

## **EFFETTI DEI FENOMENI DI CAVITAZIONE SUL COMPORTAMENTO DI CASSONI A SUZIONE SOLLECITATI DA CARICHI VERTICALI**

Giada Rotisciani, Salvatore Miliziano  
*Sapienza Università di Roma*

[giada.rotisciani@uniroma1.it](mailto:giada.rotisciani@uniroma1.it), [salvatore.miliziano@uniroma1.it](mailto:salvatore.miliziano@uniroma1.it)

Fabio M. Soccodato  
*Università di Cagliari*  
[soccodato@unica.it](mailto:soccodato@unica.it)

### **Sommario**

Nella presente nota si descrivono brevemente i risultati di una prova in centrifuga eseguita presso la *University of Western Australia*. Questa prova si inserisce all'interno di una sperimentazione più ampia finalizzata allo studio della risposta di cassoni a suzione installati in terreni stratificati e sollecitati da carichi verticali. Successivamente si analizzano i risultati delle simulazioni numeriche eseguite con il software *FLAC 2D* adottando per lo strato di sabbia il legame Severn Trent (Gajo & Wood, 1999a, 1999b) precedentemente implementato nella libreria del codice di calcolo (Rotisciani, 2010). I risultati presentati dimostrano la marcata influenza della rigidità del cuscinetto d'acqua che separa il coperchio del cassone dal terreno sulla risposta del complesso fondazione-terreno.

### **Introduzione**

I cassoni a suzione sono strutture cilindriche, generalmente in acciaio, aperte inferiormente e chiuse superiormente. La lunghezza di infissione  $L$  è in genere compresa tra 0.5 e 5 volte il diametro  $D$  e il rapporto tra lo spessore delle pareti laterali  $t$  e il diametro è dell'ordine di 1/100. Nel campo dell'ingegneria *off shore* i cassoni sono spesso utilizzati come fondazioni di piattaforme petrolifere o come ancoraggi di opere galleggianti: nel primo caso sono caratterizzati da rapporti  $L/D$  prossimi o inferiori all'unità, nel secondo caso da valori di  $L/D$  superiori a 2. Negli ultimi anni l'impiego dei cassoni è diventato sempre più frequente e sono spesso preferiti a fondazioni più tradizionali come i pali di grande diametro. Rispetto a questi ultimi, infatti, sono economicamente più vantaggiosi (i tempi e i costi di installazione sono nettamente inferiori) e possono essere installati con relativa facilità anche in presenza di elevati battenti d'acqua.

Nella presente nota si descrivono dapprima i risultati di una prova in centrifuga eseguita presso il laboratorio geotecnico della *University of Western Australia* sotto la supervisione dei proff. M. Randolph e C. Gaudin. Questa prova si inserisce all'interno di una sperimentazione più ampia finalizzata allo studio del comportamento di cassoni a suzione sollecitati da carichi verticali monotoni e ciclici installati in terreni stratificati. Nella seconda parte della nota si descrivono i risultati delle simulazioni numeriche eseguite con il codice di calcolo *FLAC 2D* adottando per lo strato di sabbia il legame Severn Trent (Gajo & Wood, 1999a, 1999b). Le analisi presentate sono mirate a valutare gli effetti dei fenomeni di cavitazione sulla risposta dei cassoni a suzione.

### **Sperimentazione in centrifuga**

Le prove sono eseguite a una accelerazione di 100g su un modello di terreno costituito da uno

strato di *Superfine silica sand* e da uno strato più superficiale di caolino. Lo strato di sabbia ha uno spessore di 80 mm e una densità relativa del 35%. Lo strato argilloso è normalmente consolidato; prove penetrometriche statiche eseguite in volo con penetrometri ad ago e a T (T bar) hanno consentito di definirne lo spessore (115 mm) e i valori della resistenza non drenata (cresce linearmente con la profondità con un gradiente medio di 1.91 kPa/m alla scala del prototipo). Il modello di terreno è ricoperto da un strato di acqua di 106 mm di altezza (Figura 1a).

