

## **STATI LIMITE ULTIMI PER SPALLE DA PONTE**

Davide Noè Gorini  
*Università di Roma Sapienza*  
*davideno.gorini@uniroma1.it*

Andrew J. Whittle  
*Massachusetts Institute of Technology (MA)*  
*ajwhittl@mit.edu*

Luigi Callisto  
*Università di Roma Sapienza*  
*luigi.callisto@uniroma1.it*

### **Sommario**

Nonostante la risposta dinamica delle spalle possa influenzare la prestazione di un ponte, la valutazione di questo effetto è complicata per l'elevatissima domanda computazionale dei modelli numerici completi, che includano esplicitamente nel modello strutturale la spalla e il terreno che interagisce con essa. In questa nota si fornisce un contributo alla definizione di un approccio semplificato di analisi basato sulla simulazione del comportamento delle spalle tramite macro-elementi, focalizzando in particolare l'attenzione sulle condizioni ultime dell'insieme spalla-terreno. Tramite l'applicazione dei teoremi di estremo dell'analisi limite, attraverso il metodo degli elementi finiti con mesh adattiva, si individuano i potenziali meccanismi plastici del sistema spalla-terreno, considerando anche meccanismi combinati in cui i pali di fondazione della spalla possano raggiungere la propria resistenza insieme al terreno. Si propone quindi un modello per la previsione della resistenza ultima delle spalle in condizioni di carico multi-assiali, identificato tramite la calibrazione di un numero limitato di parametri costitutivi. È mostrato come gli effetti inerziali associati all'azione sismica possano essere incorporati nel modello tramite una contrazione e rotazione della superficie che rappresenta le condizioni ultime della spalla, definita nello spazio delle forze. La superficie così definita si presta a essere inclusa in una rappresentazione generale della risposta sismica di una spalla attraverso la definizione di un macro-elemento per le spalle, ma è anche utilizzabile più immediatamente come uno strumento di verifica della resistenza delle spalle in un approccio alla progettazione sismica in termini di forze statiche equivalenti.

### **1. Inquadramento del problema e metodo di analisi**

Le importanti forze trasmesse dalla struttura di un ponte alle spalle in occasione di eventi sismici severi possono produrre degli spostamenti significativi di quest'ultima derivanti dalla mobilitazione della resistenza sia nel terreno che nelle membrature strutturali. In alcuni casi, guidare la spalla verso la mobilitazione della resistenza secondo opportuni meccanismi plastici potrebbe addirittura avere un effetto favorevole sulla prestazione della struttura nel suo complesso, con dissipazione di parte dell'energia sismica e conseguente riduzione delle sollecitazioni indotte dal sisma nella struttura. Nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca riguardante l'interazione terreno-spalla-sovrastuttura, viene presentato in questa nota uno studio sui meccanismi plastici del sistema spalla-terreno per effetto di diverse combinazioni di forze trasmesse dall'impalcato alla spalla. Il fenomeno è studiato attraverso applicazioni dei teoremi dell'analisi limite con il metodo degli elementi finiti (Sloan 1988, Sloan 1989), facendo uso dei codici di calcolo Optum G2 e Optum G3 (OptumCE 2016), relativi alla modellazione piana e tridimensionale, rispettivamente. Quindi si sono valutate le soluzioni di estremo

