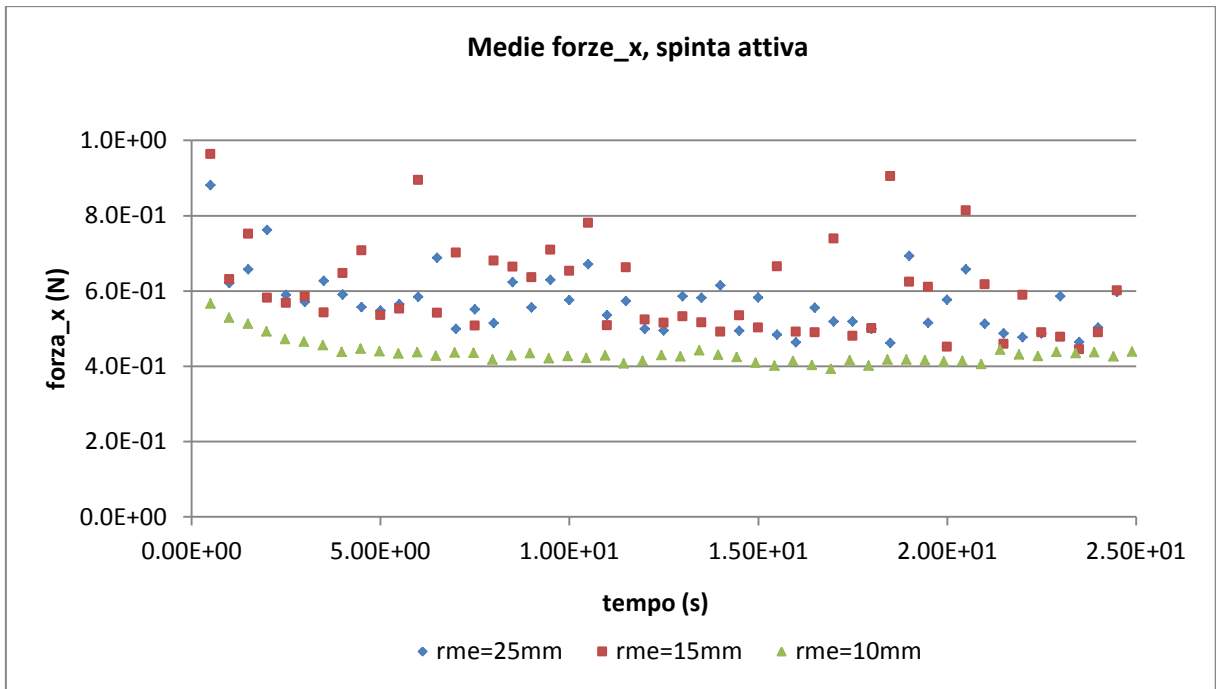


Grafico 6. 22 Medie delle spinte

Dai grafici 6.22 e 6.23 non è possibile individuare una tendenza particolare: infatti ci sono cicli per cui il valore maggiore compete al raggio intermedio; in altri casi è il raggio maggiore ad avere spinte più grandi. Bisogna anche ricordare però che le particelle

La media dei valori di spinta attiva in ogni caso varia tra un intervallo di valori contenuto. Si può concludere che a raggio minore corrispondano spinte lievemente superiori. Il valore minore della simulazione con $r=1.0\text{mm}$ può essere imputabile alla differente porosità.

Come andamento generale però si può dire che il valore finale di spinta passiva viene raggiunto dopo un iniziale tendenza crescente, come per gli altri casi.

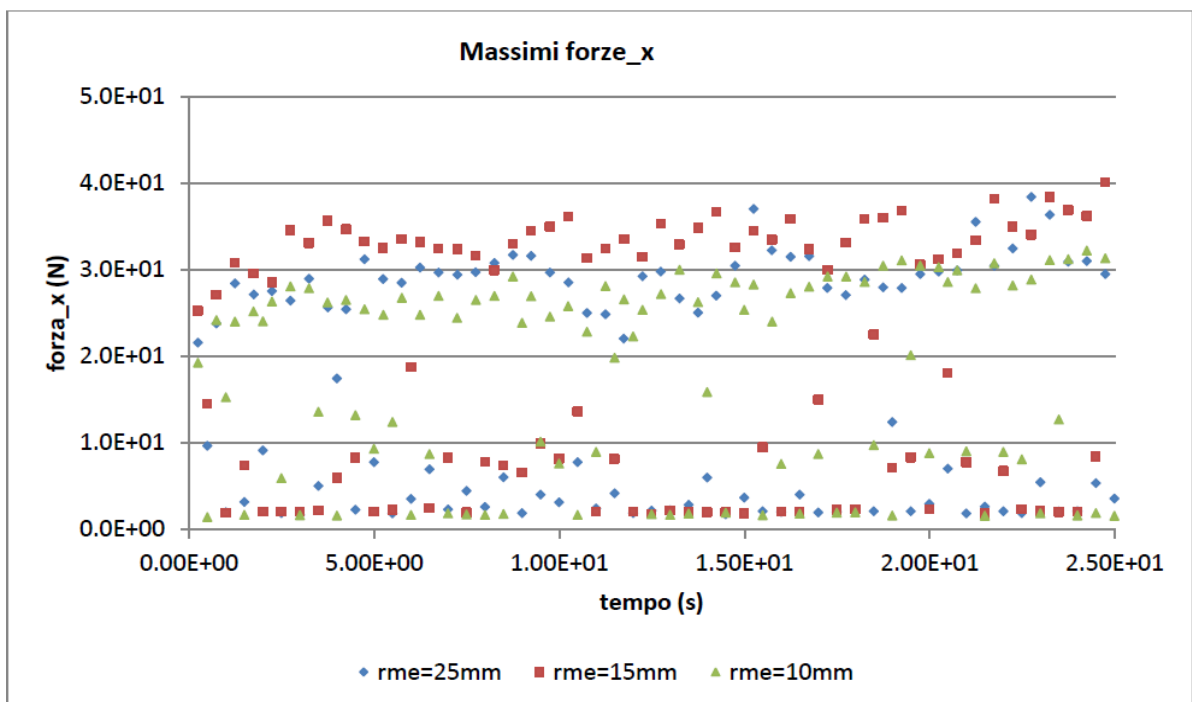


Grafico 6. 23 Massimi delle spinte

Il grafico riguardante i massimi (6.24) dimostra ancora che per la spinta passiva si hanno valori massimi per raggi di 1.5mm.

La spinta attiva massima dimostra invece una grande dispersione.

6.3 Cuneo di spinta

Dalle teorie di spinta delle terre, viene previsto un volume coinvolto dagli spostamenti diverso nel caso si parli dell'una o dell'altra spinta; in ogni caso questo è considerato a prescindere dal tempo. In questo paragrafo si vuole analizzare se questa ipotesi trova riscontro nel caso particolare di sollecitazioni cicliche quale il ratcheting.

L'estrapolazione dei dati avviene attraverso l'utilizzo del programma Matlab.

Si pongono a confronto la spinta attiva presente nel primo ciclo (1) quella a metà simulazione (ciclo 24) e quella finale (ciclo 48), mantenendo invariate tutte le altre caratteristiche. La spinta attiva riguarda la seconda parte del ciclo (fase 3-4;4-1).

La spinta di compressione invece si manifesta nelle fasi 1-2; 2-3.

La prova analizzata di seguito riguarda la simulazione con $r_{me}=1.5\text{mm}$, $n=0.47$ e ampiezza maggiore, questo perché da come si è visto nel paragrafo 6.2.3 i valori di forza sono maggiori e quindi (si crede) più visibili.

L'elaborazione è stata fatta anche con una prova con uguale raggio e porosità ma diversa ampiezza; i risultati sono gli stessi descritti in questi paragrafi.

6.3.1 Spinta passiva

Le immagini seguenti rappresentano gli spostamenti totali in caso di spinta passiva

- durante il primo ciclo, fasi 1-2 e 2-3 (immagine 6.1)
- durante il ciclo 24, fasi 1-2 e 2-3 (immagine 6.2)
- durante il ciclo 48 fasi 1-2 e 2-3 (immagine 6.3)

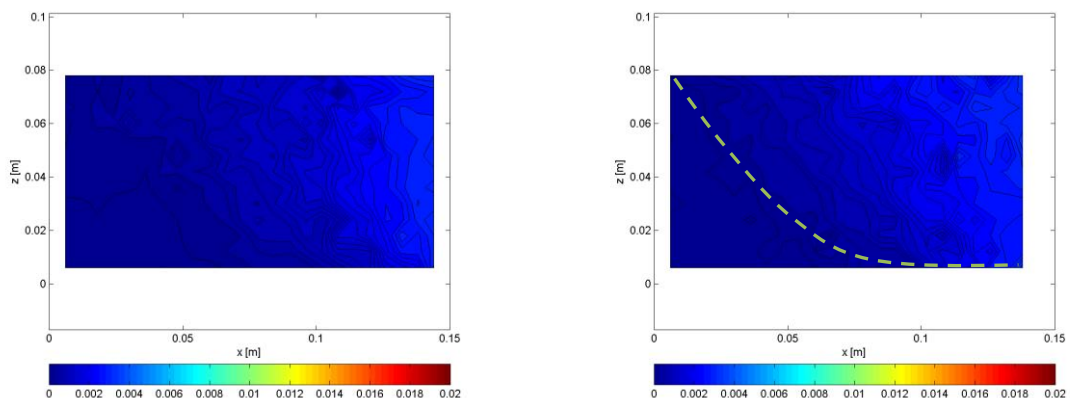


Immagine 6. 1 Ciclo 1: spinta passiva

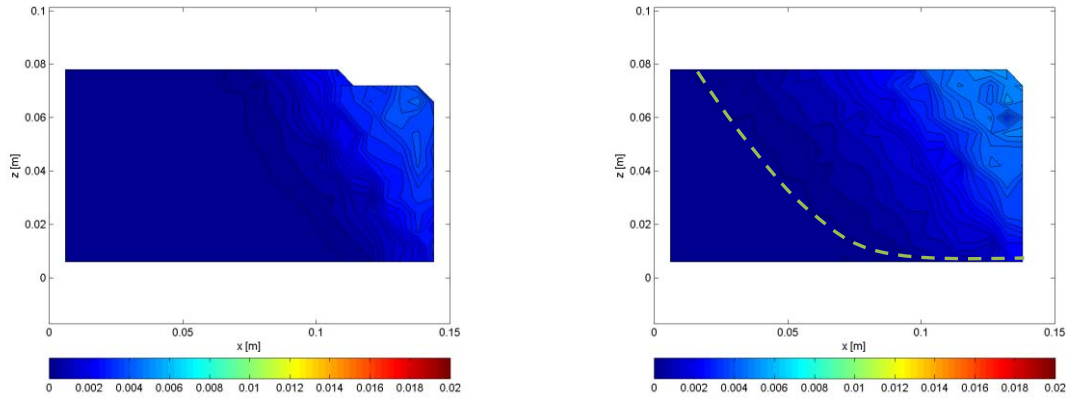


Immagine 6. 2 Ciclo 24: spinta passiva

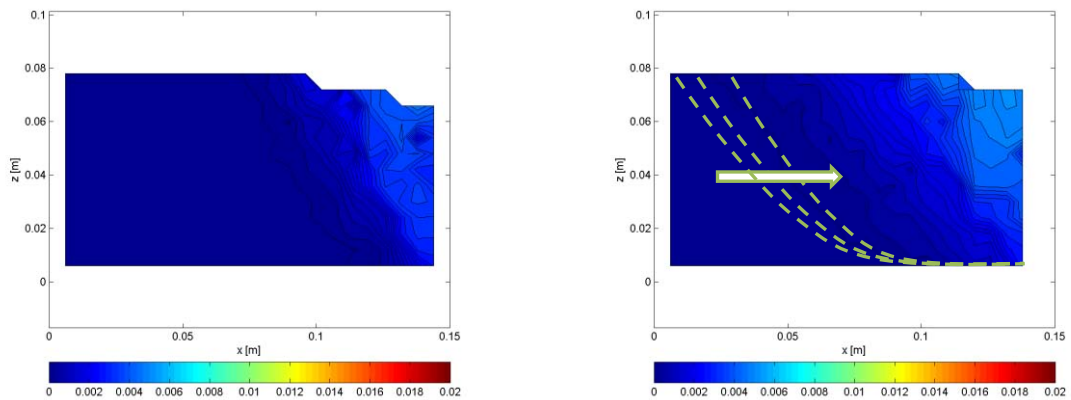


Immagine 6. 3 Ciclo 48: spinta passiva

Ciò che si nota è che durante i primi cicli il volume coinvolto in spinta passiva è maggiore; gli spostamenti interessano quasi tutto il materiale.

Con lo scorrere del tempo il volume diventa più definito; si sposta verso destra (come indicato dalla freccia), diminuendo l'area interessata da spinta passiva

Le immagini si riferiscono agli spostamenti misurati come differenza della posizione di una particella tra due step successivi.

