

## **VALIDITÀ DEL METODO DELLE CURVE CARATTERISTICHE PER RIVESTIMENTI AD ARCO CIRCOLARE APERTI**

Paolo Perazzelli

*Astaldi S.p.A.*

*p.perazzelli@astaldi.com*

Alessandro Jacuzzi, Tatiana Rotonda

*DISG, Sapienza Università di Roma*

*tatiana.rotonda@uniroma1.it*

### **Sommario**

Nella pratica progettuale delle gallerie è ampiamente diffuso l'utilizzo di metodi di analisi numerica sforzi-deformazioni, ma risulta ancora elevata la richiesta di metodi di analisi speditivi da impiegare sia nella fase della progettazione preliminare, sia nella fase di verifica degli interventi adottati in corso d'opera. Il metodo delle curve caratteristiche, tra questi metodi, trova ancora oggi largo impiego nella verifica della progettazione di gallerie profonde, anche quando le ipotesi di galleria circolare, stato tensionale originario isotropo e rivestimento circolare chiuso non siano del tutto verificate. Viene di seguito illustrata una ricerca finalizzata allo studio dell'applicabilità del metodo delle curve caratteristiche per l'analisi di interazione tra ammasso e rivestimento ad arco circolare aperto. Dal confronto tra i risultati di analisi numeriche sforzi-deformazioni 2D e quelli provenienti dal metodo delle curve caratteristiche, ottenuti in diverse condizioni geometriche e geotecniche suggerite da un caso reale, viene proposto un criterio di applicabilità del metodo del tutto originale.

### **Introduzione**

Se i metodi dell'analisi numerica sforzi-deformazioni nel campo 3D sono più adatti a rappresentare il modello di comportamento di gallerie nella complessa zona del fronte, ad oggi non costituiscono ancora uno strumento progettuale, a causa sia della complessità del modello e della sua gestione, sia dei tempi di calcolo richiesti.

L'analisi sforzi-deformazioni nel campo 2D ed il metodo delle curve caratteristiche sono gli strumenti usuali per la verifica della progettazione di gallerie profonde. Sebbene il metodo delle curve caratteristiche si basi sulle ipotesi di galleria circolare, stato tensionale originario isotropo e rivestimento circolare chiuso, il suo impiego in fase del tutto preliminare è esteso anche ai casi, frequenti nella pratica, di gallerie di diversa forma, stato tensionale originario anisotropo e in presenza di rivestimenti ad arco aperto.

I limiti del metodo delle curve caratteristiche nel caso di galleria non circolare e stato tensionale originario anisotropo sono stati analizzati in letteratura (González-Nicieza et al. 2008, Antiga 2007) mediante il confronto con analisi numeriche sforzi-deformazioni in campo 2D.

Oggetto della presente ricerca è lo studio dell'applicabilità del metodo delle curve caratteristiche per l'analisi di interazione tra ammasso e rivestimento ad arco circolare aperto. Lo studio è basato sul confronto tra i valori del carico sul rivestimento forniti dal metodo delle curve caratteristiche e da analisi numeriche degli sforzi nel campo 2D, ottenuti nelle condizioni geometriche e geotecniche di un caso reale.

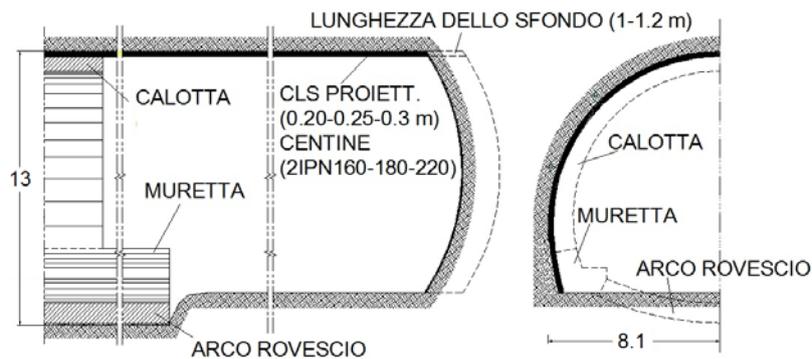


Figura 1. Metodo di scavo illustrato nelle sezioni longitudinale e trasversale della galleria

### Descrizione del caso reale e caratteristiche dei materiali

La presente ricerca prende spunto dall'esame di un caso reale: le gallerie affiancate di Base della Variante Autostradale di Valico (VAV, autostrada A1). L'opera interessa il settore a cavallo del crinale principale della catena dell'Appennino Settentrionale, composto prevalentemente da arenarie, delle formazioni di M. Cervarola e M. Modino, e da argilliti.