Il modello di cassone adottato nella sperimentazione ha un diametro di 70 mm, una lunghezza di infissione di 128 mm e un'altezza di 138 mm. Sul coperchio sono installati tre trasduttori di pressione (due di pressione totale *TPT\_IN*, *TPT\_OUT* e uno di pressione interstiziale *PPT*), un trasduttore di spostamento, due dispositivi di connessione e una valvola di regolazione del flusso tra interno ed esterno del cassone. I trasduttori di pressione *TPT\_IN* e *PPT* registrano, rispettivamente, la pressione totale e interstiziale agente sulla superficie inferiore del coperchio. Il trasduttore di spostamento misura lo spostamento relativo tra la superficie superiore del caolino e il cassone. I due dispositivi di connessione collegano il modello di cassone al braccio di carico dell'attuatore e alla pompa a siringa. Tra l'estremità inferiore del braccio di carico e il coperchio è inserita una cella di carico che misura la forza assiale agente su di esso. La valvola regola il flusso di acqua tra interno ed esterno del cassone; è lasciata aperta durante le fasi di installazione per peso proprio e di estrazione, viene chiusa in tutte le altre fasi.

La prova in esame si articola in quattro fasi: installazione, equalizzazione, applicazione dei carichi ed estrazione. Di seguito si descrivono brevemente le varie fasi analizzando nel dettaglio i risultati ottenuti durante l'applicazione dei carichi.

Il processo di installazione si divide in due fasi: l'installazione per peso proprio e quella per suzione. Nella prima fase il cassone viene infisso a velocità costante (0.25 mm/s) con la valvola sul coperchio completamente aperta. L'installazione per peso proprio termina quando la lettura della cella di carico uguaglia il peso parzialmente sommerso del cassone (163 N). Durante l'infissione per suzione la valvola sul coperchio viene chiusa e la lettura della cella di carico mantenuta costante. In questa fase si aziona la pompa a siringa imponendo al pistone una velocità di risalita costante di 1.96 mm/s. Aspirando acqua dall'interno del cassone si genera una differenza di pressione tra due punti posti alla stessa quota all'esterno e all'interno del cassone; questa differenza di pressione d'acqua viene denominata suzione. Il processo di installazione si considera concluso quando l'estremità inferiore del cassone penetra per almeno 6 mm nello strato di sabbia; nella prova in esame si è raggiunta una profondità di infissione di 126.5 mm. In questo test, quindi, il coperchio non poggia sul terreno ma è separato da quest'ultimo da uno strato di acqua dello spessore di 1.5 mm.

Durante l'infissione si generano apprezzabili sovrappressioni interstiziali soltanto nello strato di argilla. Prima di applicare sul cassone i cicli di carico-scarico, si lasciano dissipare le sovrappressioni interstiziali a un'accelerazione di 100g per 30 min mantenendo la lettura della cella di carico costante (fase di equalizzazione).

Il modello di cassone viene quindi sollecitato con tre cicli di carico-scarico di ampiezza crescente pari a 534, 1068 e 1602 N. La velocità di applicazione dei carichi è di 20 N/s ed è sufficientemente bassa da non indurre sovrappressioni interstiziali nello strato di sabbia.

I risultati ottenuti in questa fase sono rappresentati alla scala del modello in Figura 1b. Durante le fasi di carico la risposta del complesso cassone-terreno è caratterizzata da una graduale riduzione della rigidità e dall'accumulo di spostamenti in gran parte non reversibili. Nelle fasi di scarico, invece, il comportamento dell'opera è reversibile e la rigidità è sostanzialmente costante e uguale nei tre cicli.

Il carico  $Q$  applicato sul cassone si trasferisce in parte allo strato di argilla e in parte al terreno

adiacente alla parete laterale del cassone. Il carico  $Q_A$  trasmesso direttamente allo strato di caolino è dedotto dalle letture dei trasduttori  $TPT_{IN}$  e  $PPT$  ed è pari all'incremento di pressione dell'acqua per l'area interna del cassone. Il carico  $Q_T$  trasferito al terreno adiacente alla parete laterale è calcolato, invece, per differenza. Come emerge dalla Figura 1b, nel primo ciclo il carico  $Q_A$  è praticamente nullo e  $Q$  coincide con  $Q_T$ . Nei cicli successivi il carico è trasmesso per 23% direttamente allo strato di argilla e per il restante 77% al terreno circostante la parete laterale. È possibile osservare come tale percentuale aumenta quando il carico viene mantenuto costante, raggiungendo il 93% nel secondo ciclo e l'88% nel terzo. Questa ridistribuzione del carico è legata ai fenomeni di dissipazione delle sovrappressioni interstiziali che si manifestano nello strato di argilla. Al ridursi della pressione dell'acqua nel cuscinetto, il carico  $Q_A$  decresce e di conseguenza  $Q_T$  aumenta gradualmente.

