

## COMPORTAMENTO DI GALLERIE IN VERSANTI IN FRANA

Salvatore Scandale

*“Sapienza” Università di Roma*  
*salvatore.scandale@uniroma1.it*

Augusto Desideri

*“Sapienza” Università di Roma*  
*augusto.desideri@uniroma1.it*

### Sommario

Questo lavoro esamina i fattori geometrici e meccanici che influenzano i meccanismi di interazione frana-galleria, in cui si presuppone un meccanismo plastico con mobilizzazione delle resistenze nel terreno. Definite le grandezze adimensionali che governano il fenomeno utilizzando i principi dell'analisi dimensionale e del teorema di Buckingham, si è avviato uno studio parametrico di cui sono presentati alcuni risultati.

### 1. Introduzione

La nota si inserisce in un programma di ricerca diretto a sviluppare uno studio di interazione tra gallerie e movimenti di versante. Lo scavo di una galleria in un pendio è un problema complesso che può produrre la sovrapposizione di diversi effetti; in questo lavoro si pone particolare attenzione allo studio degli effetti che un movimento di versante può avere sul rivestimento definitivo di una galleria.

Come messo in evidenza in alcuni lavori (Boldini et al. 2004, Scandale et al. 2014), i maggiori fenomeni di interazione tra opera e terreno instabile, si hanno nei tratti in cui la superficie di scorrimento interseca i rivestimenti della galleria. I fattori che intervengono nel definire la risposta della struttura sono molteplici. Tra questi rivestono un ruolo fondamentale le grandezze che definiscono la geometria del sistema (dimensione e forma della galleria, inclinazione del pendio e forma della superficie di scorrimento, posizione del rivestimento rispetto alla superficie di rottura), lo stato di sforzo iniziale nel pendio, le caratteristiche meccaniche dei terreni e del rivestimento. Il presente lavoro fornisce alcune indicazioni sull'influenza di alcuni fattori.

### 2. Modello matematico e formulazione adimensionale

Si è in primo luogo ricorso ad una forte semplificazione geometrica del problema, studiando in condizioni di deformazione piana, l'interazione prodotta da uno scorrimento planare di un pendio indefinito con una galleria di forma circolare che interseca la superficie di scorrimento. Per i terreni si è assunto un comportamento plastico perfetto, mentre per semplicità la galleria è stata assimilata ad un corpo infinitamente rigido. Tra galleria e terreno si è ipotizzata l'esistenza di un'interfaccia attritiva. Lo schema geometrico è presentato in figura 1.

L'intero studio è teso a definire l'influenza che un campo di spostamento della frana ha sul rivestimento della galleria. A tal fine sono state previste analisi con metodi di calcolo agli elementi finiti, mentre le condizioni di flusso plastico intorno alla galleria sono state studiate mediante l'analisi limite a cui si farà riferimento nel seguito. Tutte le analisi sono condotte in condizioni drenate e pressioni interstiziali nulle. Definiti, con l'ausilio dell'analisi dimensionale, i parametri che governano il sistema, si è condotto uno studio parametrico finalizzato ad evidenziare l'importanza delle diverse grandezze in gioco.

Il complesso frana-galleria-formazione stabile, con le ipotesi adottate e in condizioni di equilibrio limite, può comportarsi secondo uno dei meccanismi riportati schematicamente in figura 2 (a,b). Sotto la spinta esercitata dalla coltre in movimento, la galleria può spostarsi ma nello stesso tempo nel terreno si possono sviluppare dei piani di scorrimento che favoriscono il rifluimento di materiale al di sopra dell'opera (meccanismo A – fig. 2a). Nel secondo caso (meccanismo B – fig. 2b), può accadere che la galleria venga scalzata anche nella parte immersa nella formazione stabile e trascinata a valle con il corpo di frana.

Sono analizzati gli effetti prodotti da un movimento di versante sull'opera, non portando in conto lo stato tensionale nel rivestimento indotto dai carichi gravitazionali prima dell'attivazione della frana. Alcune analisi di prova giustificano tale scelta, in quanto hanno mostrato che le sollecitazioni indotte sul rivestimento dal movimento del corpo di frana sono molto più significative di quelle dovute al solo peso proprio del terreno.

Le sollecitazioni indotte dallo scorrimento possono essere sinteticamente rappresentate:

- i) dallo sforzo normale,  $N$  [ $MT^{-2}$ ];
- ii) dal momento flettente,  $M$  [ $MLT^{-2}$ ].