6.3.2 Spinta attiva

Allo stesso modo, per la spinta attiva risultano le seguenti immagini (6.4, 6.5, 6.6):

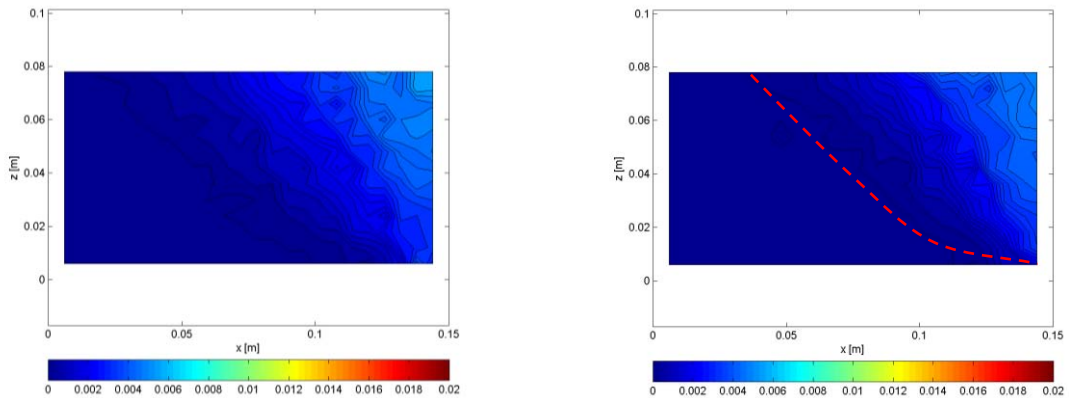


Immagine 6. 4 Ciclo 1: spinta attiva

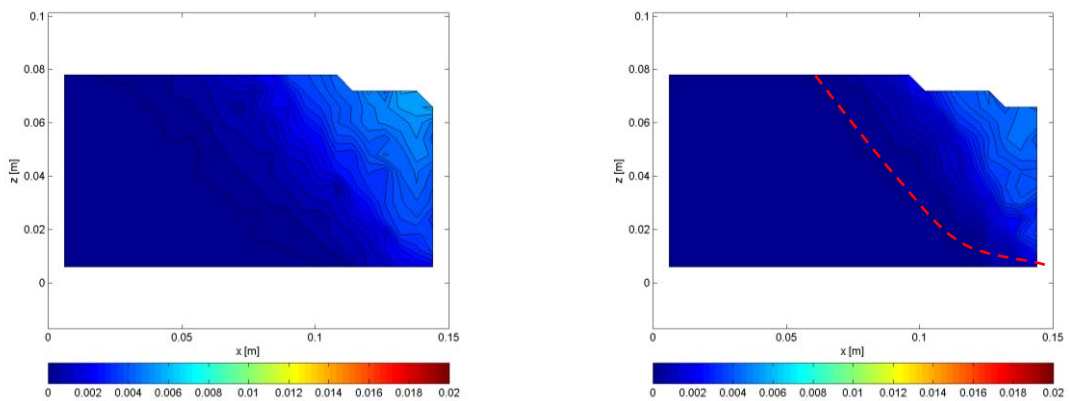


Immagine 6. 5 Ciclo 24: spinta attiva

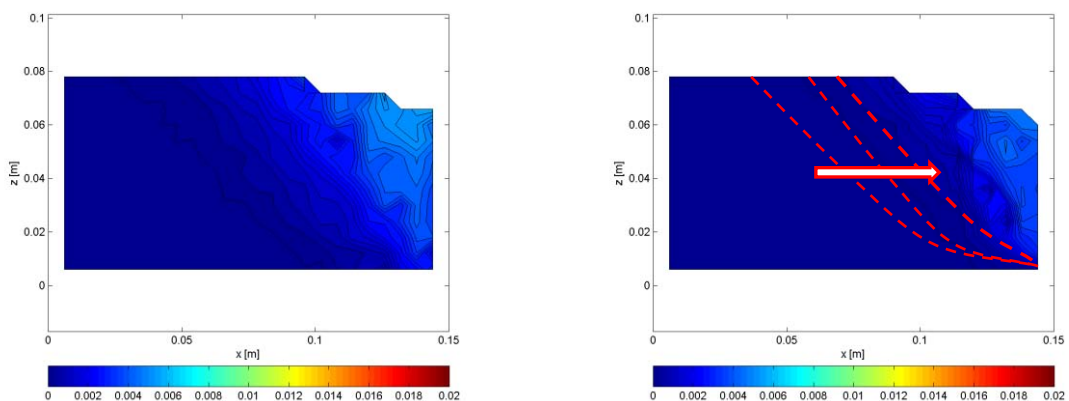


Immagine 6. 6 Ciclo 48: spinta attiva

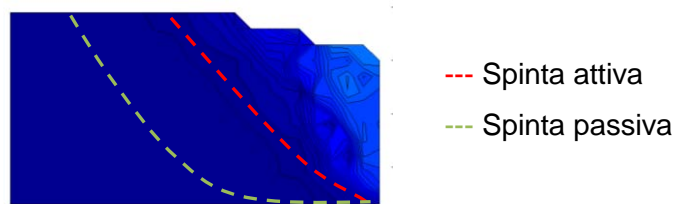
Ancora una volta il volume coinvolto non è costante, ma diminuisce all'aumentare dei cicli. All'inizio il volume è molto diverso dal volume calcolato tradizionalmente di spinta attiva. Questa superficie infatti è ancora la TBS, e non coincide con la superficie di spinta attiva fino alla fase 4 , con angoli diversi per spinta attiva e passiva; alla fine questo volume ancora una volta diminuisce, diventando quello previsto dalla teoria.

6.3.3 Confronto tra spinte

Durante il ciclo 1 la spinta passiva coinvolge un volume maggiore del materiale (V_p) rispetto la spinta attiva (V_a).

All'aumentare dei cicli però questa differenza si assottiglia. Guardando l'immagine 6.3 e la 6.6 V_p è quasi uguale a V_a ; in particolare, nel lungo termine, le due spinte portano ad avere nel materiale un zona azzurra con uguali spostamenti.

Il V_p rimane comunque maggiore, in quanto alla parte azzurra si somma la zona più a sinistra, che presenta spostamenti più piccoli (particolare 6.1).

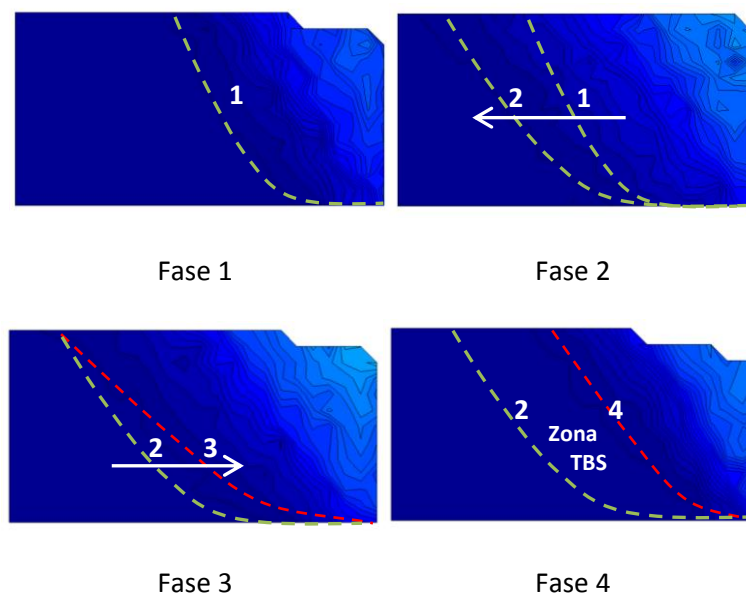


Particolare 6. 1 Diversità di volume di spinte, ciclo 48

L'entità degli spostamenti totali è più omogenea per i primi cicli. Con il tempo però questi spostamenti tendono a spostarsi verso destra, concentrandosi alle spalle della parete, in entrambe le spinte.

La spinta attiva provoca dei movimenti maggiori nei primi cicli; questa tendenza rimane durante tutta la simulazione anche se verso la fine la differenza diminuisce.

Durante la fase di carico e scarico la superficie che divide la zona "tensionalmente attiva" e quella inattiva, ossia la superficie di transizione (TBS), varia; sarà sempre compresa tra quella di spinta attiva e passiva e coinciderà con queste rispettivamente nella fase 4 (attiva) e nella fase 2 (passiva):



Particolare 6. 2 Variazione della TBS (particolare del ciclo 24)

6.4 Campo di spostamenti

In questo paragrafo si valutano i cedimenti nel tempo per una singola simulazione (6.4.1) e tra una o più simulazioni (6.4.2), facendo variare porosità, ampiezza e raggio delle particelle. Il primo caso consente di vedere la modalità di maturazione dei cedimenti all'aumentare dei cicli e di rappresentare quindi il ratcheting (stesso step per tutti i cicli) per un solo materiale. Il paragrafo 6.4.2 consente di valutare come questi cedimenti cumulati variano, per i diversi materiali di prova. Si tenta quindi di trovare la sensibilità del fenomeno al variare di p , a e r_{me} .

6.4.1 Il ratcheting all'aumentare dei cicli

La simulazione utilizzata per questa analisi ha particelle con raggio 1.0mm e un'ampiezza $A=6\text{mm}$.

All'interno di Matlab verranno inseriti gli istanti riguardanti la stessa posizione della parete; viene scelta la seconda fase della compressione del provino (fase 2).

Per sinteticità i cicli analizzati e qui riportati sono solamente alcuni cicli significativi, i cicli 3-6-12-24-48.

Le immagini riportano gli spostamenti totali (verificatisi tra due successivi) e quelli cumulati.

Lo scopo è indagare come si sviluppa il fenomeno nel tempo.

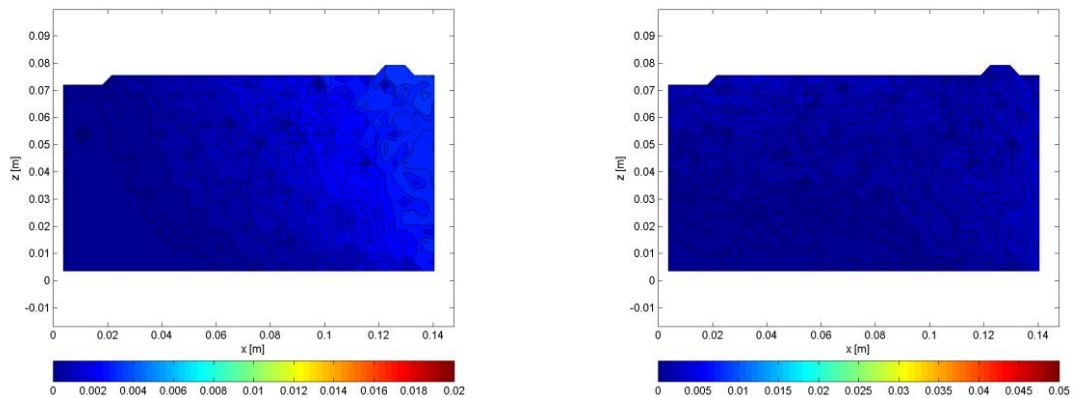


Immagine 6. 7 CICLO 1. Spostamenti totali e spostamenti cumulati

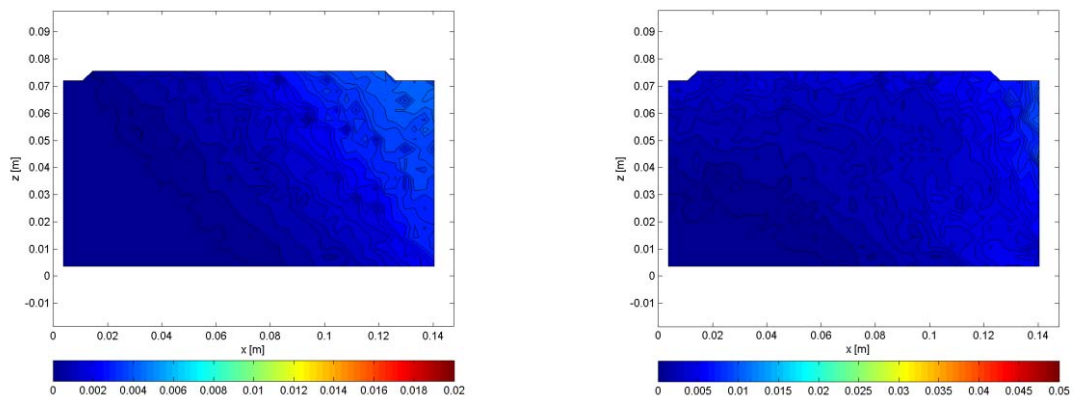


Immagine 6. 8 CICLO 3. Spostamenti totali e spostamenti cumulati

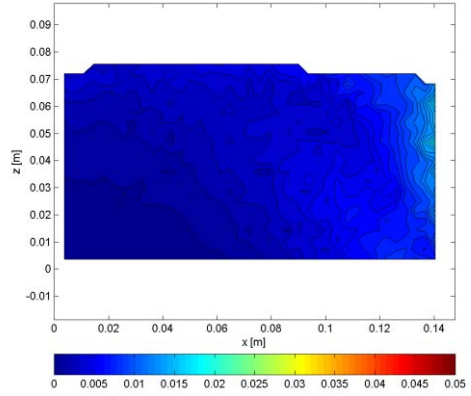
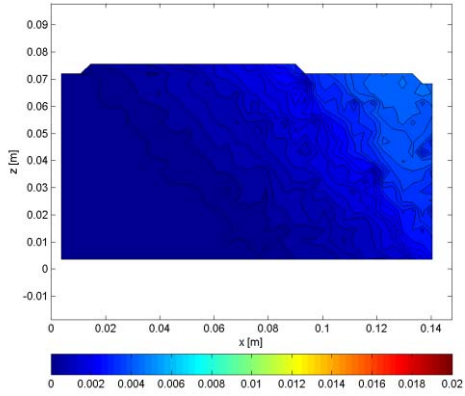


