

# INTERAZIONE TRA GRANI DI GHIAIA: EFFETTI DEL CARICO CICLICO E DELLA MINERALOGIA SUL COMPORTAMENTO A CONTATTO

Damiano Bonafini (damianobonafini@gmail.com), Madhusudhan, B.N. (madhu-murthy@soton.ac.uk), Geoff Watson (g.watson@soton.ac.uk), Edgar Ferro (edgar.ferro@unitn.it), Lucia Simeoni (lucia.simeoni@unitn.it)  
*Università degli Studi di Trento - University of Southampton*

**ABSTRACT.** Le strutture costituite da materiali granulari grossolani, quali massicciate ferroviarie, muri in gabbioni o le innovative fondazioni con gabbioni, richiedono accurate modellazioni DEM per poter essere realisticamente simulate. Al fine di ottenere modelli fedeli a tali opere, si richiede la conoscenza delle proprietà di contatto che caratterizzano il comportamento interparticellare tra i grani costituenti l'assemblaggio. Sono state svolte prove in laboratorio al fine di valutare gli effetti dell'applicazione di carichi ciclici su diverse mineralogie di grani di ghiaia posti in contatto tra di loro. Dalle prove di carico svolte, sia in direzione normale che laterale, sono stati desunti valori medi di rigidità normale al contatto e di coefficiente di attrito interparticellare, che hanno permesso, con l'ausilio di analisi al microscopio, di classificare le diverse mineralogie esaminate in funzione del comportamento. I risultati ottenuti sono da considerarsi solo qualitativamente adeguati, ma potranno fornire spunti e utili indicazioni sulle procedure di carico e sui metodi di monitoraggio per futuri esperimenti sul contatto.

## 1. INTRODUZIONE

I materiali granulari grossolani sono utilizzati vari ambiti dell'ingegneria civile, tra cui le massicciate ferroviarie, le fondazioni degli edifici e i muri di gabbioni. Essi sono tipicamente ottenuti attraverso la frantumazione in cava e classificati in base alla granulometria, mineralogia e capacità di sopportazione dei carichi. Il comportamento di queste strutture è complesso. Pertanto, è necessario valutare in dettaglio le caratteristiche meccaniche e il comportamento alle sollecitazioni cicliche dei grani. Tuttavia, è necessario fare una distinzione. I materiali granulari relativamente fini (sabbie) possono essere assunti come mezzi continui e quindi il loro comportamento viene riprodotto in modo realistico utilizzando il Metodo ad Elementi Finiti (FEM). Al contrario, il comportamento dei materiali granulari grossolani, con una dimensione dei grani paragonabile a quella del problema (ghiaie e ciottoli), è consigliabile venga modellato considerando le interazioni tra le particelle, ad esempio utilizzando il metodo degli elementi discreti (DEM). Per utilizzare i metodi DEM, diventa importante prendere in considerazione non solo le caratteristiche geometriche dei grani, ma anche le proprietà di contatto.

Questo studio si propone di studiare l'effetto della mineralogia di 5 diverse ghiaie e dei carichi ciclici sul comportamento di contatto dei grani di ghiaia attraverso un piano di prove di laboratorio al fine di valutare alcune tra le più tipiche proprietà di contatto. Ciò ha permesso di caratterizzare il contatto in termini di rigidità, coefficiente di attrito e propensione al danneggiamento per diverse mineralogie, considerando l'effetto dei carichi ciclici. Sono state eseguite prove di carico per definire la rigidità del contatto. In particolare, sono state eseguite prove di carico ciclico in direzione normale per simulare la degradazione della superficie e prove di carico tangenziale monotono per valutare i coefficienti di attrito interparticellare. Successivamente, sono state effettuate analisi al microscopio per caratterizzare la rugosità e l'area di contatto. Le cinque mineralogie studiate, tipicamente utilizzate per gabbioni e massicciate ferroviarie, sono state: andesite, basalto, granito, gabbro e calcare.

## 2. CAMPI DI APPLICAZIONE

I materiali granulari grossolani nell'ingegneria civile si riferiscono a un'ampia categoria di materiali da costruzione costituiti da particelle di grandi dimensioni, come ghiaie (2-6 cm), ciottoli (6-20 cm) e blocchi (20-100 cm). Questi materiali sono utilizzati in vari ambiti, tra cui le massicciate ferroviarie, le fondazioni di edifici (ad esempio, le fondazioni con gabbioni di LedroSteel®), i muri di gabbioni e i muri a secco.