I parametri che possono influenzare il livello di sollecitazione in condizioni limite sono invece:

- 1) il diametro della galleria  $D$  [L];
- 2) la profondità della superficie di scorrimento  $H$  [L];
- 3) la distanza tra la superficie di scorrimento e la calotta della galleria  $s$  [L];
- 4) l'angolo di inclinazione del pendio  $\alpha$  [°];
- 5) il peso dell'unità di volume del terreno  $\gamma$  [ $ML^{-2}T^{-2}$ ];
- 6) l'angolo di attrito del terreno  $\varphi'$  [°];
- 7) la coesione del terreno  $c'$  [ $ML^{-1}T^{-2}$ ];
- 8) il coefficiente riduttivo  $\beta$ , per definire l'angolo di attrito all'interfaccia galleria-terreno.

Non si portano in conto le grandezze che permettono di descrivere il comportamento meccanico del rivestimento, perché quest'ultimo è stato assunto infinitamente rigido. Inoltre è stato trascurato ogni effetto dovuto alla presenza della fase fluida, considerata assente. Nei casi in cui tali assunzioni non fossero giustificate, alle grandezze prese in esame andrebbero aggiunte la rigidità flessionale del rivestimento, le variabili geometriche che definiscono le condizioni al contorno per la fase fluida, la permeabilità del terreno e il peso dell'unità di volume del fluido interstiziale.

Le variabili sono 4 geometriche e  $4 \times 2 = 8$  legate alle caratteristiche dei terreni. Tuttavia alcuni parametri definiti precedentemente, sono stati assunti costanti: per entrambi i terreni si è adottato lo stesso valore del peso dell'unità di volume  $\gamma$  e lo stesso coefficiente  $\beta$  di riduzione dell'angolo  $\varphi'$ , per l'attrito all'interfaccia galleria-terreno. Quindi, per le ipotesi precedentemente espresse, si ottengono 10 parametri governanti. Per i 2 parametri di risposta  $N$  e  $M$ , si possono dunque definire due insiemi  $I^N$  e  $I^M$  di grandezze:

$$I^N := \{N, D, H, s, \alpha, \gamma, \varphi'_i, c'_i, \beta\} \quad e \quad I^M := \{M, D, H, s, \alpha, \gamma, \varphi'_i, c'_i, \beta\}$$

con "i" che indica il numero di terreni a contatto con il rivestimento della galleria.

Fondamento del metodo dell'analisi dimensionale è il teorema di Buckingham del 1914, che può ricondursi al seguente enunciato: *assegnato un processo fisico dipendente da  $n$  grandezze, è sempre possibile esprimerlo con una funzione di  $(n-m)$  gruppi adimensionali, dove  $m$  è il numero di grandezze fondamentali.* Nel particolare caso in esame, le matrici dimensionali dei due insiemi hanno la struttura riportata nelle tabelle I e II. Si nota come il rango  $m$  delle due matrici risulta pari a 2 (essendo la prima e la terza riga proporzionali), perché il problema non dipende dal tempo e quest'ultimo compare solo nella definizione dell'unità di forza  $[F]=[MLT^{-2}]$ .

Dunque come grandezze fondamentali da utilizzare per la normalizzazione si è scelto di adottare la coppia di grandezze  $D$  e  $\gamma$ . Questa decisione ha permesso di dare a molte grandezze adimensionali un significato di facile interpretazione. Inoltre ha consentito l'adozione di alcune grandezze tipiche delle

gallerie e dei movimenti di versante. Utilizzando la normalizzazione rispetto alle due grandezze fondamentali, i parametri adimensionali che reggono il fenomeno sono dunque  $10-2=8$ , riportati in tabella III insieme alle grandezze adimensionali utilizzate per rappresentare la risposta.

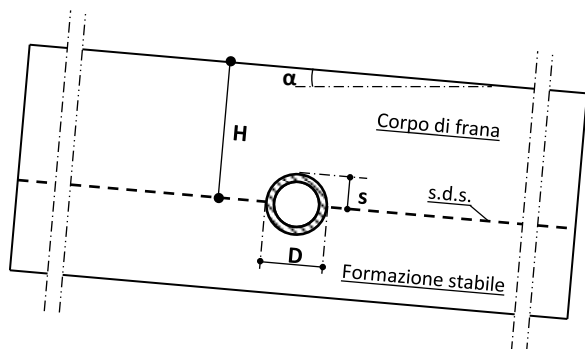


Figura 1. Schema di pendio indefinito con la galleria che interseca la superficie di scorrimento