Immagine 6. 9 CICLO 6. Spostamenti totali e spostamenti cumulati

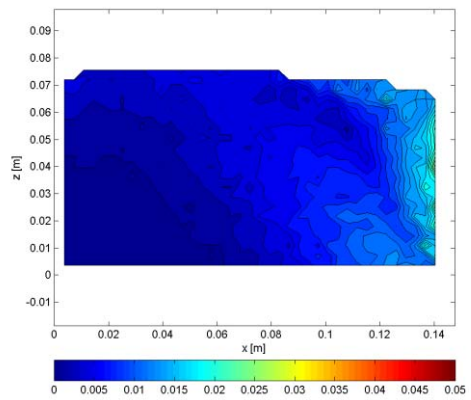
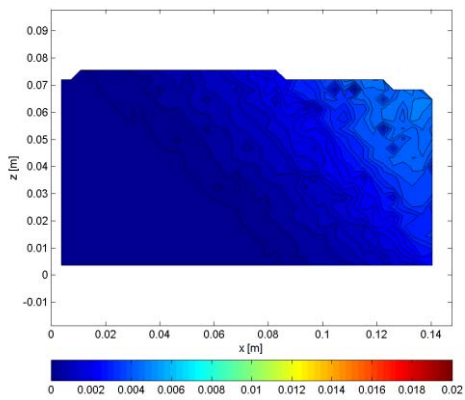


Immagine 6. 10 CICLO 12. Spostamenti totali e spostamenti cumulati

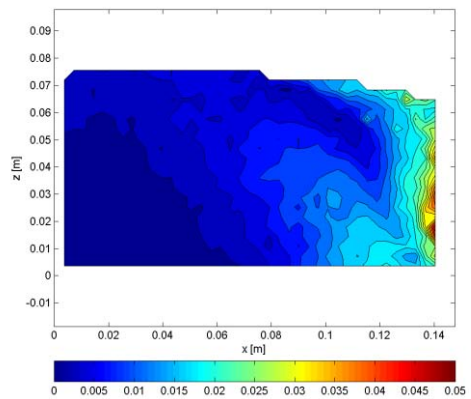
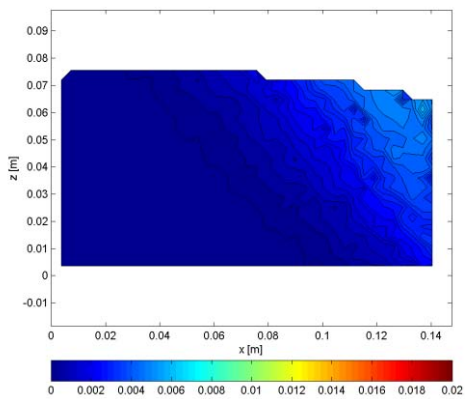


Immagine 6. 11 CICLO 24. Spostamenti totali e spostamenti cumulati

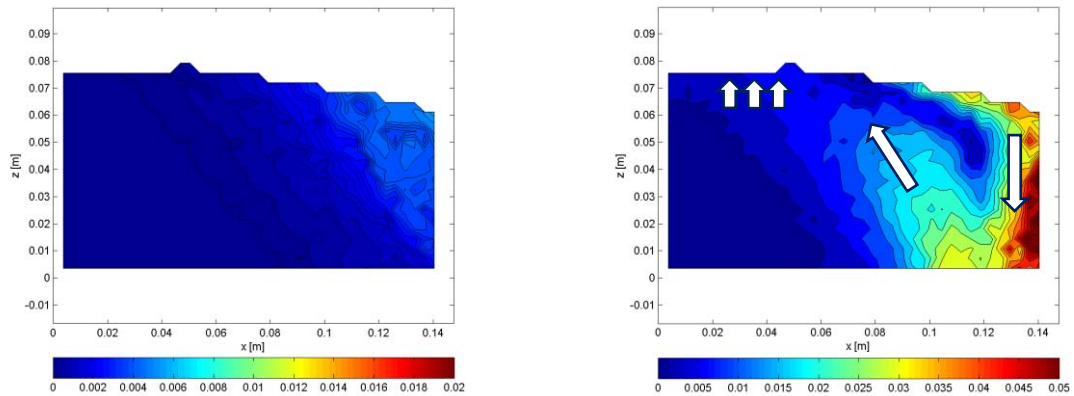


Immagine 6. 12 CICLO 48. Spostamenti totali e spostamenti cumulati

Al compimento di ogni ciclo, le particelle subiscono circa lo stesso campo di spostamenti totali; la parte a contatto con la parete dimostra spostamenti maggiori mentre allontanandosi dalla parete questi via via diminuiscono. L'entità del campo di spostamenti rimane costante di ciclo in ciclo, individuando una zona in cui gli spostamenti cumulati aumentano più velocemente (vicino alla parete, zona rosso scuro) rispetto alla seconda zona (lontano alla parete, azzurro chiaro).

Gli spostamenti totali maggiori si hanno per i grani a contatto diretto con la parete.

Questa considerazione è valida anche per gli spostamenti cumulati che ovviamente crescono all'aumentare dei cicli. Le particelle con maggior mobilitazione sono verso la parte bassa del modello e sono, dopo 50 cicli di carico-scarico, di circa 5cm per particelle di raggio 1.0mm; sono quindi più del doppio del loro diametro.

E' interessante notare che al passare dei cicli si creano dei nuclei con minor volume di vuoti; questi tendono ad aumentare e a creare all'interno del provino delle zone compatte "cristalline" e quindi più resistenti alla sollecitazione (figura 6.1). Queste zone si concentrano ovviamente nelle vicinanze della parete.

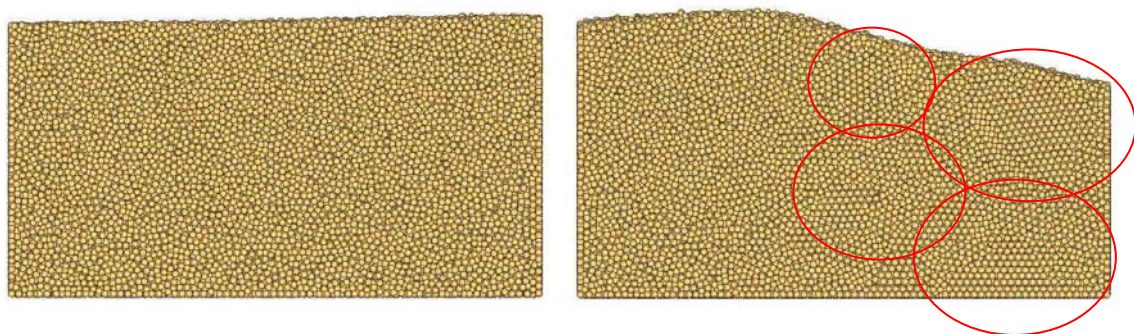


Figura 6. 3 Ciclo 1 e ciclo 48: compattazione del materiale

6.4.2 Il ratcheting al variare di n , T , A , r_{me}

Le prove qui confrontate hanno lo stesso periodo di scorrimento della parete.

Vengono analizzate tutte le fasi per alcuni cicli (3-6-12-24-48); le immagini riportate in questa sezione riguardano gli spostamenti cumulati all'aumentare dei cicli, ossia la differenza tra la posizione iniziale di una particella e quella raggiunta al ciclo n dalla stessa particella.

6.4.2.a Porosità

Si confrontano le simulazioni di raggio 2.5mm, $A=6$ mm. Le porosità sono 0.45 e 0.50.

Si ricorda che gli spostamenti raffigurati in questi paragrafi sono gli spostamenti cumulati della fase 1 (spinta passiva, inizio di compressione) per i cicli 3-6-12-24-48.