La percentuale di carico trasferita direttamente allo strato di caolino è sorprendentemente bassa: tale risultato indica che molto probabilmente si sono innescati dei fenomeni di cavitazione durante l'infissione per suzione. La formazione di bolle d'aria riduce, infatti, la rigidità del cuscinetto d'acqua e spiegherebbe percentuali di carico così basse. Tale ipotesi è suggerita anche dalle letture del trasduttore di spostamento  $w_{LDT}$  che mostrano, durante le fasi di carico, una significativa riduzione dello spessore del cuscinetto d'acqua (da 1.5 a 0.8 mm).

### Modellazione numerica

Le prove in centrifuga sono simulate con il codice di calcolo *FLAC 2D* alla scala del prototipo. Sfruttando l'assialsimmetria del problema in esame, il modello di terreno è discretizzato con un reticolo di larghezza  $B$  pari a 19 m (metà larghezza dello *strong-box*) e altezza  $H$  pari a 19.5 m. Allontanandosi dal cassone, le dimensioni degli elementi aumentano gradualmente da 5x20 a 50x75 cm. I nodi del reticolo disposti lungo i bordi laterali possono traslare solo verticalmente, quelli disposti lungo il bordo inferiore sono vincolati in entrambe le direzioni. Sulla superficie superiore della griglia è applicato un carico uniformemente distribuito pari alla pressione esercitata dall'acqua sullo strato di argilla sottostante (106 kPa). Nelle analisi numeriche il caolino è assimilato a un mezzo elasto-plastico perfetto con un criterio di resistenza di Mohr Coulomb; i parametri di resistenza e deformabilità impiegati nelle simulazioni sono ripresi dai dati di letteratura (Chen & Randolph, 2007; Gaudin & Randolph, 2007). Per la *silica sand* si è adottato, invece, il legame Severn Trent (Gajo & Wood, 1999a, 1999b) precedentemente implementato nella libreria del codice di calcolo (Rotisciani, 2010). Questo modello è un legame costitutivo avanzato a plasticità diffusa e a incrudimento cinematico che descrive in modo soddisfacente la risposta dei terreni sabbiosi lungo generici percorsi di carico. Nella formulazione analitica di Severn Trent compaiono complessivamente 11 parametri ricavati, in parte direttamente e in parte per *back analysis*, dai risultati di prove di compressione triassiale drenate e non drenate (Rotisciani, 2010).

Lo stato tensionale iniziale nel terreno è litostatico e la distribuzione delle pressioni interstiziali è idrostatica a partire da una superficie piezometrica posta a 10.6 m dal piano campagna.

Nelle analisi numeriche non è simulato il reale processo di installazione del cassone; gli elementi con cui è modellata la fondazione sono semplicemente attivati assegnando loro un legame elastico lineare con le caratteristiche dell'acciaio per la parete e dell'alluminio per il coperchio.

Il contatto cassone-terreno è modellato con interfacce elasto-plastiche perfette con un criterio di resistenza di Mohr Coulomb. Durante l'applicazione dei carichi lo strato di argilla risponde in condizioni non drenate; si è deciso pertanto si assegnare all'interfaccia cassone-caolino una legge di resistenza puramente coesiva con una coesione di 4.5 kPa. Questo valore è dedotto dai risultati delle prove penetrometriche e dalle letture della cella di carico in fase di

infissione ed estrazione. Al contatto cassone-sabbia la legge di resistenza è puramente attrittiva ed è caratterizzata da un angolo di attrito pari a quello di stato critico:  $\varphi=32^\circ$ .

Lo strato di acqua che separa il coperchio del cassone dall'argilla è assimilato a un mezzo elastico lineare con un peso di volume di  $10 \text{ kN/m}^3$  e una rigidezza al taglio modesta rispetto a quella volumetrica.

La risposta del complesso cassone-terreno è condizionata principalmente da due elementi: la deformabilità del cuscinetto e il comportamento dello strato di sabbia. Nelle analisi numeriche si è adottato per la *silica sand* un legame a plasticità diffusa capace di ben simulare la risposta di depositi incoerenti a piccoli e medi livelli di deformazione. Le capacità previsionali di Severn Trent in questo specifico problema al finito sono valutate assegnando all'interno del cuscinetto, per ogni incremento di carico, la pressione dell'acqua effettivamente misurata. I risultati di queste analisi non sono condizionati dalla rigidezza del cuscinetto (la ripartizione del carico è infatti fissata) e dipendono esclusivamente dalla risposta del legame costitutivo Severn Trent (la resistenza mobilitata nello strato di argilla, peraltro modesta, è fissata dal valore assunto per la resistenza non drenata all'interfaccia). Il buon accordo tra la previsione e i dati sperimentali indica che il modello numerico è in grado di cogliere gli aspetti principali della risposta del complesso cassone-terreno (Figura 2).