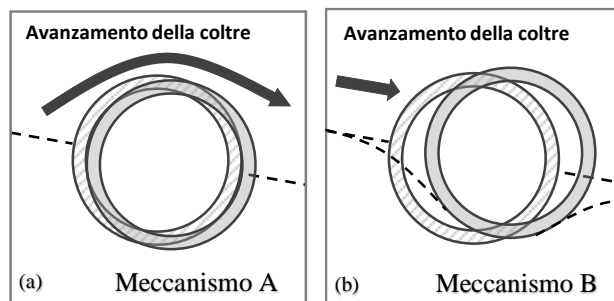


Figura 2. Schema dei meccanismi di interazione: rifluimento del terreno intorno alla galleria (a) e rivestimento scalzato (b)

	N	D	H	s	$\alpha$	$\gamma$	$\varphi'$	$c'$	$\delta$
[M]	1	0	0	0	0	1	0	1	0
[L]	0	1	1	1	0	-2	0	-1	0
[T]	-2	0	0	0	0	-2	0	-2	0

Tabella I. Matrice dimensionale per le variabili dell'insieme  $I^N$

	M	D	H	s	$\alpha$	$\gamma$	$\varphi'$	$c'$	$\delta$
[M]	1	0	0	0	0	1	0	1	0
[L]	1	1	1	1	0	-2	0	-1	0
[T]	-2	0	0	0	0	-2	0	-2	0

Tabella II. Matrice dimensionale per le variabili dell'insieme  $I^M$

Grandezza adimensionale	Descrizione
$H/D$	profondità della s.d.s. normalizzata
$s/D$	posizione della s.d.s. rispetto alla galleria
$\alpha$	inclinazione del pendio
$\varphi'_{frana}$	resistenza attritiva della frana
$c'_{frana}/(\gamma H)$	coesione della frana normalizzata
$\varphi'_{frana}/\varphi'_{terreno\ stabile}$	rapporto di resistenza attritiva
$c'_{frana}/c'_{terreno\ stabile}$	rapporto di resistenza coesiva
$\beta$	coefficiente riduttivo per l'interfaccia galleria-terreno
$N/(\gamma D^2)$	sfuerzo normale normalizzato
$M/(\gamma D^3)$	momento normalizzato

Tabella III. Grandezze adimensionali per il problema in esame

### 3. Validazione della formulazione adimensionale

Per il semplice schema proposto è stata condotta un'analisi limite con il codice di calcolo OptumG2 che permette di raggiungere le condizioni di collasso con due diverse procedure: aumentare la forza di gravità oppure introdurre un moltiplicatore per un set di carichi esterni precedentemente definiti. Di seguito sono richiamati brevemente le fasi di calcolo eseguite:

- 1) inizializzazione dello stato di sforzo mediante la procedura *gravity loading*;
- 2) scavo e realizzazione del rivestimento circolare della galleria;
- 3) attivazione della frana mediante l'applicazione di un carico uniformemente distribuito su una parete di lunghezza pari allo spessore della frana, posta a monte della galleria e ortogonale al piano del pendio.

La figura 3 mostra il reticolo di calcolo utilizzato in una delle analisi del problema. I nodi del contorno inferiore del modello hanno gli spostamenti impediti in tutte le direzioni, mentre i nodi dei contorni laterali hanno gli spostamenti impediti lungo la direzione del pendio e liberi lungo quella ortogonale ad essa. Per permettere il movimento del corpo di frana ed evitare problemi ai bordi, la superficie di scorrimento emerge in superficie in prossimità dei contorni laterali. Tuttavia, viste le significative dimensioni longitudinali del pendio, in un'ampia zona centrale in prossimità della galleria sono verificate le ipotesi del pendio indefinito.

Le figure 4a e 4b mostrano rispettivamente le quantità adimensionali associate alle sollecitazioni per due modelli in cui varia il diametro della galleria, ma rimangono costanti tutte le grandezze adimensionali. Il confronto dei risultati non mostra importanti differenze e gli scarti maggiori sono dell'ordine del 5-6%. Tali differenze sono imputabili a problemi numerici e quindi la formulazione adimensionale risulta valida.