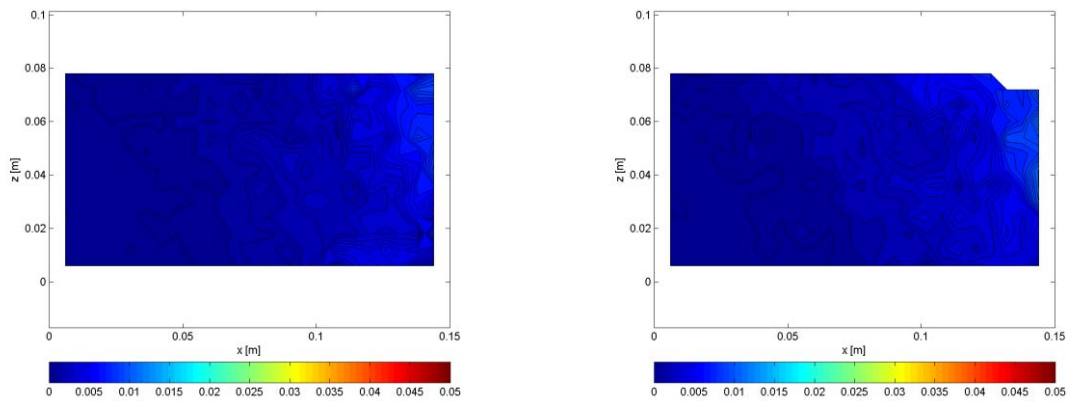


Immagine 6. 13 Spostamenti cumulati CICLO 3: $n=0.45$ e $n=0.50$

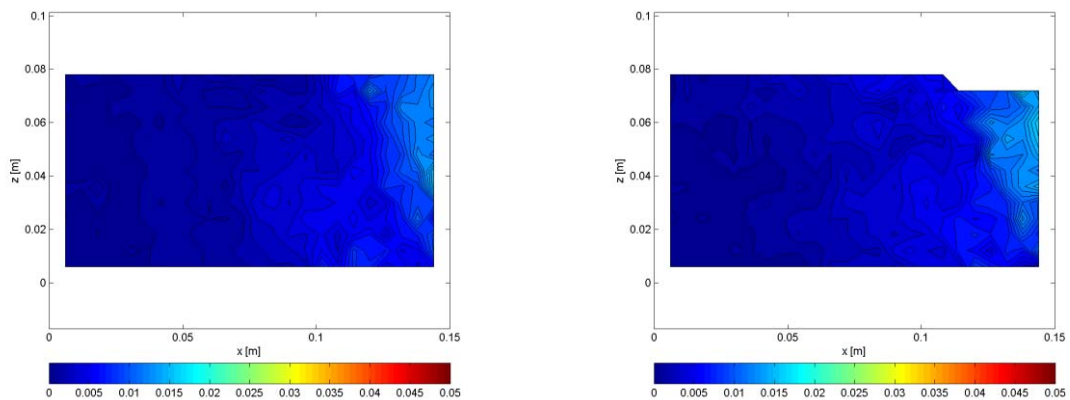


Immagine 6. 14 Spostamenti cumulati CICLO 6: $n=0.45$ e $n=0.50$

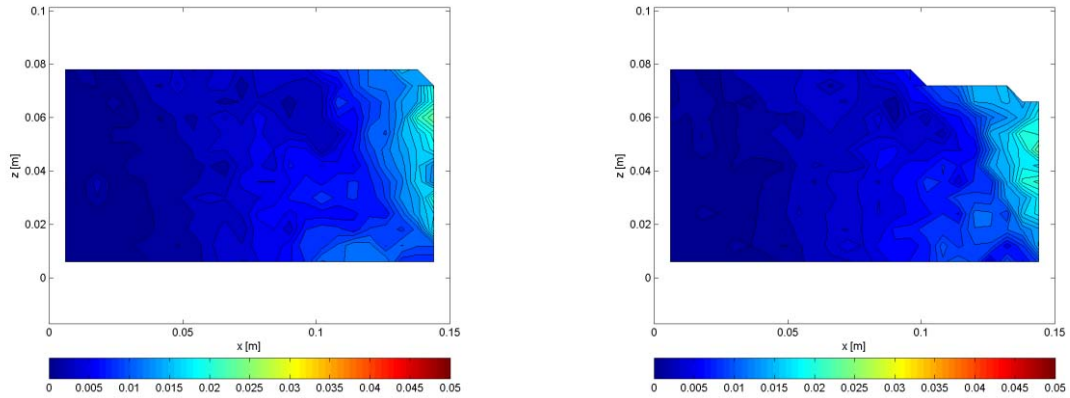


Immagine 6. 15 Spostamenti cumulati CICLO 12: $n=0.45$ e $n=0.50$

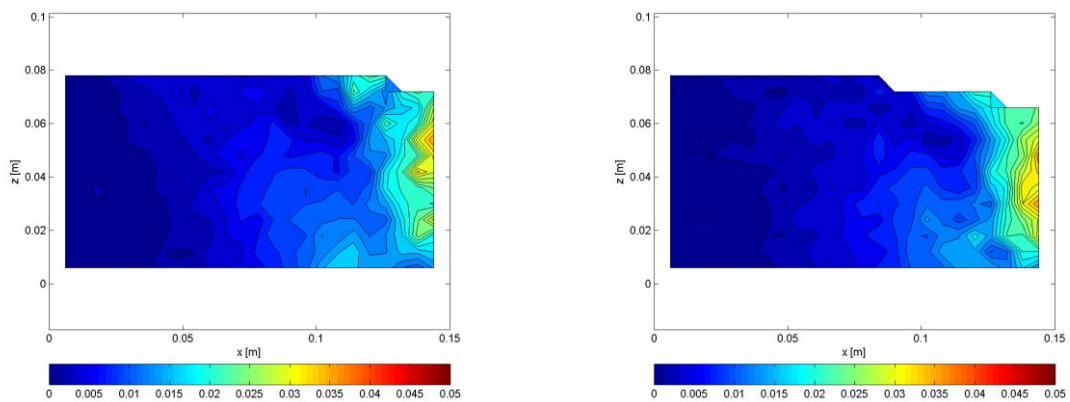


Immagine 6. 16 Spostamenti cumulati CICLO 24: $n=0.45$ e $n=0.50$

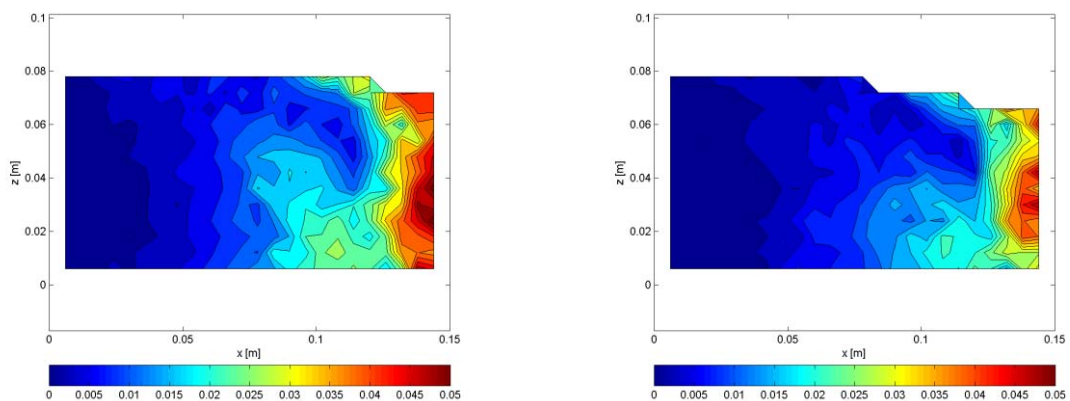


Immagine 6. 17 Spostamenti cumulati CICLO 48: $n=0.45$ e $n=0.50$

Il fenomeno del ratcheting, ossia l'accumulo di spostamenti all'interno del modello, trova conferma nelle immagini sopra. Con l'aumento dei cicli il materiale matura dei cedimenti causati dalla sollecitazione ciclica (paragrafo 6.4.1).

La deformazione si concentra in entrambi i casi nella zona a contatto con la parete mobile.

Il ratcheting si manifesta con più lentezza nel caso di $n=0.45$. Infatti all'inizio gli spostamenti sono minori rispetto al modello con $n=0.50$ (immagini 6.14 e 6.15). In seguito, all'aumento dei

cicli, il materiale con porosità minore presenta, a sorpresa, degli spostamenti maggiori che interessano tutta l'area alle spalle della parete.

Entrambi i provini iniziano a manifestare un flusso di materiale verso l'alto poco a monte della parete (zona azzurra) e questo flusso interessa maggiormente le particelle con porosità minore.

Già dall'immagine 6.17 si può anticipare che i cedimenti del piano campagna saranno maggiori per porosità maggiori, come ci si aspettava.

6.4.2.b Periodo

Si analizza ora l'influenza del periodo di movimento della parete sulla determinazione dei cedimenti del materiale. I periodi confrontati sono uno il doppio dell'altro, $T_1=0.5s$ e $T_2=1s$. I grafici riguardano ancora una volta lo step 2 di spinta passiva e gli spostamenti cumulati tra i cicli 1-3-6-12-24-48.

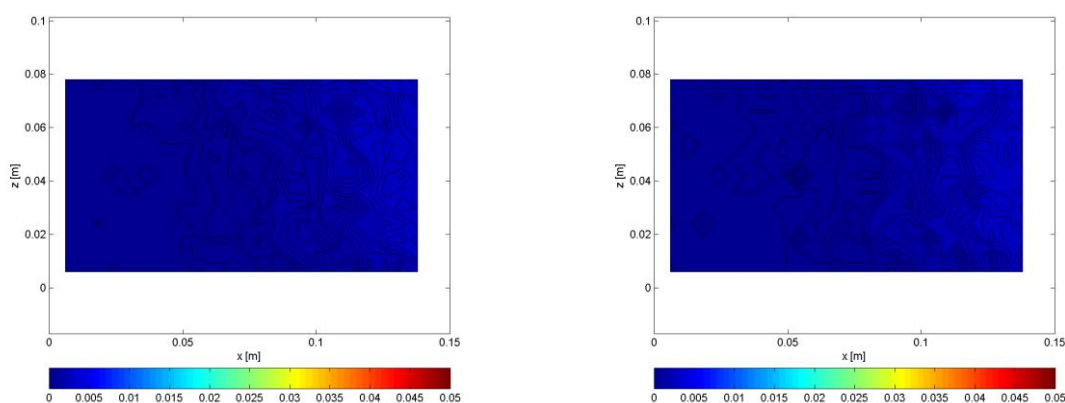


Immagine 6. 18 Spostamenti cumulati CICLO 1, T=0.5s e T=1s

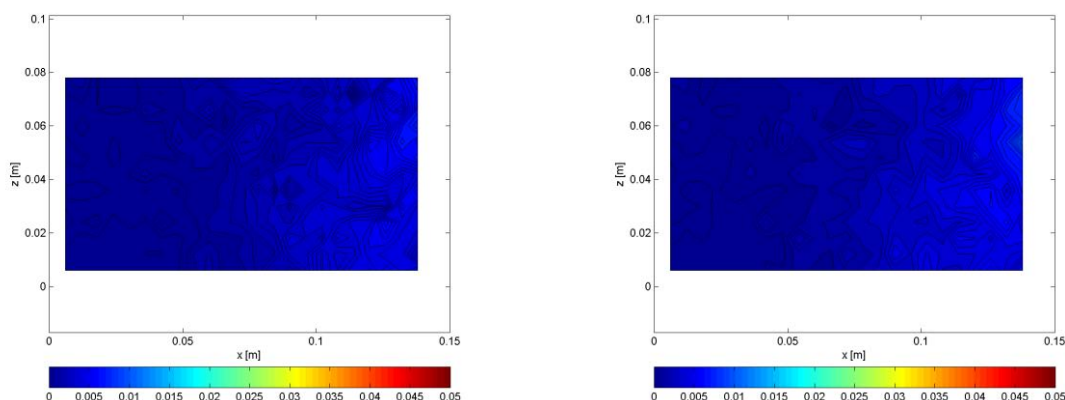


Immagine 6. 19 Spostamenti cumulati CICLO 3, T=0.5s e T=1s

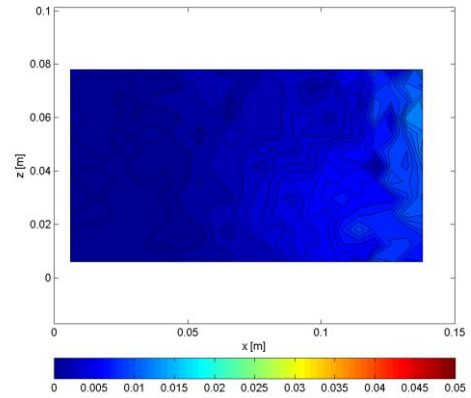
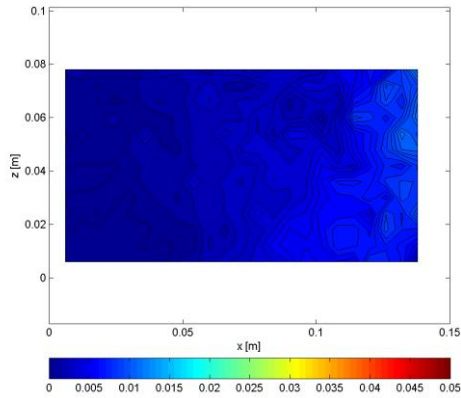


Immagine 6. 20 Spostamenti cumulati CICLO 6, T=0.5s e T=1s

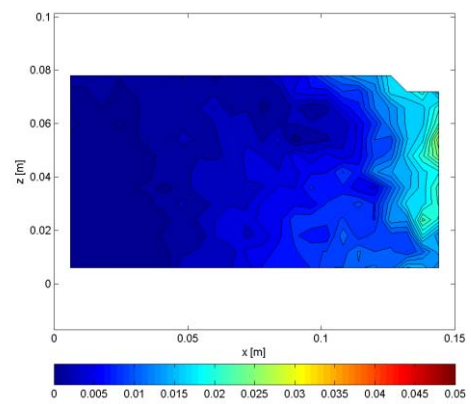
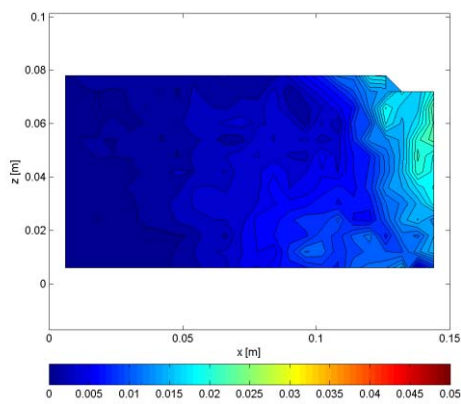


Immagine 6. 21 Spostamenti cumulati CICLO 12, T=0.5s e T=1s

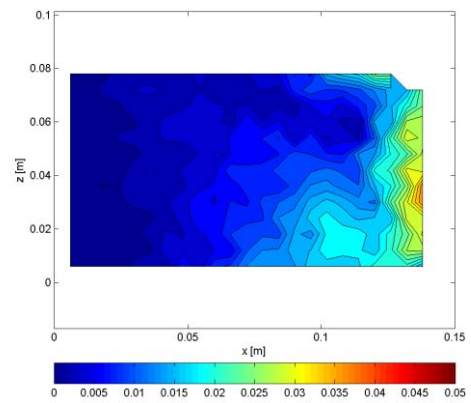
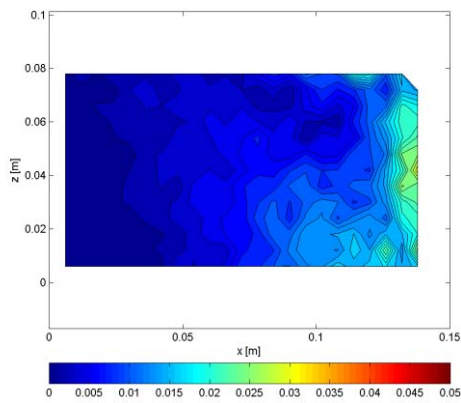


Immagine 6. 22 Spostamenti cumulati CICLO 24, T=0.5s e T=1s

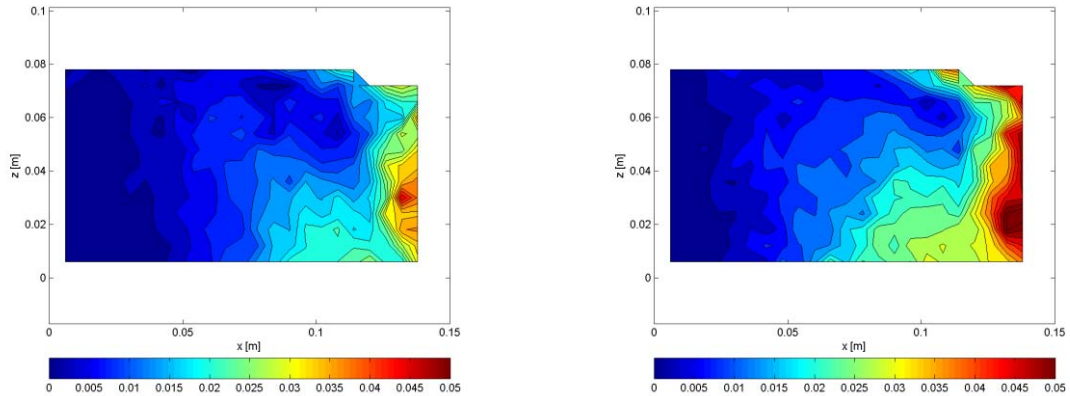


Immagine 6. 23 Spostamenti cumulati CICLO 48, T=0.5s e T=1s

Durante i primi cicli il comportamento del materiale è lo stesso: accumula deformazioni lentamente. Al ciclo 24 però gli spostamenti del materiale con periodo T maggiore risultano essere un po' più localizzati verso la parete. Con l'aumentare del numero di cicli questa discordanza si amplifica fino ad arrivare al ciclo 50. A questo punto il materiale con T maggiore manifesta delle deformazioni più grandi, quasi il doppio (3.5cm contro i 5cm). A differenza del calcolo della forza, il confronto tra simulazioni con due periodi diversi dimostra che la velocità di movimento della parete è importante nella determinazione dei cedimenti.