Le gallerie a doppio fornice hanno un'area di scavo di circa 180 m<sup>2</sup> e sono realizzate a piena sezione con il metodo tradizionale, mediante mezzi meccanici o esplosivo; le coperture variano nell'intervallo  $H = 100-400$  m.

La tecnica di scavo impiega un rivestimento di prima fase ad arco aperto, costituito da calcestruzzo proiettato e centine, la cui posa è realizzata a distanza ravvicinata dal fronte (Fig. 1). Il rivestimento definitivo in calcestruzzo è gettato in opera per fasi: la posa dell'arco rovescio e delle murette, realizzata ad una distanza dal fronte variabile tra 1.5 e 5 diametri di galleria, è seguita da quella della calotta, posta a distanze variabili tra 5 e 12 diametri. L'impiego di tale tecnica di scavo è sempre più frequente nell'ambito delle costruzioni in sotterraneo realizzate in Italia, anche in contesti molto diversi da quelli del caso in esame.

A partire dal caso reale, del quale sono state rispettate le coperture, le caratteristiche dell'ammasso roccioso e le caratteristiche del rivestimento di prima fase, sono state condotte due metodologie di analisi dell'interazione ammasso-rivestimenti di prima fase: l'analisi numerica sforzi-deformazioni ed il metodo delle curve caratteristiche.

Le analisi si riferiscono a due famiglie di casi, corrispondenti ai due litotipi: arenarie ed argilliti. In entrambi i casi l'ammasso è stato modellato con comportamento elastico, perfettamente plastico e criterio di resistenza di Mohr-Coulomb. I parametri coesione  $c'$  ed angolo di attrito  $\varphi'$  sono stati ricavati da un'opportuna linearizzazione del criterio di resistenza di Hoek-Brown dell'ammasso (Hoek et al. 2002). Per la conoscenza ridotta delle caratteristiche di resistenza alla scala del laboratorio, sono stati utilizzati valori di letteratura dei parametri  $m_i$  e  $\sigma_{ci}$  del materiale roccioso. In particolare il parametro  $m_i$  è stato assunto costante e pari a 3 e 13, rispettivamente, per l'argillite e per l'arenaria, mentre sono stati ipotizzati tre diversi valori del parametro  $\sigma_{ci}$  per ogni litotipo (Fig. 2). Invece sono stati assunti i valori di progetto del caso reale sia della costante di danno  $D$ , pari a 0.4, e sia dell'indice di qualità GSI, pari a 35 e 40, rispettivamente, per l'argillite e per l'arenaria. Il criterio non lineare di Hoek-Brown dell'ammasso comporta che al variare della profondità della galleria varia corrispondentemente la coppia di parametri  $c'$  e  $\varphi'$  (Fig. 2).

L'intervallo di variazione del modulo di Young  $E$  dell'ammasso è stato determinato in funzione dell'indice di qualità GSI, della costante di danno  $D$  e della resistenza a compressione uniaassiale del materiale roccioso  $\sigma_{ci}$ . I valori dei restanti parametri del modello di ammasso sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Parametri del modello di ammasso

Terreno		Arenarie	Argilliti
Peso dell'unità di volume asciutto	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	23	23
Modulo di Young	$E$ [MPa]	1100; 2100	500; 1100
Coefficiente di Poisson	$\nu$ [-]	0.3	0.3
Coesione	$c'$ [kPa]	400; 500; 600; 800; 900; 1200	150; 200; 250; 300; 350; 400
Angolo di attrito	$\varphi'$ [°]	40; 45; 50	18; 20; 24; 28; 32
Angolo di dilatanza	$\psi'$ [°]	0	0
<i>Stato tensionale iniziale</i>			
Copertura	$H$ [m]	80; 160; 240; 320; 400; 500	80; 160; 240; 320; 400; 500
Coefficiente di spinta	$k_0$ [-]	1	1
<i>Profilo di scavo</i>			
Raggio del profilo	$a$ [m]	6; 8	6; 8