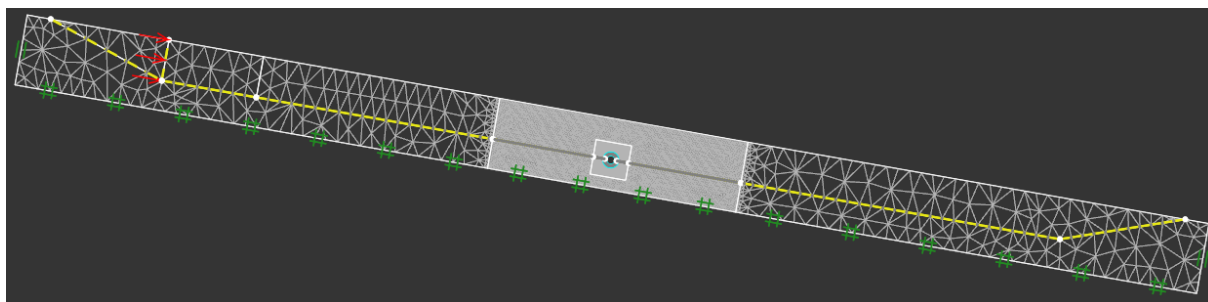


Figura 3. Reticolo impiegato per le analisi

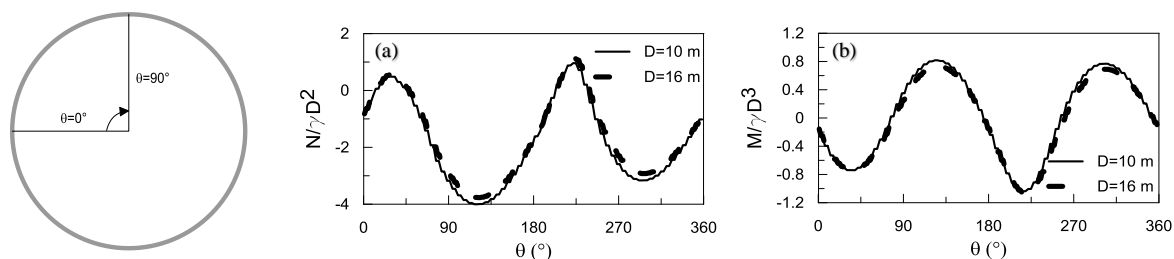


Figura 4. Diagrammi delle quantità adimensionali associate alle sollecitazioni: sforzo normale (a), momento flettente (b)

### 4. Alcuni risultati dello studio parametrico

Il programma delle analisi è stato definito in modo tale da esaminare l'influenza dei diversi parametri sulla risposta del sistema. Si è deciso di tenere costante l'inclinazione del piano campagna ( $\alpha=10^\circ$ ), mentre il campo di variazione delle altre grandezze adimensionali è riportato in tabella IV. Data la

numerosità dei parametri non sono state analizzate tutte le possibili combinazioni dei valori; l'influenza di alcune grandezze è stata studiata tenendo costanti le altre. Nelle analisi i parametri assunti costanti sono stati fissati a valori di riferimento, centrali del campo di variazione analizzato (valori sottolineati in tabella IV). Lo studio ha messo in evidenza che le grandezze legate alla profondità del piano di rottura  $[H/D]$ , alla posizione della galleria rispetto alla superficie di scorrimento  $[s/D]$  e alla resistenza del corpo di frana  $[\varphi'_{frana}, c'_{frana}/(\gamma H)]$ , influenzano significativamente le sollecitazioni massime sul rivestimento; viceversa i parametri della resistenza relativa tra il corpo di frana e la formazione stabile  $[\varphi'_{frana}/\varphi'_{terreno\ stabile}, c'_{frana}/c'_{terreno\ stabile}]$  e della resistenza all'interfaccia galleria-terreno  $[\beta]$ , risultano avere una modesta influenza.

Le sollecitazioni sul rivestimento (fig. 5a,b), come detto molto maggiori di quelle dovute ai carichi litostatici, presentano profili sostanzialmente simmetrici rispetto ad un asse inclinato, in verso orario, di circa  $125^\circ$  rispetto all'orizzontale. Lungo l'asse di simmetria sono presenti i maggiori valori dello sforzo normale che approssimativamente si annullano sull'asse ortogonale. Lungo l'asse di simmetria sono anche presenti i massimi valori dei momenti che tendono le fibre esterne, mentre sull'asse ortogonale si registrano i massimi valori dei momenti che tendono quelle interne. La posizione delle superficie di scorrimento rispetto alla galleria non sembra influenzare in modo significativo la forma dei profili di sollecitazione nel rivestimento.