6.4.2.c Ampiezza

Si decide di valutare due ampiezze differenti per $r_{me}=1.5\text{mm}$ e $n=0.47$.

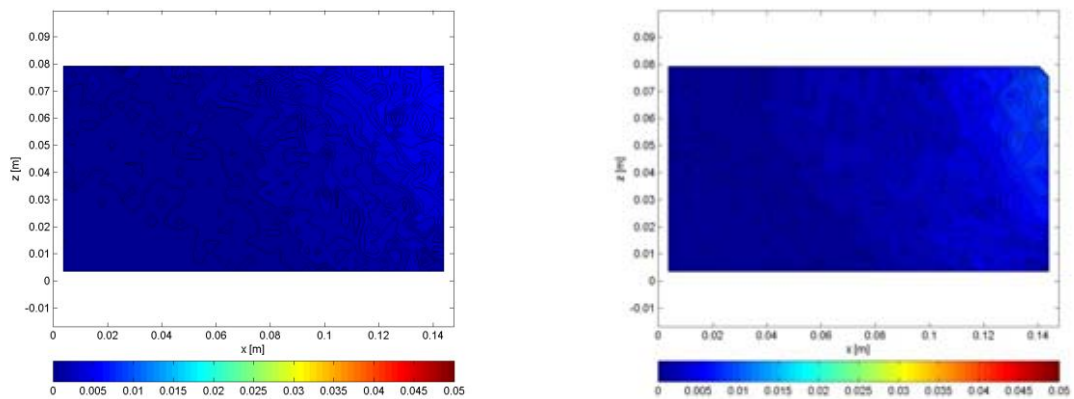


Immagine 6. 24 Spostamenti cumulati CICLO 3: A=3mm e A=6mm

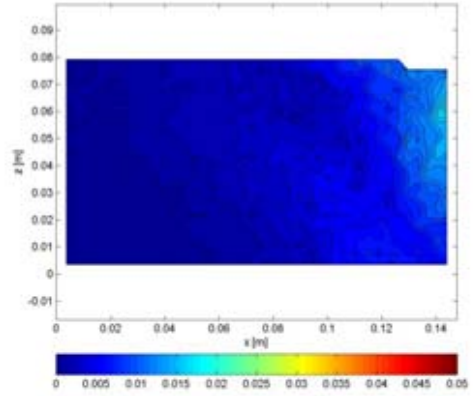
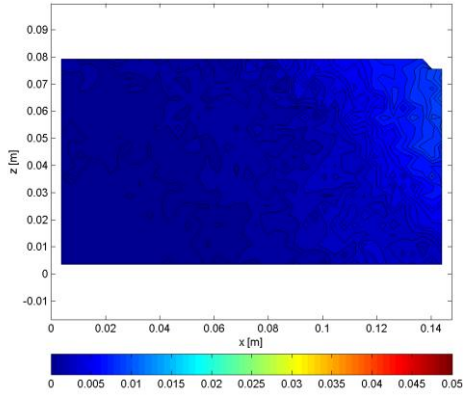


Immagine 6. 25 Spostamenti cumulati CICLO 6: A=3mm e A=6mm

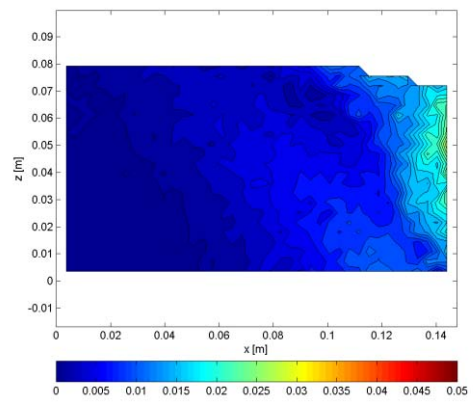
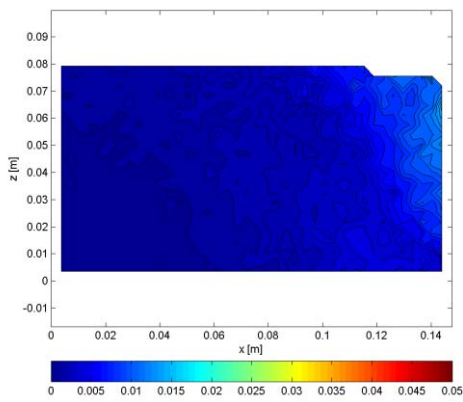


Immagine 6. 26 Spostamenti cumulati CICLO 12: A=3mm e A=6mm

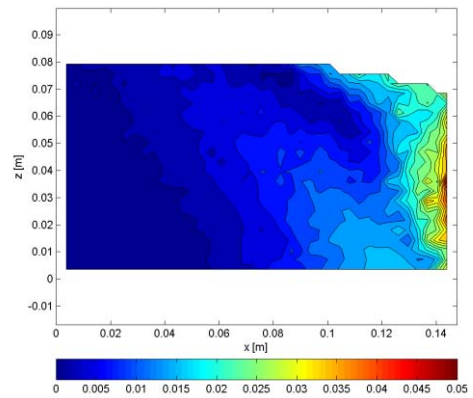
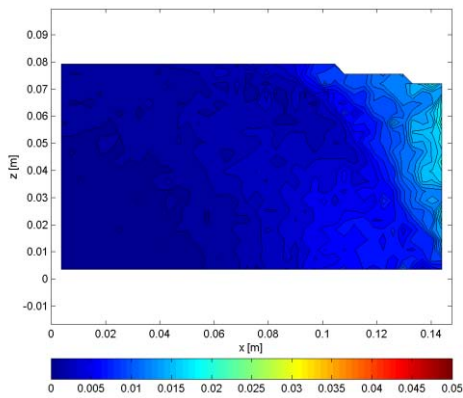


Immagine 6. 27 Spostamenti cumulati CICLO 24: A=3mm e A=6mm

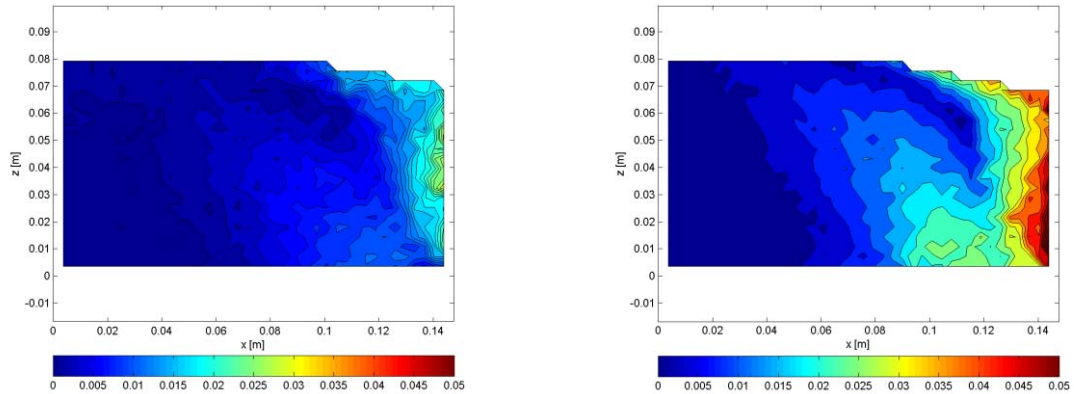


Immagine 6. 28 Spostamenti cumulati CICLO 48: A=3mm e A=6mm

Le deformazioni accumulate dalla simulazione con periodo maggiore sono molto più grandi (quasi il doppio); sono sempre concentrate nella zona di contatto della parete.

Gli spostamenti delle particelle sono di due tipi; le zone a contatto con la parete scivolano verso il basso. Le palline alla base però risalgono verso l'alto, comprimendo la zona superiore e dando inizio al flusso rotatorio tipico del ratcheting.

Il flusso non è immediato; occorrono più cicli per far sì che questo diventi evidente.

Il volume interessato è diverso; i cedimenti arrivano a toccare il piano campagna per la simulazione con ampiezza maggiore. Questo movimento verso l'alto si traduce in un sollevamento del materiale, che con ampiezze minori dell'oscillazione della parete mobile non si verifica.

Il materiale interessato da un movimento maggiore presenta una densificazione più estesa rispetto all'altro (figura 6.4), come ci si aspettava. Inoltre un'ampiezza maggiore provoca un maggior cedimento del piano campagna. In questa immagine è più immediato riconoscere il sollevamento; anche questo è un aspetto tipico del fenomeno analizzato.

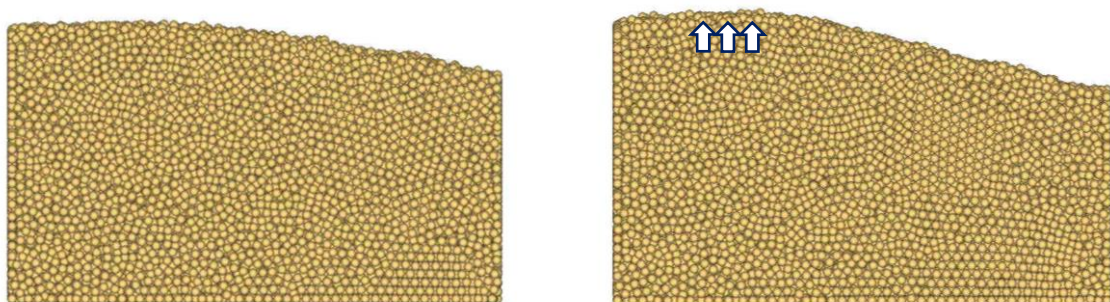


Figura 6. 4 Configurazione dei provini a fine prova: A=3mm e A=6mm

6.4.2.d Raggio

In questo caso si confrontano tre simulazioni con uguale ampiezza $A=6\text{mm}$ ma diverso raggio:

- $r_{me}=2.5\text{mm}$ ($n=0.47$)
- $r_{me}=1.5\text{mm}$ ($n=0.47$)
- $r_{me}=1.0\text{mm}$ ($n=0.50$)

La differenza di porosità tra i provini 1 e 2 è di 0.03. Dal paragrafo 6.4.2.a la porosità influiva sull'entità dei cedimenti, ma dato che in questo caso è davvero minima la si considera circa costante.

Anche in questo caso le immagini 6.24-6.28 riguardano la fase 1 di spinta passiva.

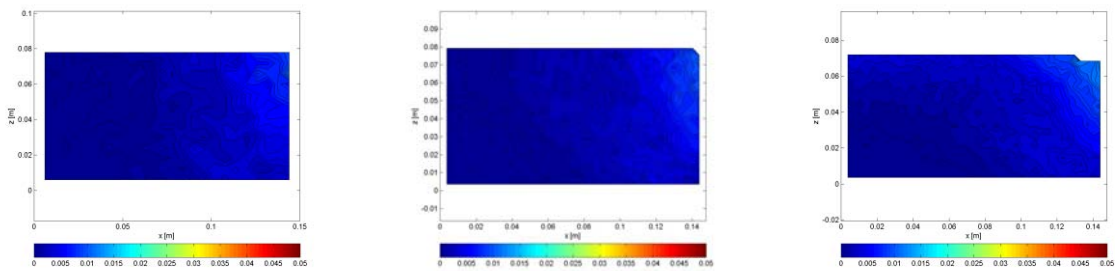


Immagine 6. 29 Spostamenti cumulati CICLO 3 $r=2.5\text{mm}$; $r=1.5\text{mm}$; $r=1.0\text{mm}$

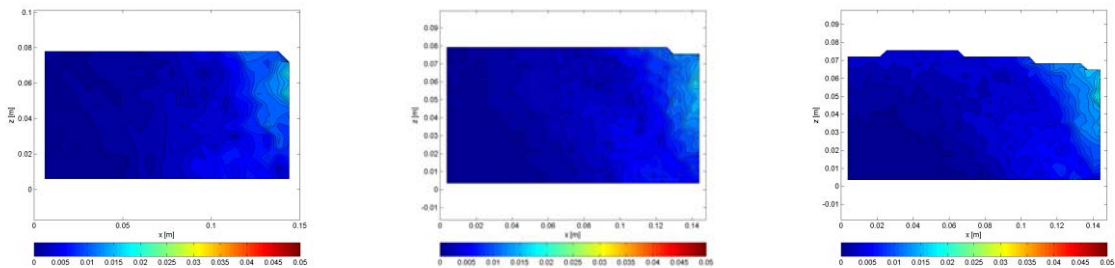


Immagine 6. 30 Spostamenti cumulati CICLO 6 $r=2.5\text{mm}$; $r=1.5\text{mm}$; $r=1.0\text{mm}$

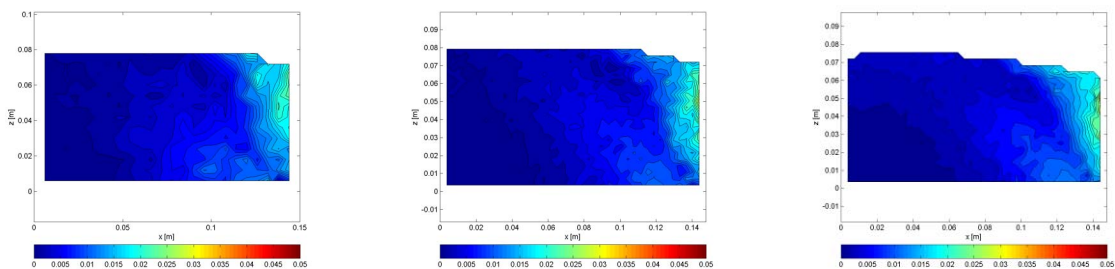


Immagine 6. 31 Spostamenti cumulati CICLO 12 $r=2.5\text{mm}$; $r=1.5\text{mm}$; $r=1.0\text{mm}$