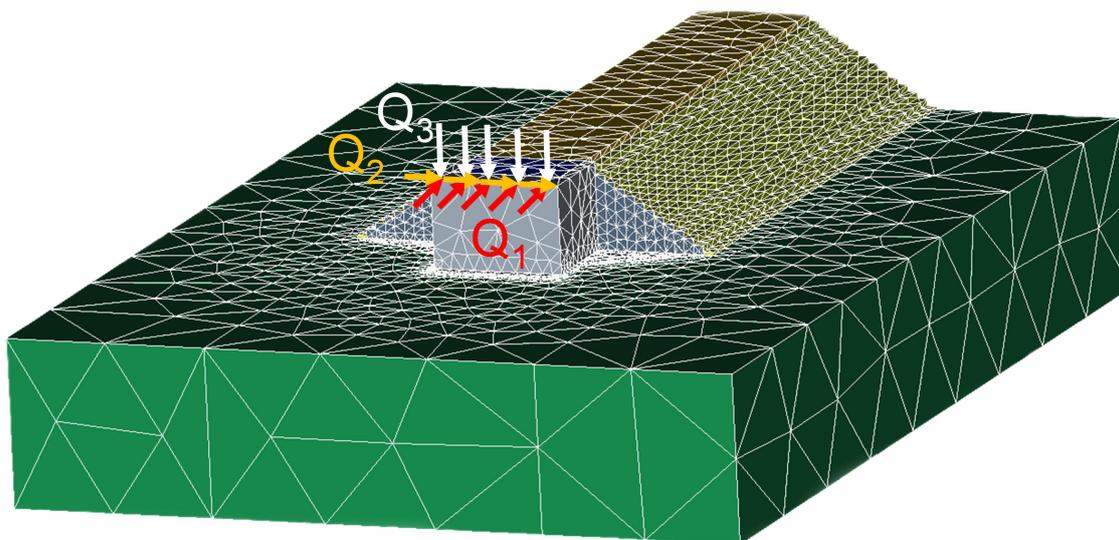


Fig 1. Modello spalla-terreno implementato in Optum G3 con visualizzazione della mesh ottimizzata.

superiore e inferiore su modelli locali di spalla come quello rappresentato in Fig. 1. Ogni elemento componente il dominio di calcolo è modellato tramite elementi solidi con comportamento rigido-plastico perfetto descritto dal criterio di resistenza di Mohr-Coulomb e legge di flusso associata. Il dominio è composto dalla spalla, dal terreno di fondazione, dal rilevato e dal terreno di riempimento posto immediatamente a tergo della spalla. Il contatto tra terreno e struttura è modellato tramite sottili strati di elementi solidi con appropriati parametri di resistenza.

Nelle simulazioni si sono considerate diverse direzioni della forza applicata in testa al muro centrale, rappresentativa del carico trasmesso dall'impalcato. I versi positivi delle componenti  $Q_i$  del carico sono quelli raffigurati in Fig. 1. Ogni analisi è composta da diverse iterazioni su un modello con mesh adattiva, che consente di concentrare la discretizzazione nelle zone dove si localizzano le deformazioni plastiche. L'iterazione del calcolo si arresta quando le due soluzioni di estremo si stabilizzano, verificando che esse delimitino un intervallo di valori sufficientemente piccolo per una buona approssimazione della soluzione esatta. Ottenuta la convergenza, è utile rappresentare i risultati con riferimento a soluzioni di estremo superiore, per i quali è possibile visualizzare anche i cinematismi plastici. I risultati sono espressi in termini di forze per unità di lunghezza del muro della spalla per poter confrontare la risposta dei modelli tridimensionali con quella relativa al caso piano.

## 2. Superficie ultima del sistema spalla-terreno

Si consideri una spalla con fondazione superficiale soggetta all'azione combinata di una forza longitudinale  $Q_1$  e verticale  $Q_3$ . La geometria della spalla è ispirata a quella del caso di studio del viadotto Pantano (Gorini e Callisto 2017) e presenta un'altezza del muro pari a 13.5 m e dimensioni in pianta della platea di fondazione di 17.5 m e 20.0 m, in direzione longitudinale e trasversale. In questa configurazione di riferimento, la spalla viene vista come un corpo infinitamente resistente, quindi caratterizzata dal solo peso di volume pari a  $25 \text{ kN/m}^3$ , mentre il terreno di fondazione e il rilevato presentano uguale angolo di resistenza al taglio di  $30^\circ$  e peso di volume pari a  $20 \text{ kN/m}^3$ . Per gli elementi di interfaccia tra le pareti strutturali e il terreno, si sono considerate le due condizioni limite di contatto scabro, con angolo di attrito uguale a quello del terreno, e puramente liscio. Si assume assenza di pressioni interstiziali nel terreno. In Fig. 2(a) si mostrano nel piano  $\{Q_1, Q_3\}$  i punti rappresentativi dell'attivazione di meccanismi plastici globali del sistema per diversi rapporti tra la forza verticale e quella longitudinale. Si osserva come i punti di collasso possono essere ben descritti da un'ellisse, caratterizzata da una certa orientazione  $\delta$  rispetto gli assi coordinati, che individua