Il modello numerico è stato successivamente utilizzato per valutare l'influenza della deformabilità del cuscinetto sulla curva carico-spostamento della fondazione. La stessa prova è stata simulata assegnando allo strato d'acqua due moduli di rigidezza pari a  $2 \cdot 10^6 \text{ kPa}$  e  $20 \text{ kPa}$ . Questi due valori sono associati, rispettivamente, alla completa saturazione del cuscinetto e alla presenza di bolle d'aria prodotte da fenomeni di cavitazione. I risultati di queste simulazioni sono riportati in Figura 3 e Figura 4.

Nel primo caso (Figura 3) il carico  $Q_A$  trasferito direttamente allo strato di argilla oscilla nelle varie fasi tra il 30 e il 50%. Il restante carico  $Q_T$  è trasferito al terreno per attrito laterale e come carico alla punta. Lungo la superficie laterale esterna la risultante degli sforzi di taglio mobilitati nello strato di argilla si mantiene costante nelle varie fasi e pari a circa 1 MN. Al contrario lungo la superficie laterale interna il grado di mobilitazione della resistenza è prossimo allo zero. Il carico complessivamente trasmesso allo strato di sabbia oscilla nelle varie fasi tra il 70 e il 90% di  $Q_T$ . La resistenza mobilitata lungo la superficie laterale esterna si mantiene costante nelle varie fasi e pari a circa 0.4 MN. Lungo la superficie laterale interna, invece, la risultante degli sforzi di taglio è maggiore di quella esterna e aumenta durante il processo di carico. Lo stato tensionale efficace al di sotto dell'area di impronta del cassone risente, infatti, del carico  $Q_A$  trasmesso dal cuscinetto d'acqua allo strato di argilla. La percentuale di carico trasmessa al terreno come carico alla punta aumenta durante la prova e raggiunge circa il 60% di  $Q_T$ . Complessivamente il comportamento del complesso cassone-terreno è molto rigido ed è caratterizzato da spostamenti non superiori a 6.5 cm. In questo caso il cassone e lo strato di argilla al suo interno si comportano come un blocco rigido: la scarsa mobilitazione degli sforzi di taglio nello strato di argilla lungo la superficie interna indica che non si hanno significativi spostamenti relativi tra parete e terreno.

Assegnando al cuscinetto un modulo di rigidezza di  $20 \text{ kPa}$ , si ottengono spostamenti nettamente superiori, che raggiungono a fine prova i 23 cm (Figura 4). Il carico  $Q$  si trasferisce quasi interamente al terreno adiacente alla parete del cassone: il carico  $Q_A$  non supera mai il 20%. Gli sforzi di taglio al contatto cassone-caolino sono completamente mobilitati già nelle prime fasi di carico da entrambi i lati. Il carico trasmesso allo strato di sabbia è leggermente inferiore al caso precedente e oscilla tra il 60 e l'80% di  $Q_T$ . La risultante degli sforzi di taglio lungo la superficie laterale interna è maggiore di quella esterna ma tale differenza è meno marcata di quella mostrata in Figura 3. Il carico alla punta aumenta durante il processo di carico e raggiunge a fine prova circa il 70% di  $Q_T$ .

I dati sperimentali, pur ricadendo nella porzione di spazio delimitata dalle due previsioni numeriche, sono più vicini al caso 2 (Figura 5). Ciò sembra confermare l'ipotesi che nella prova in centrifuga durante l'infissione si siano innescati dei fenomeni di cavitazione con la conseguente formazione di bolle d'aria all'interno del cassone.

### Conclusioni

Nella presente nota è stata illustrata la risposta sperimentale di un cassone a suzione installato in un terreno stratificato e sollecitato da carichi verticali. La prova eseguita in centrifuga è stata successivamente simulata con il codice di *FLAC 2D*, adottando per lo strato sabbioso, in cui è infisso il cassone, un legame costitutivo basato sui concetti di plasticità diffusa e incrudimento cinematico. Le analisi numeriche, oltre a confermare la necessità di adottare modelli costitutivi avanzati in grado di cogliere le forti non linearità del comportamento meccanico dei terreni, hanno evidenziato l'influenza della deformabilità del cuscinetto d'acqua sulla risposta del modello. In particolare, a una rigidità del cuscinetto modesta sono associati, a parità di carico applicato, spostamenti anche tre-quattro volte maggiori di quelli relativi a un cuscinetto completamente saturo d'acqua. Questi scostamenti sono legati ai differenti meccanismi di ripartizione e trasferimento del carico dal cassone al terreno di fondazione. Nell'impiego di questa tecnologia appare, quindi, molto importante introdurre appositi accorgimenti tecnici mirati a ridurre o eliminare i volumi d'aria presenti all'interno del cassone.