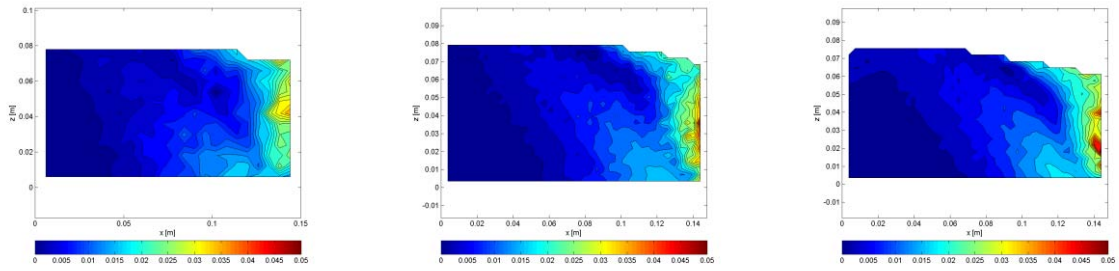


Immagine 6. 32 Spostamenti cumulati CICLO 24 $r=2.5\text{mm}$; $r=1.5\text{mm}$; $r=1.0\text{mm}$

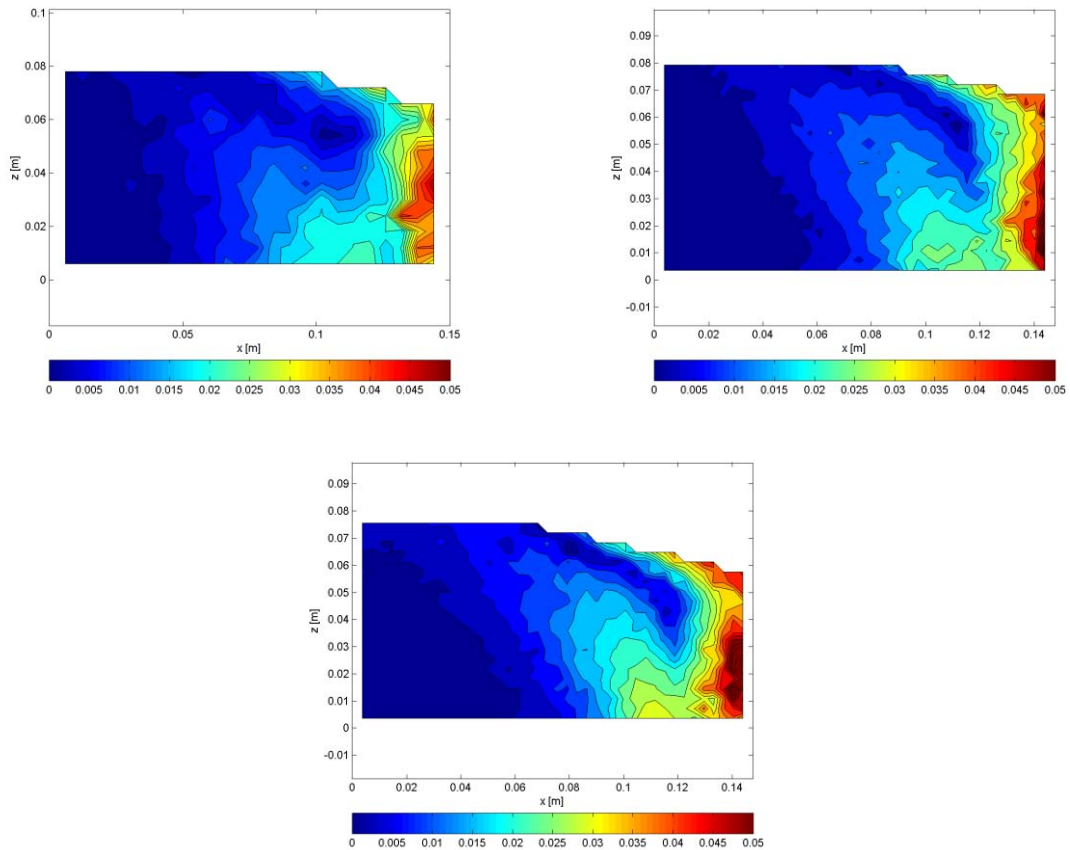


Immagine 6. 33 Spostamenti cumulati CICLO 48 $r=2.5\text{mm}$; $r=1.5\text{mm}$ (sopra); $r=1.0\text{mm}$ (sotto)

Il volume coinvolto del provino cresce con il diminuire del raggio; mentre per la simulazione con $r=2.5\text{mm}$ sembra essere limitato da una linea verticale (figura 6.33 in alto a sinistra), per particelle più piccole il volume assume la forma tipica di volume di spinta passiva. L'evoluzione del fenomeno è simile per tutti i raggi; all'aumento dei cicli il volume si definisce. I cedimenti sono però maggiori, fin da subito, per raggi minori. Infatti alla fine della simulazione particelle più piccole hanno maturato cedimenti dell'ordine di 5 cm a ridosso della parete.

Dall'immagine 6.28 si nota la formazione di una zona qualche cm sotto il piano campagna in cui avvengono i maggiori spostamenti.

Il ratcheting è ben definito per raggi minori; infatti si vede un flusso quasi completo di materiale che risale verso l'alto.

Il volume passivo è definito da un'inclinazione che per la teoria è di $\alpha = 45 - \phi/2$; nel caso di raggi minori questa assunzione trova conferma. Per il diametri di 50mm però il volume di spinta passiva diventa quasi verticale.

Nelle immagini 6.29-6.30 è riportata la spinta attiva (fase 4) per il ciclo 24 e per il ciclo 48 dei raggi 2.5 e 1.0mm.

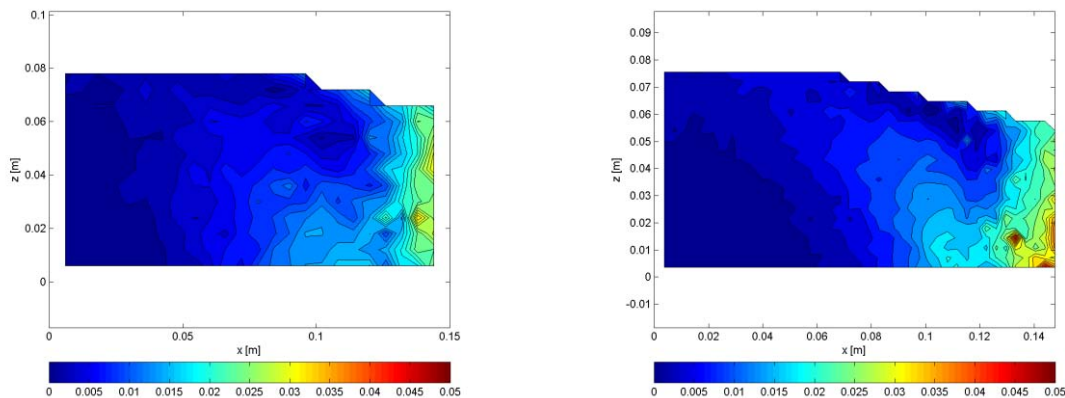


Immagine 6. 34 Spinta attiva; spostamenti cumulati CICLO 24; r=2.5mm; r=1.0mm

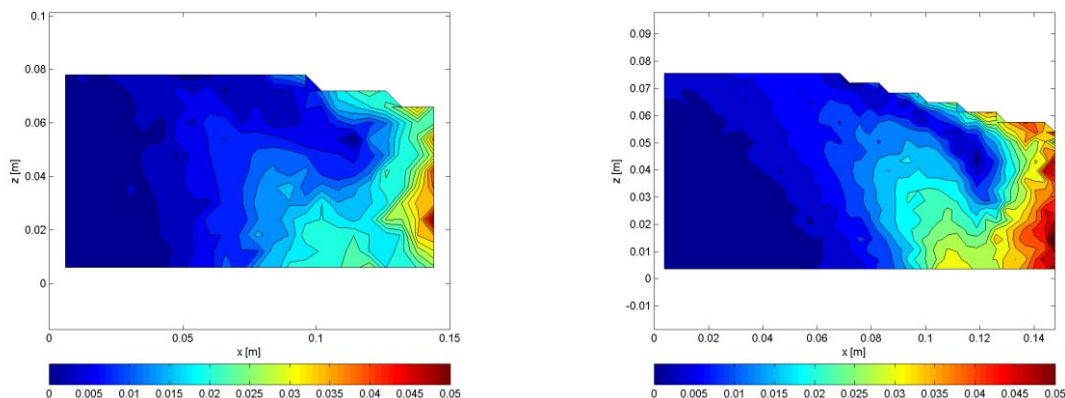


Immagine 6. 35 Spinta attiva; spostamenti cumulati CICLO 48 r=2.5mm; r=1.0mm

Ciò che un po' stupisce è che il volume interessato dai cedimenti (da blu chiaro a rosso) è uguale in caso di spinta passiva; gli spostamenti sono lievemente superiori in spinta passiva. In questo caso le simulazioni hanno tutte lo stesso periodo.

6.5 Cedimento/sollevarmento del piano campagna

Vengono ora graficati gli spostamenti del piano campagna ogni 4 cicli; come spiegato al paragrafo 6.1, grazie ad un vettore spostamento verrà raffigurato il piano campagna al variare di porosità, ampiezza e raggio di particelle.

6.5.1 Porosità

Creare dei provini con raggi piuttosto elevati ($r_{me}=2.5\text{mm}$) in funzione di due diverse porosità (0.45 e 0.47) porta ad avere due simulazioni con diversa altezza. I cedimenti sono comunque visibili dalla differenza della prima e dell'ultima linea indicativa del piano campagna.

Guardando l'immagine 6.25, chiamata H l'altezza iniziale del provino e s il cedimento, possiamo trovare indicativamente

- per $n=0.45$: $s=2,2\text{cm}$, ossia di circa il 24,4% di $H=9\text{cm}$
- per $n=0.50$: $s=1,9\text{cm}$, ossia di 23% H , dove $H=8,2\text{cm}$

A sorpresa il provino con maggior porosità cede lievemente di meno rispetto all'altro. La differenza è minima, ciò potrebbe essere dovuto alla generazione casuale del modello.

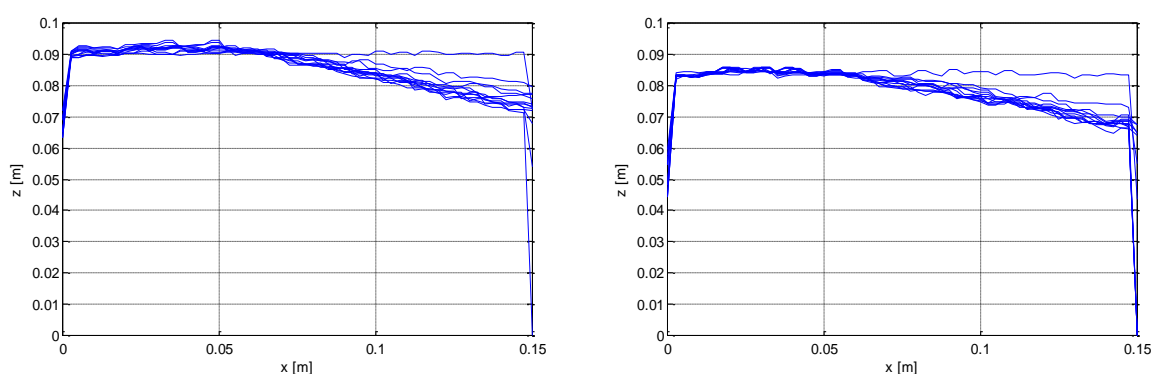


Grafico 6. 24 Piano campagna; $r_{me}=25\text{mm}$; $n=0.45$ e $n=0.50$

Per confermare questo risultato un po' inaspettato viene fatta la stessa prova con raggi minori ($r_{me}=15\text{mm}$) e stessa differenza di porosità (0.47 e 0.52). Il grafico 6.26 illustra ciò che si ottiene in questo caso.