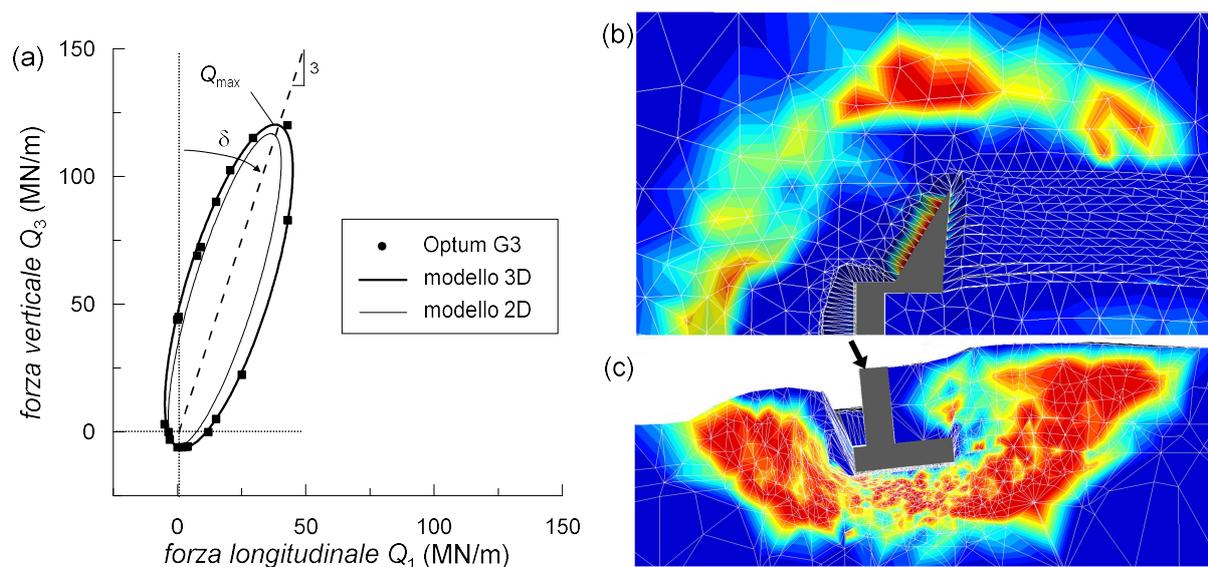


Fig 2. Punti di collasso del sistema spalla-terreno per un carico combinato longitudinale-verticale (a) e meccanismo di collasso in corrispondenza della capacità massima, vista in pianta (b) e sezione centrale (c).