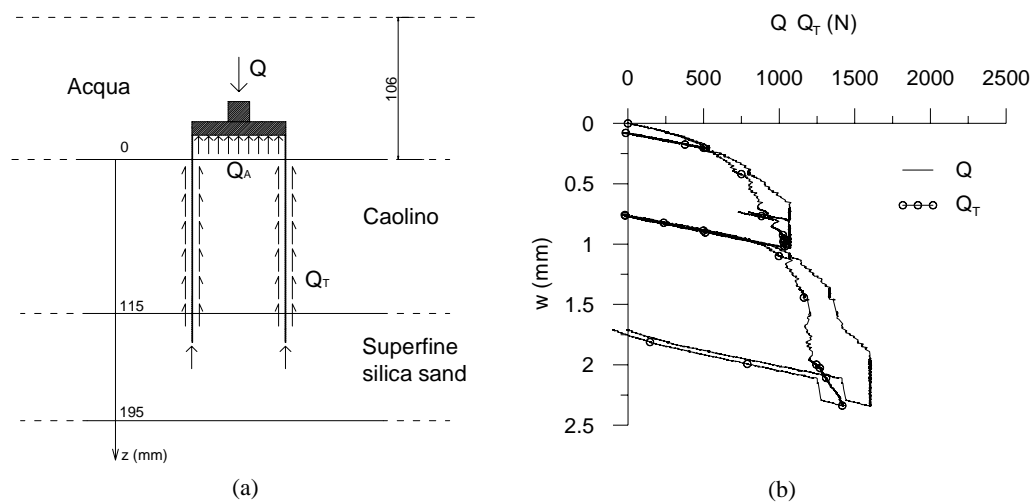


Figura 1. (a) Ripartizione del carico; (b) Curve carico-spostamento

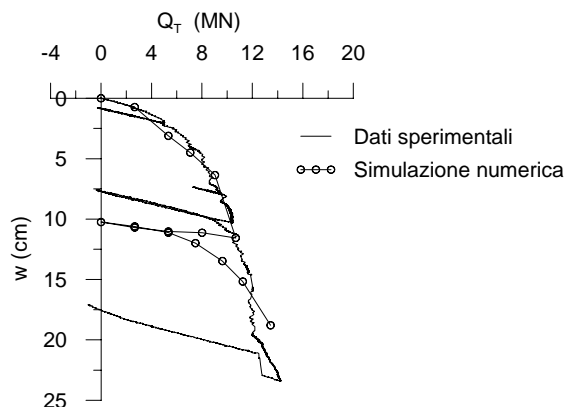


Figura 2. Validazione del modello: confronto tra la previsione numerica e i dati sperimentali

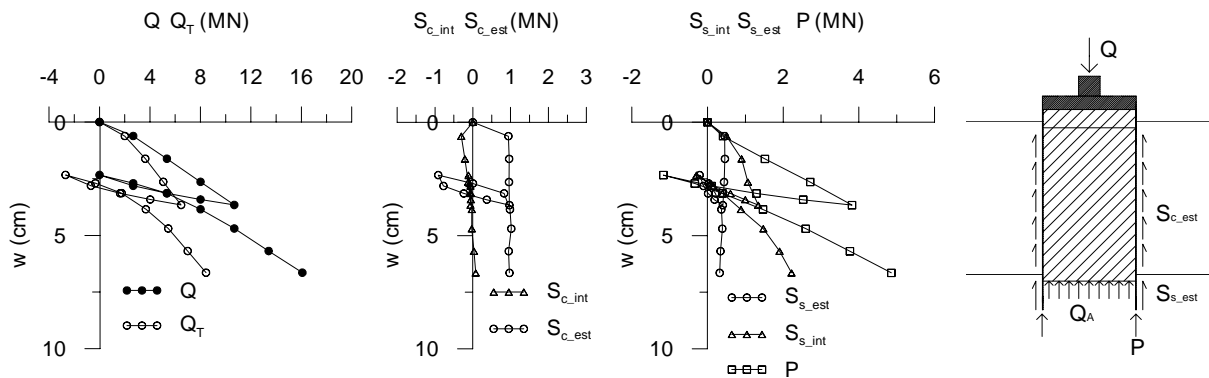


Figura 3. Risultati dell'analisi numerica ottenuti ipotizzando un cuscinetto rigido (caso 1)