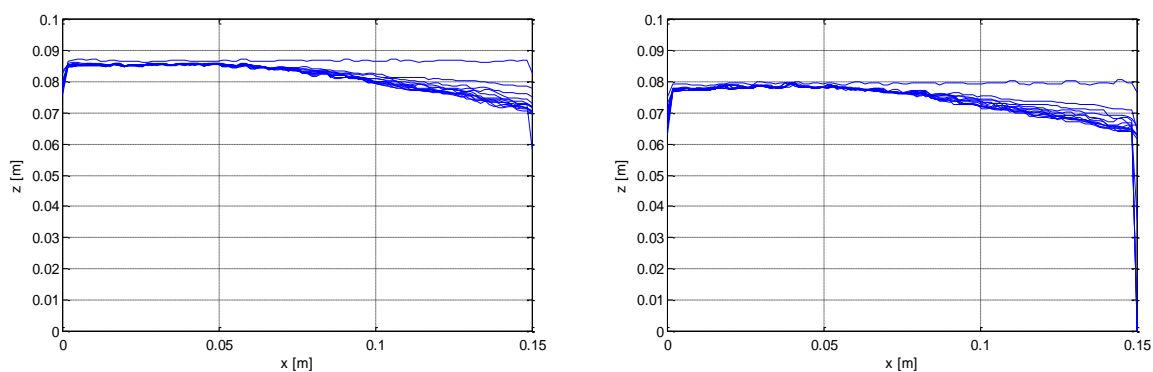


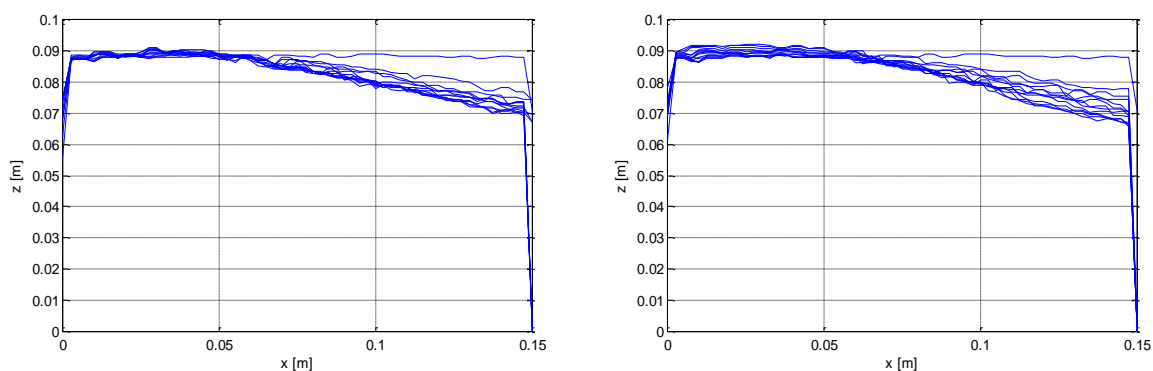
Grafico 6. 25 Piano campagna; $r_{me}=15\text{mm}$; $n=0.47$ e $n=0.52$

Ancora una volta le due condizioni iniziali sono diverse per quanto riguarda l'altezza; i cedimenti sono sostanzialmente uguali (1,8cm di $n=0.47$ contro 1,6cm di $n=0.52$). In confronto all'altezza ho circa il 20% H per entrambe le porosità.

Per questo motivo la porosità non pare influenzare molto i cedimenti del piano campagna. Pare che il sollevamento del materiale a monte della parete sia maggiore per porosità minori (grafici di sinistra, 6.25, 6.26).

6.5.2 Periodo

Nella figura sottostante sono riportati gli andamenti dei piani campagna.



La prova con un periodo maggiore manifesta cedimenti maggiori (di 2mm). Anche il sollevamento è maggiore per quest'ultima.

6.5.3 Ampiezza

Si procede l'analisi valutando l'influenza che ha l'ampiezza del movimento della parete sul cedimento del piano campagna.

Per questo caso si utilizzano i modelli con $r_{me}=1.5\text{mm}$ e porosità $n=0.47$.

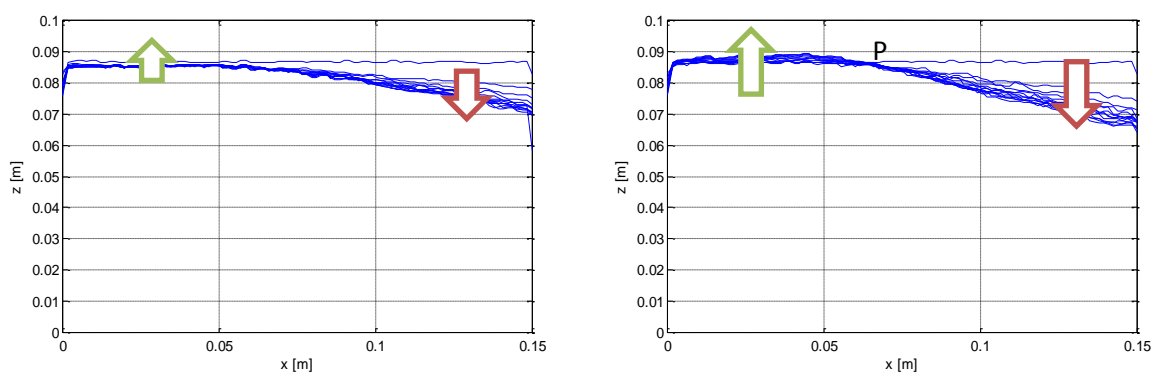


Grafico 6. 26 Piano campagna; $r_{me}=1.5\text{mm}$; $n=0.47$; $A=3\text{mm}$ e $A=6\text{mm}$

Il materiale con maggior cedimento è quello sollecitato da ampiezze maggiori, come ci si aspettava; a contatto con la parete si registrano cedimenti $s=2,3\text{cm}$ contro $s=1,8\text{cm}$, ossia rispettivamente il $26\%H$ per $A=6\text{mm}$ e il $20\%H$ per $A=3\text{mm}$.

L'andamento del piano campagna è rappresentato da una superficie curva che ruota attorno ad un punto P che dista circa H dalla parete del provino. In effetti la teoria del ratcheting prevede che si verifichi un sollevamento del terreno a distanza H dalla superficie spingente. Il provino con A maggiori presenta questa caratteristica. Per ampiezze minori però questo non è visibile, anzi il materiale tende a cedere anche a distanza dalla parete.

6.5.4 Raggio

Vengono confrontati i provini con i tre diversi raggi (1.0mm, 1.5mm e 2.5mm).

Si ricava il grafico 6.28.

Si possono quindi ricavare i cedimenti dei diversi provini, riassunti nella tabella 6.1

Raggio [mm]	Cedimento w [cm]	Altezza provino [cm]	Percentuale
1.0	2,4	8,0	30%
1.5	2,0	8,6	23%
2.5	1,8	8,8	20%

Tabella 6. 1 Cedimenti per diversi valori di raggio medio

I cedimenti in tabella riguardano il punto a contatto con la parete.

Il provino con grani di dimensioni minori presenta un cedimento grande 1,3 volte quello della simulazione con particelle di raggio 1.5mm e 1,5 volte quelle di raggio 2.5mm..

Durante i primi cicli (1-4) il materiale dimostra un cedimento superiore omogeneo. In seguito il piano campagna evolve presentando ancora una volta sollevamenti a monte della parete e cedimenti nella parte destra.

Dal grafio 6.28 raggi minori presentano rigonfiamenti maggiori.

La posizione del punto P di suddivisione tra zona con spostamento positivo (sollevamento) e negativo (cedimento) rimane invariata per tutte e tre le prove; la distanza dalla parete è di circa l'altezza del provino.

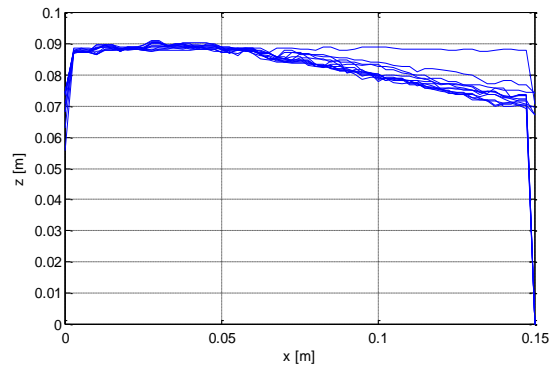
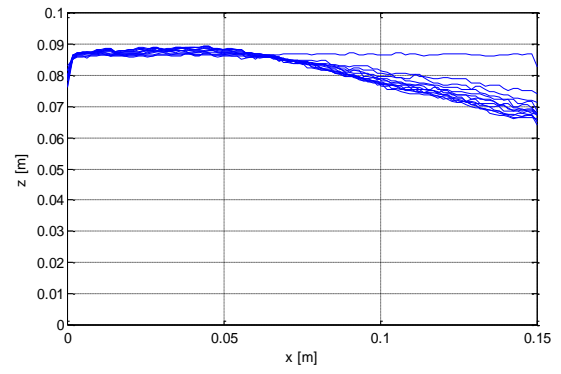
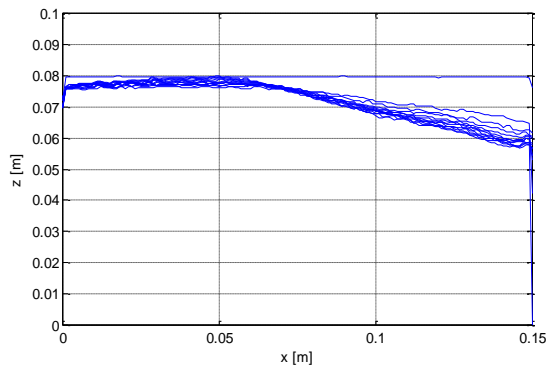


Grafico 6. 27 Piano campagna; $r_{me}=10\text{mm}$; $r_{me}=1.5\text{mm}$; $r_{me}=2.5\text{mm}$ (sotto); $A=6\text{mm}$

7. Conclusioni e sviluppi futuri

Nelle tabelle 7.1, 7.2 e 7.3 vengono descritti in sintesi i risultati ottenuti.

		6.2 Spinte orizzontali	6.4 Campo di spostamenti	
Porosità	6.2.1	A=3mm e A=6mm Valori più elevati di spinta passiva raggiunti con porosità minore Uguale forma della spinta passiva (nei primi cicli asintotica poi cresce senza raggiungere un massimo) Gli andamenti sono più distinti l'uno dall'altro per A=6mm La spinta passiva diminuisce con l'aumento dei cicli, quella passiva aumenta	6.4.2. a	Per differenze grandi di porosità (0,05) si hanno spostamenti dello stesso ordine, lievemente maggiori per porosità minori Zona interessata: circa uguale Ratcheting si manifesta con più lentezza per porosità minori
Periodo	6.2.2	Il periodo maggiore sembra manifestare valori superiori se si guardano i primi cicli. Durante tutta la simulazione non c'è una tendenza precisa Dalle medie non pare esistere un andamento generale legato al periodo	6.4.2. b	Simulazioni con periodi maggiori creano nel provino maggiori deformazioni.
Ampiezza	6.2.3	Ho minori oscillazioni per A=3mm Valori attorno cui si assestano le oscillazioni sono maggiori per A=6mm, sia all'inizio che alla fine, sia per le medie che per i massimi I valori di spinta attiva diminuiscono all'aumentare dei cicli	6.4.2. c	Entità spostamenti molto più grande per A=6mm Volume interessato molto maggiore per A=6mm Maggior sollevamento per A=6mm Maggior densificazione per A=6mm
Raggio	6.2.4	Raggi maggiori danno valori maggiori; sia riguardo l'ampiezza sia riguardo il valore cui si assestano le oscillazioni Periodo di transizione spinta attiva e passiva minore per raggi maggiori Spinta attiva maggiore per raggi maggiori Anche qui si vede come la spinta attiva diminuisca all'aumentare dei cicli al contrario di quella passiva	6.4.2. d	Il fenomeno del ratcheting interessa di più i raggi minori; si nota un flusso ciclico quasi completo Il volume passivo è ben definito per raggi minori e cresce con il diminuire della particella rme minori hanno inclinazione dei volumi di spinta simili a quelli previsti dalla teoria I cedimenti sono maggiori per r minori Molto chiaro il sollevamento per r minori Spinta attiva e passiva hanno circa ugual volume di cedimenti
			<i>Ratcheting all'aumentare dei cicli</i>	
Numero di cicli	6.4.1	Gli spostamenti totali cumulati all'aumentare dei cicli sono uguali e interessano sempre la stessa zona Gli spostamenti cumulati crescono con il numero di cicli concentrandosi nelle zone a ridosso e alla base della parete Il materiale si ridispone subendo una compattazione		

Tabella 7. 1 Risultati: spinte all'aumentare dei cicli e spostamenti

		6.3 Cuneo di spinta
Spinta Passiva	6.3.1	All'inizio volume poco definito Poi il volume diminuisce per concentrarsi a ridosso della parete
Spinta Attiva	6.3.2	Volume iniziale diverso da volumi derivanti da teoria spinte, simile a spinta passiva Volume diminuisce per diventare poi come ci si aspetta
Confronto	6.3.3	Entità degli spostamenti uguale Volume passivo maggiore di attivo (anche se alla fine questa differenza diminuisce) Volume passivo passa con più gradualità da cedimenti maggiori a nulli. Zona più indefinita per volume passivo

Tabella 7. 2 Risultati: volume di spinta e piano campagna

6.5 Cedimento/sollevamento del piano campagna		
<i>Porosità</i>	6.5.1	La porosità pare non influenzare l'andamento del piano campagna Il cedimento è dell'ordine del 20% circa dell'altezza del provino
<i>Periodo</i>	6.5.2	Come per i cedimenti, periodo maggiore dà - maggior deformazione - maggior sollevamento
<i>Ampiezza</i>	6.5.3	Cedimenti di 1/5 maggiori per ampiezze maggiori Sollevamento della zona a H dalla parete solo per ampiezze maggiori; per s=3mm il terreno pare cedere appena un po'
<i>Raggio</i>	6.5.4	Cedimento e sollevamento maggiore per particelle più piccole Il punto P rimane costante

Tabella 7. 3 Risultati: volume di spinta e piano campagna

Spinte orizzontali

Riguardo le *spinte massime*, l'ordine di influenza delle variabili in gioco è il seguente.