Le ghiaie vengono utilizzate per la costituzione della massicciata ferroviaria, quello strato al di sotto dei binari il cui scopo è quello di fornire un supporto stabile alle traversine, trasmettere i carichi agli strati inferiori e resistere alle forze orizzontali (Ernest T. Selig & John M. Waters., 1994).

I ciottoli sono utilizzati come riempimento nei gabbioni in rete metallica comunemente utilizzati come tipo di muro di contenimento. Si possono distinguere due tipi principali di gabbioni. I gabbioni tradizionali e più diffusi, costituiti da una rete metallica esagonale ritorta molto flessibile e i gabbioni a rete elettrosaldata, che offrono una

resistenza paragonabile ai precedenti, ma con una maggiore rigidità. Inoltre, recentemente è stato sviluppato un sistema di fondazione a secco progettato per fornire un nuovo tipo di fondazione sostenibile per edifici in legno, rimovibile e in grado di soddisfare i requisiti di un progetto finalizzato alla durabilità della struttura. Tale sistema, riportato in Figura 1, è costituito da gabbioni a rete elettrosaldata affiancati tra di loro, riempiti con aggregati grossolani frantumati, adeguatamente adattati all'uso attraverso l'inserimento di una piastra in calcestruzzo al fine di distribuire i carichi (URL: <https://www.ingenio-web.it/articoli/fondazioni-a-secco-per-edifici-in-legno/>).



Figura 1. Esempio di fondazione con gabbioni (LedroSteel Foundation LSF).

### 3. SCOPO DELLO STUDIO

Il metodo degli elementi discreti (DEM) e il metodo degli elementi finiti (FEM) sono due diverse tecniche di modellazione numerica utilizzate per simulare il comportamento delle strutture. Il FEM si basa sulla discretizzazione del continuo. Al contrario, il DEM è una tecnica numerica che modella l'interazione tra le singole particelle e i confini per prevedere il comportamento dei solidi in massa.

Per le strutture poc'anzi citate e dunque nel caso di materiali granulari molto grossolani, come ghiaie e ciottoli, una migliore descrizione del loro comportamento (ad esempio legato alla deformazione permanente sotto carichi ciclici) può essere ottenuta mediante il DEM. Le informazioni tipiche richieste per definire un modello a elementi discreti includono la forma e la distribuzione granulometrica delle particelle, il rapporto di vuoto iniziale, la rigidità di contatto normale e tangente e il coefficiente di attrito interparticellare. In tale studio sono stati svolti dei test con lo scopo di valutare la rigidità di contatto e il coefficiente di attrito tra le particelle. Una stima realistica di questi parametri è essenziale per sviluppare un modello DEM accurato (John Harkness et al., 2016).

### 4. METODOLOGIA

Le prove sono state svolte utilizzando aggregati di pietra con dimensioni di 5-10 cm e diverse caratteristiche mineralogiche. Si tratta di materiali granulari frantumati e grossolani utilizzati come massiccata ferroviaria e come riempimento granulare per i gabbioni. Le diverse mineralogie testate sono riportate nella Tabella 1:

Tabella 1. Mineralogie testate.

MINERALOGIA	SIGLA	DUREZZA (MOHS)	ORIGINE
Andesite	AND	6.2	Ignea
Basalto	BAS	5.6	Ignea
Granito	GRA	5.9	Ignea
Calcere (UK)	LIM	3.1	Sedimentaria
Gabbro	QUA	5.8	Ignea
Calcere (IT)	RTN	≈3.0	Sedimentaria

Per testare il comportamento a contatto dell'aggregato lapideo è stata adottata un'apparecchiatura di prova appositamente progettata dall'Università di Southampton. Ogni prova consisteva in una coppia di particelle della stessa dimensione posizionate in modo da avere un unico punto di contatto. Sono stati eseguiti due tipi di prove a carico controllato: prove di carico normale e successivamente prove di carico laterale.

Le prove di carico normale sono state suddivise in 4 fasi in cui si applicavano 5 000 cicli di carico per ognuna. Un carico di 10N è stato impostato come minimo per ogni ciclo, mentre il carico massimo veniva aumentato per ogni fase successiva. Pertanto, ogni coppia di grani era sottoposta a 20 000 carichi a una frequenza di 0,82 Hz circa.

Le prove di carico laterale sono state suddivise in 2 fasi, a due diversi valori di sollecitazione assiale, 50 N e 100 N e a loro volta eseguite in 2 ripetizioni. La prima ripetizione è stata condotta sul provino fresco prima di eseguire la prova di carico assiale. Nella seconda, la prova è stata ripetuta sugli stessi grani, nello stesso punto di contatto della prova assiale, in modo che il contatto avvenisse sulla superficie danneggiata.