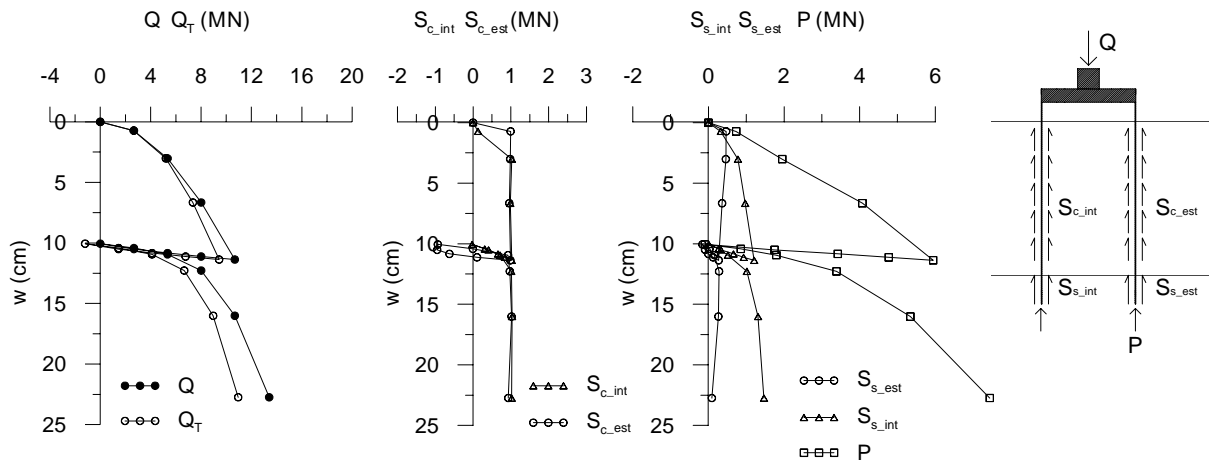


Figura 4. Risultati dell'analisi numerica ottenuti ipotizzando un cuscinetto molto deformabile (caso 2)

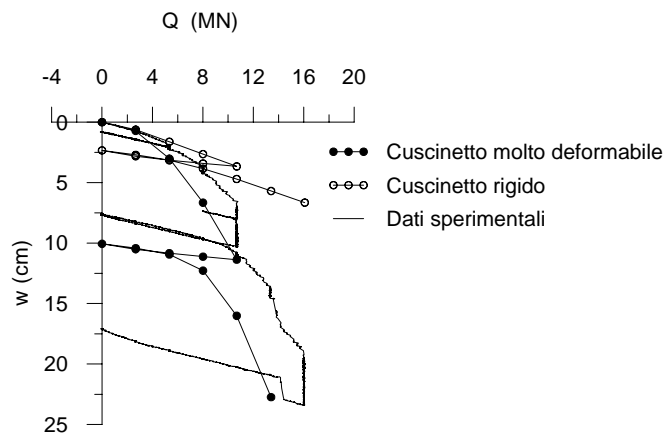


Figura 5. Confronto tra i dati sperimentali e le previsioni numeriche (cuscinetto rigido e molto deformabile)

## Bibliografia

- Chen, W. and Randolph, M. F. (2007). External radial stress changes and axial capacity for suction caissons in soft clay. *Géotechnique*, 57 (6): 499 – 511.
- Gajo, A. and Wood, D. M. (1999a). Severn Trent: a kinematic-hardening constitutive model: the q-p formulation. *Géotechnique*, 49 (5): 595 – 614.
- Gajo, A. and Wood, D. M. (1999b). A kinematic hardening constitutive model for sands: the multiaxial formulation. *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23: 925 – 965.
- Gaudin, C. and Randolph, M. F. (2008). *Laboratory centrifuge compression loading tests for building department in Hong Kong for meteorological mast*. University of Western Australia, Research report GEO: 08450.
- Rotisciani, G. M. (2010). *Implementazione e utilizzo di legami costitutivi avanzati per i terreni sabbiosi nella risoluzione di problemi al finito: studio del comportamento dei cassoni a suzione*. Tesi di dottorato, Sapienza Università di Roma.