sull'ellisse il rapporto tra la forza verticale e quella longitudinale corrispondenti alla massima capacità  $Q_{max}$ . L'ellisse risulta quasi interamente contenuta nel primo quadrante, riflettendo il carattere fortemente asimmetrico della risposta della spalla: la copresenza delle due componenti del carico conduce a un netto incremento della capacità quando le forze sono rivolte verso il terrapieno mentre porta a una altrettanto repentina riduzione della resistenza quando esse tendono ad allontanare la spalla dal terreno. Nel caso di una spalla con fondazione superficiale, l'orientazione del luogo ultimo è fortemente controllata dall'angolo di resistenza al taglio all'interfaccia spalla-terreno, il quale varia tra  $11^\circ$ , nel caso di contatto liscio, a  $18^\circ$  quando, come in Fig. 2, l'angolo di attrito dell'interfaccia è pari a quello del terreno con cui è a contatto. La capacità massima invece dipende dalla resistenza del terreno e dalla geometria della spalla. Il meccanismo plastico ottenuto in corrispondenza della capacità massima è illustrato in Fig. 2(b) e 2(c), dove sono rappresentate le isolinee del lavoro dissipato dalle forze interne. Guardando alla sezione centrale, si evince come la resistenza del terreno venga mobilitata secondo un meccanismo combinato di raggiungimento della resistenza passiva nel terreno a tergo del muro e della capacità portante del terreno di fondazione. In pianta, la superficie di scorrimento circonda la struttura della spalla per poi estendersi nel rilevato, delineando un meccanismo tridimensionale che porta a un incremento di capacità rispetto all'ellisse ultima relativa al problema piano (modello 2D in Fig. 2(a)).

Quando anche la forza trasversale  $Q_2$  è applicata in testa al muro centrale, la dimensione dell'ellisse ultima tende a ridursi all'aumentare del rapporto  $Q_2/Q_1$ , come descritto dalle ellissi rappresentate in Fig. 3, ottenute per interpolazione dei risultati dell'analisi limite. Inoltre, guardando all'effetto della forza trasversale nel piano  $Q_1=0$ , si vede come il luogo ultimo possa essere di nuovo rappresentato da un'ellisse di differenti dimensioni. Di conseguenza, la superficie ultima di una spalla soggetta a un carico triassiale applicato in testa può essere descritta da un ellissoide, fortemente decentrato e inclinato rispetto agli assi coordinati, che rispecchia i meccanismi di interazione che si generano per carichi multi-assiali.

### 3. Spalle con fondazioni profonde

Lo studio sulle condizioni ultime si sposta in questo paragrafo verso le spalle con fondazioni profonde. Nel codice Optum G3, i pali sono stati modellati come degli elementi solidi e il contatto palo-terreno è simulato con uno strato di modesto spessore che circonda il palo. L'utilizzo di elementi solidi per modellare le membrature strutturali consente di riprodurre l'effettiva geometria dei pali e soprattutto di

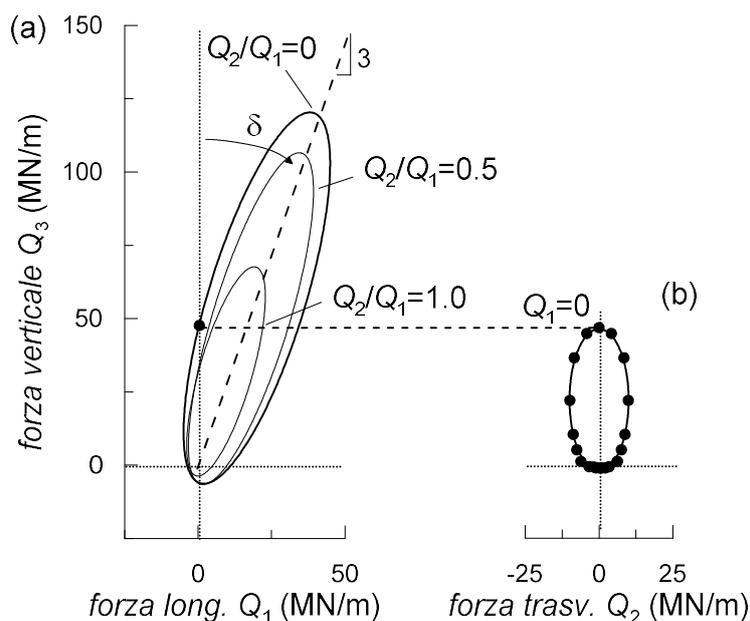


Fig 3. Tracce della superficie ultima del sistema spalla-terreno nel piano  $Q_2 = 0$  (a) e  $Q_1 = 0$  (b).