In ogni prova, gli spostamenti verticali e orizzontali sono stati misurati con trasformatori di spostamento lineari variabili (LVDT) posizionati sul blocco che conteneva i provini e con l'ausilio di telecamere che registravano i movimenti in prossimità del punto di contatto. In seguito, attraverso degli algoritmi di correlazione sono stati desunti gli spostamenti in entrambe le direzioni. L'intera procedura di test è riepilogata in Tabella 2.

Tabella 2. Procedura di test.

PROVA A CARICO	STAGE	CARICO ASSIALE	TIPO DI CARICO
Normale	S1	10-30 N	Ciclico
	S2	10-50 N	Ciclico
	S3	10-70 N	Ciclico
	S4	10-100 N	Ciclico
Laterale	S1	50 N (cost)	Monotono
	S2	100 N (cost)	Monotono

## 5. RISULTATI DEI TEST

### 5.1 Esperimenti di contatto normale

Tra i molteplici risultati ottenuti si riassumono di seguito i contenuti principali. Sviluppando i dati ottenuti dai test, è stato ottenuto che gli spostamenti forniti dalle videocamere sono inferiori rispetto a quelli forniti dal LVDT. Questo perché nel primo caso la deflessione viene misurata direttamente sui provini, mentre nel secondo caso viene misurato lo spostamento del supporto del provino. Di conseguenza, le rigidzze normali di contatto derivate dai dati della telecamera risultano più alte di quelle ottenute dall'analisi dei dati LVDT.

In generale, considerando tutte le prove, la rigidzza al contatto normale tende ad aumentare con l'aumentare del carico applicato e del numero di cicli di carico. Questo fenomeno è più pronunciato per gli aggregati rocciosi più morbidi come il calcare, dove la rigidzza aumenta fino al 30%, dal primo (S1) all'ultimo stadio (S4), come è possibile osservare in Figura 1, dove sono rappresentati i valori medi di rigidzza normale secante al contatto per le diverse mineralogie, per le diverse fasi di carico. Nelle seguenti rappresentazioni sono stati utilizzati i dati forniti dal LVDT, perché seppur imprecisi, hanno permesso una più corretta e pratica analisi dei dati.

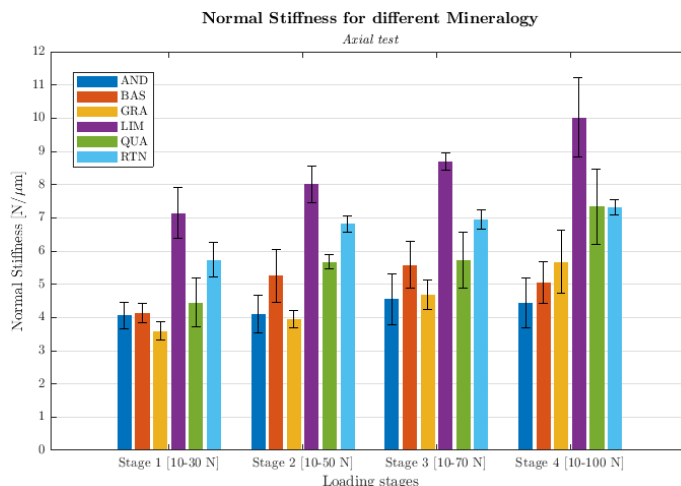


Figura 2. Rigidzza normale secante per diverse mineralogie, con spostamenti forniti da LVDT.

## 5.2 Esperimenti di contatto tangenziale

Il comportamento dell'attrito interparticellare deve essere valutato in relazione al carico normale applicato e alle condizioni della superficie. Osservando in Figura 3 i risultati ottenuti dalle prove di carico laterali, si prevede che all'aumentare del carico verticale, l'attrito interparticellare  $\mu_f$  tenda a diminuire in quanto la superficie di contatto viene danneggiata e di conseguenza anche la rugosità diminuisca con il deterioramento delle asperità.

Inoltre, complessivamente, seppur i risultati presentino una natura dispersa, l'angolo di attrito  $\delta_{mob} = \tan^{-1}(\mu_f)$  assume valori compresi tra  $20^\circ$  e  $27^\circ$  al momento dello scorrimento, mentre la rigidità tangenziale di contatto  $K_T$  è risultata variare da  $1,5 \times 10^{-3}$  N/ $\mu$ m a  $4 \times 10^{-3}$  N/ $\mu$ m per ciascuna mineralogia.