- 1) Ampiezza
- 2) Porosità
- 3) Raggio medio
- 4) Periodo di oscillazione della parete

Riguardo i *valori medi* invece una variazione relativamente grande di ampiezza, porosità e raggio porta ad avere una differenza di valori simile (10N).

L'andamento generale dei cicli presenta sempre la stessa forma.

La *spinta passiva* varia la sua forma all'aumentare dei cicli; progressivamente raggiunge un valore maggiore. Questo trova spiegazione nella disposizione geometrica delle particelle. In effetti una parete mobile crea nel terreno laterale una compattazione; si verifica una ridistribuzione dei vuoti e in seguito al flusso si realizza l'allontanamento dalla parete di parte del provino.

Il materiale risulta addensato e ad una sollecitazione successiva reagisce con maggior resistenza (e quindi maggior spinta). Questo schema è ben visibile dai grafici riguardanti le medie e i massimi delle singole simulazioni.

La *spinta attiva* invece all'inizio della fase di decompressione ricade a zero per poi crescere in modo molto rapido. Negli istanti iniziali di fase attiva di un ciclo decresce per continuare ad oscillare ad un valore costante all'aumentare dei cicli. Questo valore tende ad abbassarsi con l'aumento dei cicli.

All'aumentare del numero di cicli il materiale ha raggiunto una configurazione più densa vicino alla parete; ad una decompressione successiva reagisce con una spinta sempre più bassa in quanto la miglior disposizione dei grani ha portato ad una sorta di "inerzia" alla nuova configurazione. La spinta attiva quindi continua a diminuire soprattutto durante i primi cicli.

Riguardo la determinazione del coefficiente di spinta si riporta in figura 7.1 il grafico $k-\varepsilon$.

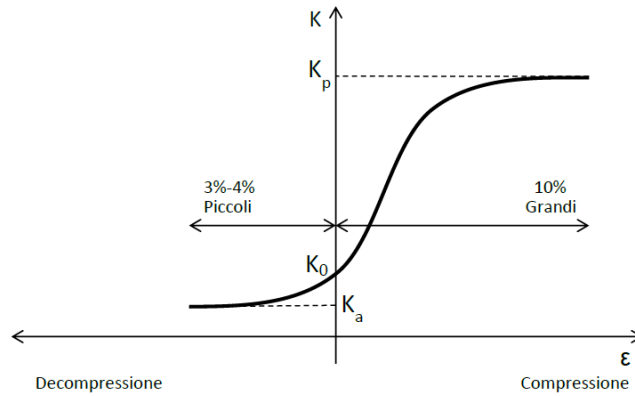


Figura 7. 1 Coefficienti di spinta in funzione dei cedimenti

All'aumentare del numero di cicli la spinta passiva varia di forma: inizialmente è simile alla parte del grafico in compressione. Poi invece l'asintoto scompare: ciò forse è dovuto al fatto che le deformazioni sono ancora piccole rispetto a quelli che mobilitano tutta la spinta passiva del terreno.

Ci si chiede se, in seguito alla sollecitazione di un ulteriore numero di cicli, la spinta passiva arrivi continui a crescere o si assesti attorno ad un valore costante come quello che si ha in caso di grandi spostamenti.

Inoltre si può provare ad eseguire la prova con maggiori ampiezze di carico; in questo caso si può controllare se la forza ha un andamento simile a quello teorico o se ancora sono necessari ulteriori cicli per ottenere una risposta costante del materiale all'aumentare dei cicli.

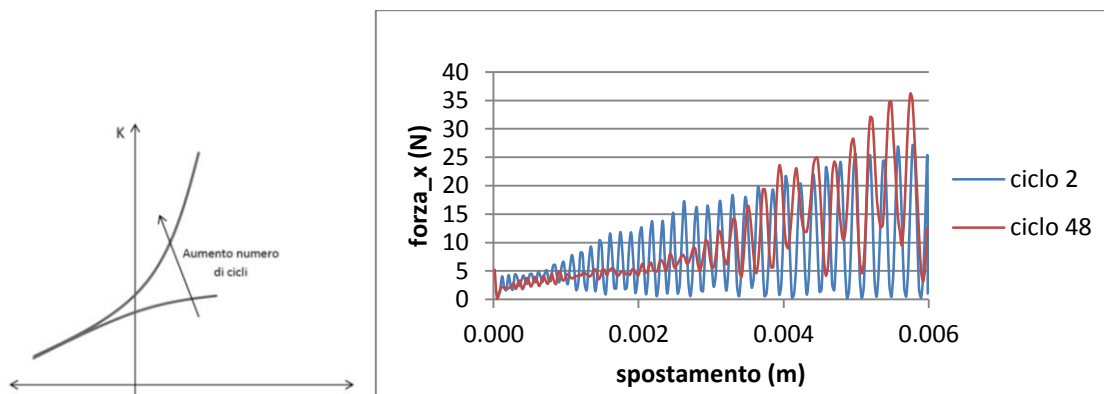


Figura 7. 2 Cambiamento della spinta passiva all'aumento dei cicli (particolare della figura 7.1)

Un'ipotesi sull'andamento della forza passiva è nella figura 7.2.

La spinta attiva, che richiede minori spostamenti per essere mobilitata, dimostra un andamento simile a quello in figura 7.1.

Campo di spostamenti

Valutando le varie grandezze che influenzano il problema, si è giunto alla conclusione che a differenza del calcolo delle spinte, il *periodo* risulta importante nella "velocità di maturazione

degli spostamenti". Molto probabilmente infatti la diversa velocità di spinta accelera il manifestarsi del ratcheting.

Come ci si aspettava anche in questa tesi risulta che un'ampiezza maggiore provochi cedimenti maggiori nel materiale. Come conseguenza si hanno un'addensamento e dei sollevamenti del piano campagna maggiori. In questo caso quindi il ratcheting si sviluppa più "violentemente" rispondendo alla sollecitazione con un maggior flusso (maggiori cedimenti) che va a spingere verso l'alto il piano campagna (maggior sollevamento).

Anche il *raggio delle particelle* ha importanza. Infatti grani più piccoli sono più sensibili alla formazione del flusso. Riguardo alla maggior definizione del volume di spinta per raggi minori, questo può essere imputato al fatto che i grani da 25mm risultano "grandi" rispetto il volume della prova. La mesh è ovviamente "più grossolana" rispetto a quella per grani minori e questo provoca una minor definizione del risultato. Questo fatto potrebbe spiegare anche la forma differente dei volumi di spinta di due prove con diverso raggio. Il fenomeno si vede effettivamente molto meglio nel caso in cui le particelle siano più piccole.

Meno influenza ha la *porosità*, anche se una minor porosità è ovviamente d'ostacolo allo svilupparsi del fenomeno. In effetti il flusso crea meno opposizione in un materiale con maggior numero di vuoti.

Cuneo di spinta

In caso di spinta attiva il volume varia con il tempo. La TBS si sposta verso la parete assunto dopo un numero di cicli la spinta prevista dalla teoria della spinta delle terre. La spinta passiva subisce un cambiamento minore. Questa "migrazione" è data dal fatto che i cicli iniziali danno modo al materiale di ridistribuirsi in modo migliore all'interno del volume: il materiale si addensa colmando i vuoti. Solo dopo una fase iniziale quindi è in grado di comportarsi come previsto dalla teoria.

Questa differenza all'aumentare dei cicli del materiale mobilitato è responsabile del flusso tipico del ratcheting (paragrafo 2.2) e quindi del sollevamento del piano campagna.

Ratcheting all'aumentare dei cicli

Il fenomeno presenta un andamento regolare all'aumentare dei cicli: infatti i cedimenti totali che si realizzano all'interno di un ciclo si ripetono con la stessa entità nel ciclo successivo (le immagini 6.10, 6.11, 6.12 di sinistra sono pressochè uguali).

Gli spostamenti maggiori "impressi" sono vicino alla parete.

Come ci si aspettava i cedimenti cumulati crescono all'aumentare dei cicli. In effetti si osserva che la zona interessata dai cedimenti è sempre quella vicino alla parete. Nel tempo una particella che si trovava a sinistra della parete si sposta fino ad arrivarne a contatto. In questa zona subisce un cedimento maggiore che la spinge verso il basso e in seguito concluderà il suo percorso ritornando verso l'alto. La particella seguente subirà gli stessi

cedimenti (stessa grandezza) della particella precedente; il risultato di questo è un grafico di cedimenti cumulati con maggior spostamento vicino alla parete .

In tutte le simulazioni si nota la creazione di una bulbo allungato ccanto alla parete mobile nel quale si concentrano gli spostamenti, segno che l'influenza della parete non è uniforme nel materiale ma ha un massimo ad una piccola distanza dalla base e dal piano campagna. Questo fatto può essere spiegato dalla geometria del problema. In effetti una particella che si trova alla base per spostarsi verso l'alto deve prima scorrere orizzontalmente, dato che il materiale al di sopra subisce maggiori spostamenti. Inoltre si dovrà scontrare con le altre particelle alla base, ferme. Dovrà quindi seguire un percorso orizzontale segnato da piccoli spostamenti e solo dopo poco riuscirà a risalire. Quindi gli spostamenti cumulati di queste particelle "sfortunate" sono minori delle colleghe in posizione superiore.

Cedimento/sollevarmento del piano campagna

Come per i cedimenti, l'andamento all'aumentare dei cicli del piano campagna è influenzato dalle ampiezze, dalla velocità; in seguito dalla dimensione dei grani e dalla porosità. In effetti la sua espressione è risultato degli spostamenti che si hanno all'interno del terreno durante le prove; maggior ampiezza crea maggior flusso.

In accordo con i risultati di Engalnd e Tsang (2001), il punto P, che separa la zona di cedimento da quella di sollevamento del piano campagna, non si sposta; rimane ad una distanza dalla parete pari all'altezza del provino. Questo succede per ogni simulazione.

Una considerazione sul numero di cicli

Il massimo numero di cicli utilizzato per osservare il fenomeno è modesto: 50 cicli per ogni simulazione. Si osserva però che bastano davvero pochi cicli per innescare il fenomeno. Nella realtà, per svilupparsi completamente il ratcheting necessita, oltre che di uno sforzo maggiore ad un certo valore di soglia, di un numero elevato di carichi/scarichi. Infatti durante un numero di cicli compreso tra 10^4 e 10^5 cicli nel materiale hanno luogo la maggior parte dei cambiamenti (addensamento, variazione delle spinte, subsidenza e sollevamento). Il terreno presenta variazioni fintantoché non raggiunge la massima densificazione.

Durante questi cicli il flusso tipico del ratcheting aumenta; in seguito però non termina ma se si aumentano i cicli continua, con andamento costante e che non dipende più dall'ampiezza del carico applicato.

Bibliografia

Basi concettuali e impiego nella pratica progettuale dei modelli costitutivi del terreno, R.Nova, Politecnico di Milano, 1981

Appunti lezioni "Fondazioni", G. Cortellazzo, 2011-2012

Appunti lezioni "Opere di Sostegno e in Sotterraneo", P. Carrubba, 2011-2012

On the quasi-static granular convective flow and sand densification around pile foundations under cyclic lateral loading, Pablo Cuellar, Steven Georgi, Matthias Baebler, Werner Rucker, 2012

Approccio di scala per la modellazione agli elementi discreti di un materiale granulare, tesi di F.Merendino, 2008/2009

Analisi sperimentale del fenomeno del ratcheting nei terreni granulari, tesi di G.Zorzi e Calvi, anno 2012/2013

Micromechanical Investigation of Soil Deformation: Incremental Response and Granular Ratcheting, Fernando Alonso Marroquín, 2004

Towards the Design of Soil Loading For Integral Bridges, George L.England e Neil C.M.Tsang, 2001

Discrete numerical investigations of the ratcheting phenomenon in granular materials, F. Calvetti, C. di Prisco, 2010

Sito Feynman Lectures of physics: www.feynmanlectures.info

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo traguardo alle persone che hanno creduto in me in tutti questi anni; in ordine di età e non di importanza:

Federica, che mi sopporta nonostante la mia natura brontolona e che mi tiene in allenamento in fisica e matematica,

a Marco, che nonostante tutto è la mia roccia nella tempesta (nel senso che a volte ci sbatto letteralmente la testa contro...ma molto più spesso è il mio punto fermo in mezzo all'Oceano),

a Emilia, un'amica che non giudica e che è sempre disponibile ad ascoltare (e rispondere sinceramente),

a Gian, che è come l'aria, anche se non si vede spesso, lui per me c'è e lo so,

a Mamma, che mi tiene sempre con i piedi per terra (purtroppo) e mi sprona ad essere ancora più forte,

a Papà, che riesce a farmi ridere e passare il nervoso anche se è la peggiore giornata del mondo.

Infine a qualcuno che non si vede, la mia Buona Stella (o come si vuol chiamare il Fato, il Destino, il Karma, la Fortuna) che mi ha permesso di arrivare qui.