studiare fenomeni di plasticizzazione locali che si possono verificare lungo il fusto. Il comportamento plastico dei pali è stato descritto mediante il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, calibrato per rappresentare un'approssimazione lineare del criterio di resistenza di elementi in calcestruzzo armato presso-inflessi (Pujol et al. 2016). I pali sono quindi progettati come elementi in calcestruzzo armato, in cui il conglomerato presenta una classe di resistenza C20/25 e l'armatura è stata dimensionata secondo procedure standard agli stati limite. La coesione e l'angolo di attrito equivalenti assegnati in Optum risultano pari a 5000 kPa e  $55^\circ$  rispettivamente. Come mostrano i risultati dell'analisi limite illustrati in Fig. 4, nel caso di fondazioni profonde la superficie ultima può ancora essere determinata con il modello a forma ellissoidica proposto. In particolare, nella Fig. 4 si propone il confronto tra la capacità della spalla con fondazione superficiale presa a riferimento sino ad ora, e quella relativa alla stessa spalla ma con l'inserimento di un gruppo di pali di fondazione, per due diversi rapporti di snellezza  $D_p/L_p$  del singolo palo, pari a 18.5 e 4.0. La presenza di un gruppo di pali conferisce una maggiore resistenza alla spalla, mantenendo però inalterata la forma della superficie ultima. La capacità della spalla cresce all'aumentare del rapporto di snellezza, specialmente nella regione dove la spalla esibisce la massima resistenza, e inoltre si verifica una modesta rotazione dell'ellisse rispetto al caso di fondazione superficiale. Guardando ai meccanismi plastici in corrispondenza della massima capacità, nel caso di meccanismo di palo lungo si mobilita completamente la resistenza dei pali in prossimità della loro connessione con la platea di fondazione, mentre la profondità della seconda cerniera plastica varia in funzione della fila, in quanto il momento di snervamento del singolo palo è funzione del carico assiale agente in esso. Ne segue che la seconda cerniera plastica si posiziona a profondità maggiori per le file più a monte, risultato che conferma quanto già individuato in precedenza da Callisto e Rampello (2013). Con pali tozzi (rapporto di snellezza pari a 4.0) si verifica invece un meccanismo intermedio, in cui la platea e il gruppo di pali cominciano a esibire un comportamento ultimo prossimo a quello di una fondazione superficiale di dimensioni maggiori: la superficie di scorrimento attraversa interamente le prime due file di pali per poi estendersi nel terreno.

#### 4. Effetti inerziali

In condizioni sismiche, gli effetti inerziali che si sviluppano nel terreno e nella spalla possono alterare l'attivazione dei meccanismi plastici del sistema. Un metodo semplificato per studiare questo