Gli andamenti delle sollecitazioni massime in forma adimensionale in funzione dell'angolo di attrito della frana  $[\varphi'_{frana}]$ , sono riportati in figura 6; i risultati sono presentati per i differenti valori del parametro associato alla resistenza coesiva della frana  $[c'_{frana}/(\gamma H)]$  e per tre diverse posizioni  $[s/D]$  della galleria rispetto alla superficie di scorrimento. Come prevedibile, all'aumentare delle resistenze le sollecitazioni massime crescono in modo non lineare. A parità di  $[\varphi'_{frana}]$ , le caratteristiche di sollecitazione aumentano con il rapporto  $[c'_{frana}/(\gamma H)]$  in modo più accentuato, quando la superficie di scorrimento taglia nella parte inferiore il rivestimento della galleria ( $s/D=0.75$ ). È importante sottolineare inoltre, che a parità dei parametri legati alla resistenza, le sollecitazioni maggiori si hanno nel caso in cui la gallerie è maggiormente esposta al corpo di frana ( $s/D=0.75$ ).

Dunque non solo le sollecitazioni prodotte dal movimento di versante risultano significativamente maggiori di quelle dovute ai carichi litostatici, ma anche le zone maggiormente sollecitate ruotano e si collocano in posizioni non immediatamente correlabili alla geometria del pendio. Sono ancora oggetto di studio, possibili correlazioni tra le proprietà geometriche e meccaniche del sistema, i meccanismi plastici intorno alla galleria e le sollecitazioni sul rivestimento. Infine, nello studio è emerso che anche il parametro  $[H/D]$  influenza la risposta del sistema, aumentando significativamente le sollecitazioni sul rivestimento al crescere del valore della grandezza adimensionale.

## 5. Conclusione

Il presente lavoro si inquadra nell'ambito degli studi a carattere numerico, volti a determinare in modo semplificato, l'influenza dei fattori geometrici e meccanici che intervengono nei fenomeni di interazione frana-galleria. Il problema è stato posto in forma adimensionale, e alcuni risultati dello studio parametrico, condotto con l'analisi limite, consentono alcune prime considerazioni sui massimi valori delle sollecitazioni che il rivestimento dovrebbe sopportare.

H/D	s/D	$\varphi'_{frana}$	$c'_{frana}/(\gamma H)$	$\varphi'_{frana}/\varphi'_{terreno\ stabile}$	$c'_{frana}/c'_{terreno\ stabile}$	$\beta$
1.33	0.25	20	0.0014	0.823	<u>0.25</u>	0.1
<u>3.5</u>	0.50	24	0.03	0.875	0.50	0.25
7	0.75	28	0.057	<u>0.933</u>	0.75	<u>0.50</u>
10			0.114	1	1	0.75

Tabella IV. Valori delle grandezze adimensionali impiegate nelle analisi parametriche

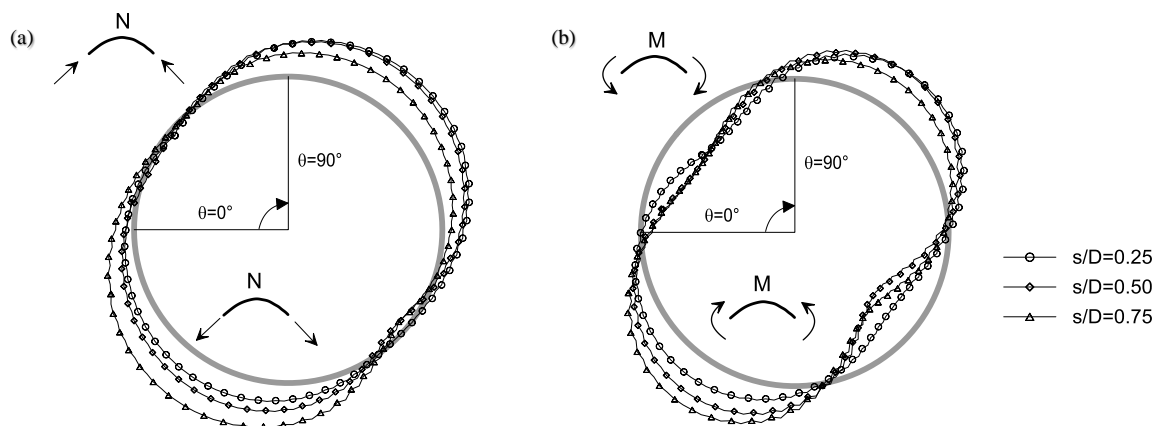


Figura 5. Profilo delle sollecitazioni sul rivestimento: sforzo normale (a), momento flettente (b)