## 5.3 Analisi al microscopio

I materiali morbidi (rocce calcaree) appaiono più rigidi, probabilmente perché hanno un'area di contatto più ampia e sono dunque soggetti a sollecitazioni meno localizzate. Si è ottenuto infatti che per i materiali più duri, l'area di contatto è compresa tra 0.15 e 0.30 mm<sup>2</sup>, mentre per i materiali più morbidi è superiore a 1 mm<sup>2</sup>. Questo comportamento è probabilmente dovuto al fatto che le rocce più morbide tendono a subire un degrado maggiore.

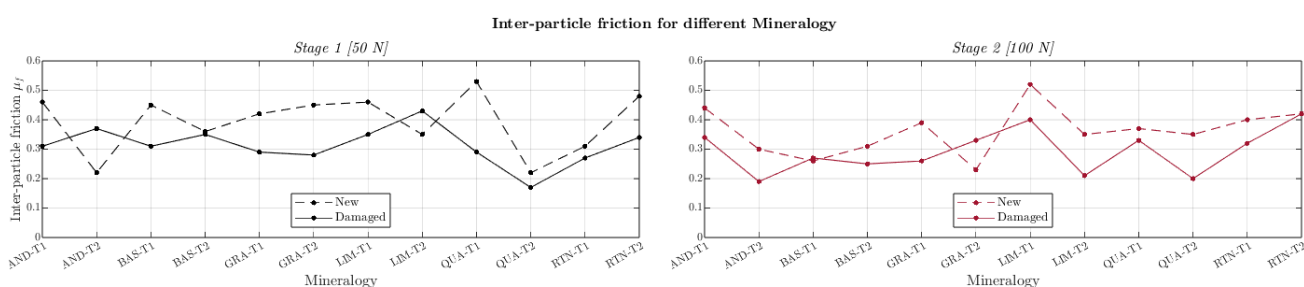


Figura 3. Attrito interparticellare per diverse mineralogie, con spostamenti forniti da LVDT.  
 (T1 = 1<sup>a</sup> serie di test, T2 = 2<sup>a</sup> serie di test)

## 6. CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati presentati per gli esperimenti di contatto, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- 1) In base alla durezza dei minerali e ai risultati delle prove, i campioni di roccia sono stati classificati come morbidi (calcari) e duri (andesite, basalto, granito e gabbro).
- 2) Gli spostamenti forniti dai dati delle telecamere sono inferiori dal 40% al 100% rispetto a quelli forniti dagli LVDT, poiché questi ultimi sono influenzati dalla deformabilità dell'apparecchiatura di prova.
- 3) I valori di rigidità normale di contatto, ottenuti dall'LVDT, variavano in genere da 3 N/ $\mu$ m a 8 N/ $\mu$ m per le rocce più dure e da 5 N/ $\mu$ m a 11 N/ $\mu$ m per le rocce più morbide (calcari). La rigidità dipende dal tipo di materiale, dall'entità della forza normale e dal numero di cicli di carico.
- 4) La rigidità al contatto normale tende ad aumentare con l'aumentare del carico applicato e del numero di cicli di carico, soprattutto per le rocce più morbide, fino al 30%.
- 5) L'area di contatto suggerisce una diversa natura del contatto tra materiali più duri e più morbidi. Varia tra 0.15 e 0,40 mm<sup>2</sup> per i materiali più duri, mentre arriva a 1.9 mm<sup>2</sup> per i materiali più morbidi (calcari).
- 6) I risultati suggeriscono che l'attrito interparticellare  $\mu_f$  tende a diminuire all'aumentare del carico verticale. Ciò può essere spiegato dal progressivo danneggiamento e quindi dal liscivamento delle superfici rocciose. Tuttavia, i risultati sono molto dispersivi e quindi poco affidabili.
- 7) I valori di attrito interparticellare variavano tipicamente da 0.19 a 0.52. Di conseguenza, l'angolo di attrito assume valori fino a circa  $27^\circ$ , da non confondersi con l'angolo di resistenza al taglio.
- 8) I materiali morbidi appaiono più rigidi, probabilmente perché hanno un'area di contatto più ampia e sono soggetti a minori sollecitazioni localizzate. In generale, la rugosità risulta inferiore dopo le prove di carico ciclico.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Ernest T. Selig and John M. Waters. (1994). Track Geotechnology and Substructure Management. *Thomas Telford*.  
 John Harkness, Antonis Zervos, Louis Le Pen, Sinthuja Aingaran, and William Powrie. (2016). Discrete element simulation of railway ballast: modelling cell pressure effects in triaxial tests. *Granular Matter*.