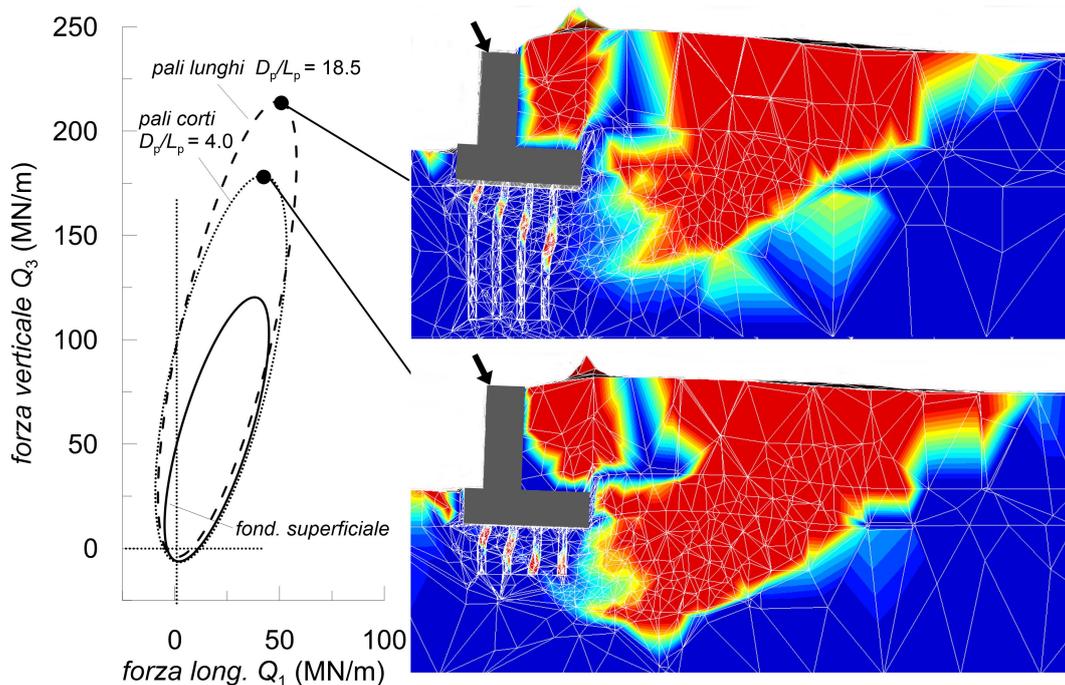


Fig 4. Confronto tra la superficie ultima della spalla di riferimento con fondazione superficiale e quella relativa alla stessa spalla con fondazione profonda, per due diversi rapporti di snellezza dei pali.

fenomeno consiste nel rappresentare gli effetti indotti dall'eccitazione sismica tramite delle forze statiche equivalenti, considerate puramente orizzontali, riprodotte nel codice Optum assegnando un coefficiente sismico  $k_h$  costante nel tempo a tutto il dominio. Dai risultati illustrati in Fig. 5 è evidente come le forze di inerzia provochino una contrazione e una rotazione della superficie limite. Più nel dettaglio, la dimensione del dominio ammissibile si riduce sempre all'aumentare del coefficiente sismico ma in maniera più pronunciata quanto le forze di inerzia sono dirette verso monte, in quanto esse favoriscono l'attivazione del meccanismo plastico associato alla capacità massima. Le relative superfici di scorrimento, illustrate in Fig. 6, si spostano progressivamente verso monte all'aumentare dell'accelerazione normalizzata mentre situazione opposta si verifica quando le forze di inerzia sono rivolte verso valle. Inoltre, l'effetto sull'orientazione dell'ellisse è emisimmetrico e leggermente più

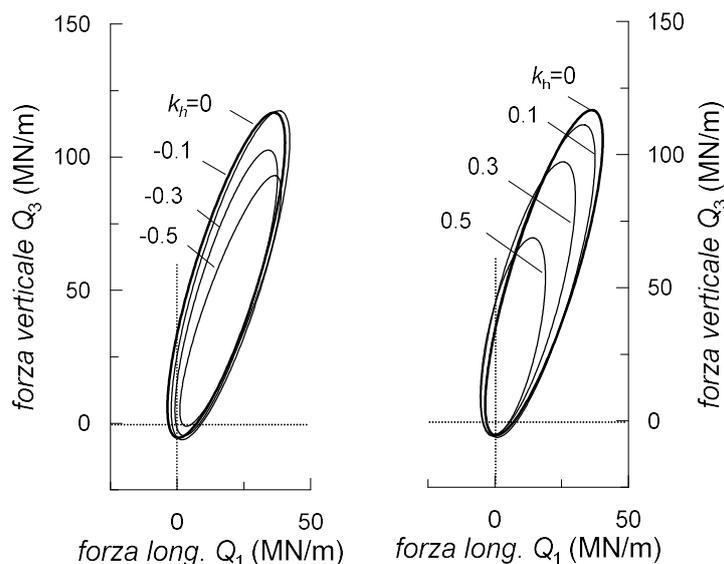


Fig 5. Effetti inerziali: confronto tra la superficie ultima in condizioni statiche ( $k_h=0$ ) e quelle ottenute al crescere del coefficiente sismico ( $k_h>0$  se diretto verso il terrapieno).