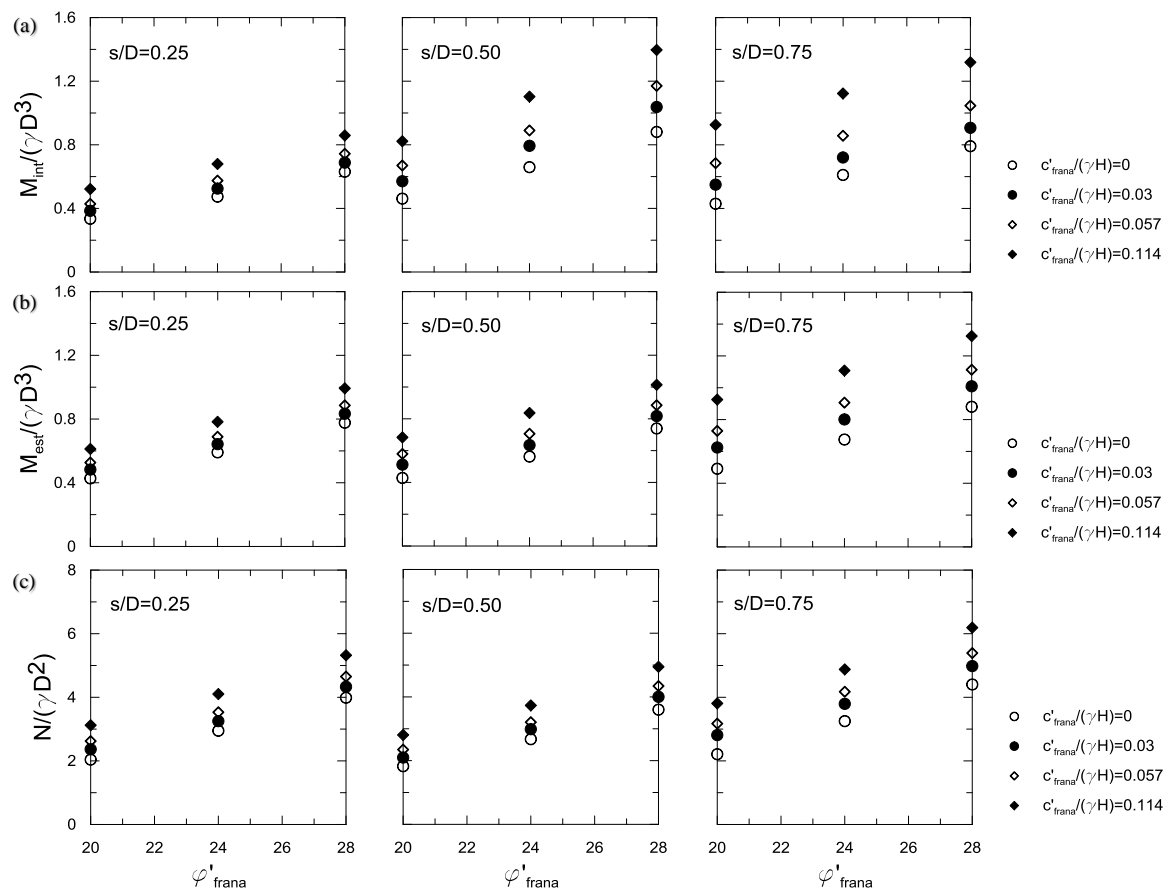


Figura 6. Massimi valori dei momenti interni (a), dei momenti esterni (b) e degli sforzi normali (c) in funzione di parametri geometrici e meccanici

### Bibliografia

- Boldini D., Graziani A., Ribacchi R. (2004). "Raticosa tunnel, Italy: characterization of tectonized clay-shale and analysis of monitoring data and face stability", *Soils and Foundations*, v.44, n.1, 57-69.
- Buckingham E. (1914). "On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations", *Physical Review* 4: 345-376.
- Chen W.F., Liu X.L. (1990). *Limit analysis in soil mechanics*. Elsevier, Amsterdam.
- OptumG2 (2014) v. 1.14. User's Manual.
- Scandale S., Fontanella E., Desideri A., (2014). *Misure di convergenza di una galleria realizzata in un versante in frana*. IARG 2014, Chieti.