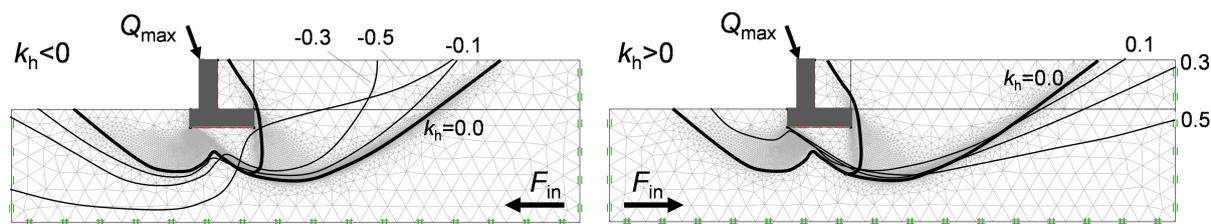


Fig 6. Effetto del coefficiente sismico sui meccanismi plastici globali corrispondenti alla massima capacità del sistema spalla-terreno.

accentuato quando le forze di inerzia sono rivolte verso valle, portando specialmente a una rilevante riduzione della forza longitudinale associata al raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite attivo.

## 5. Calibrazione del modello

Il modello proposto consente di determinare la superficie ultima del sistema spalla-terreno per percorsi di carico triassiali trasmessi dalla sovrastruttura del ponte. La formulazione della superficie ultima è stata estesa per tener conto della trasmissione di una coppia al contatto spalla-impalcato, contenuta nel piano longitudinale, qui omessa per brevità. Il modello ellissoidico così definito vede la sua completa definizione mediante l'identificazione di un numero limitato di parametri. In particolare, a valle di uno studio parametrico svolto analizzando le condizioni ultime su diverse configurazioni geometrico-meccaniche del sistema spalla-terreno, si è visto come l'intero ellissoide dei carichi ultimi possa essere derivato sulla base della sola capacità massima, o equivalentemente del carico limite verticale, assumendo costanti il rapporto di forma, l'orientazione e la distanza del centro dell'ellissoide dall'origine degli assi, normalizzata rispetto la capacità massima.

Il modello individua un dominio ammissibile per le forze di interazione scambiate al contatto spalla-impalcato. Per azioni statiche, questo dominio può essere inteso come rappresentativo di una condizione limite, rispetto alla quale debba prescriversi un adeguato margine di sicurezza. In analisi dinamiche nell'ambito di un approccio in termini di spostamenti, il dominio plastico può invece intendersi come una condizione di plasticizzazione che possa essere effettivamente raggiunta durante le fasi intense del sisma, oppure come una frontiera di un modello a macro-elementi formulato nell'ambito della plasticità con incrudimento.

## Bibliografia

- Callisto L., Rampello S. (2013). "Capacity design of retaining structures and bridge abutments with deep foundations", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139(7), 1085-1095.
- Gorini D.N., Callisto (2017). "Study of the dynamic soil-abutment-superstructure interaction for a bridge abutment". Proc. 1<sup>st</sup> European Conference on OpenSees (OpenSees Days Europe 2017), Porto, 57-60.
- OptumCE (2016). "OptumG2 v. 2016". Manual. <https://optumce.com/products/brochure-and-datasheet/>.
- Pujol S., Hanai N., Ichinose T., Sozen M.A. (2016). "Using Mohr-Coulomb criterion to estimate shear strength of reinforced concrete columns", *ACI Structural Journal*, 113, 459-468.
- Sloan S.W. (1988). "Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 12, 61-67.
- Sloan S.W. (1989). "Upper bound limit analysis using finite elements and linear programming", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 13, 263-282.