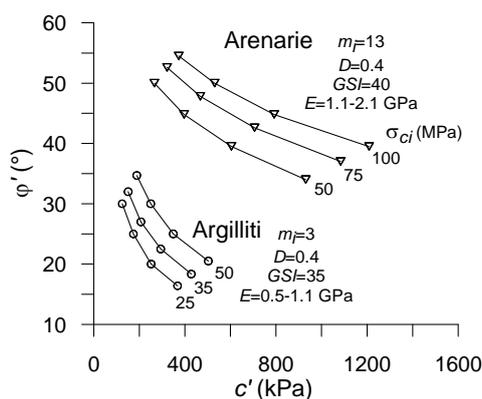


Figura 2. Campi di variazione dei parametri di resistenza dei due ammassi in argilliti ed arenarie

Nelle analisi numeriche sforzi-deformazioni il rivestimento di prima fase, assunto elastico, è rappresentato da elementi asta omogeneizzati, di rigidità assiale e flessionale pari alla somma delle rigidità del calcestruzzo proiettato e delle centine (Tab. 2). Nelle analisi con il metodo delle curve caratteristiche il rivestimento è rappresentato da un anello chiuso caratterizzato da sola rigidità assiale.

Tabella 2. Parametri del modello di rivestimento

		Centine n. 2 IPN220, passo 1 m	Cls proiettato spessore 0.3 m	Strutt. omogeneizzata
Modulo di Young	$E$ [GPa]	206	16	20.92
Area	$A$ [m <sup>2</sup> ]	3.95E-03	0.3	0.3
Momento di inerzia	$J$ [m <sup>2</sup> ]	3.06E-05	2.25E-03	2.28E-03

## Analisi di interazione ammasso-rivestimento di prima fase

### Analisi sforzi-deformazioni 2D

Le analisi degli sforzi sono state condotte in condizioni di deformazione piana con il codice di calcolo alle differenze finite FLAC<sup>2D</sup> (Itasca 2006). Data la elevata copertura è stata modellata una porzione limitata di ammasso, le cui condizioni al contorno sono riportate nella Figura 3. Lo stato di sforzo iniziale è stato assunto uniforme ed isotropo e non è stata considerata la gravità. Il profilo di scavo è stato schematizzato da un arco circolare di raggio  $a$ , intersecato da una superficie di calpestio piana (Fig. 3a). L'avanzamento del fronte è stato simulato mediante la riduzione graduale delle forze al contorno di scavo, ottenuta moltiplicando le

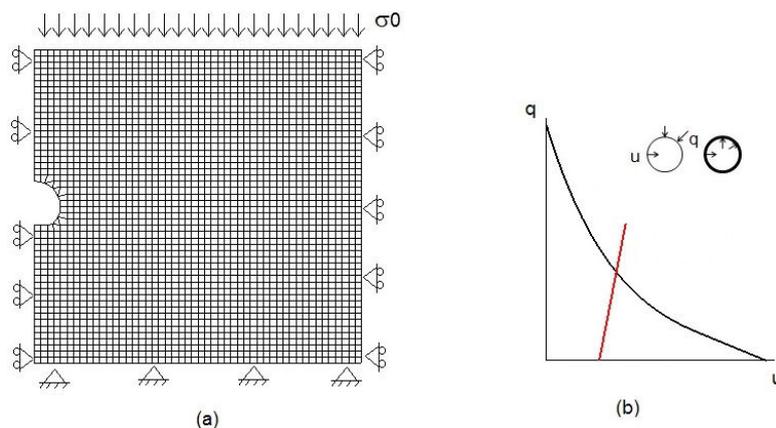


Figura 3. (a) Griglia di calcolo e condizioni al contorno dell'analisi numerica sforzi-deformazioni. (b) Metodo delle curve caratteristiche nel piano della pressione uniforme all'estradosso vs convergenza

componenti orizzontale e verticale per uno stesso fattore di rilascio.

La preconvergenza, che precede la posa del rivestimento, è stata stimata con il modello di Vlachopoulos & Diederichs (2009), fissando in tutti i casi la distanza di posa pari ad 1 m.

Per valutare l'influenza del raggio della galleria sono state condotte analisi con due diversi raggi  $a$  pari ad 8 e 6 m.

### Metodo delle curve caratteristiche

Le curve caratteristiche della galleria e del rivestimento derivano dalle soluzioni analitiche di galleria circolare in un mezzo elasto-plastico (Ribacchi e Riccioni 1977). La galleria circolare di raggio  $a$  è caratterizzata da un'area di scavo di poco maggiore rispetto alla geometria utilizzata nelle analisi numeriche sforzi-deformazioni.

Il rivestimento è modellato da un anello chiuso, confrontabile quindi solo in termini di rigidità assiale con il modello di rivestimento utilizzato nelle analisi sforzi-deformazioni.

Con l'obiettivo di poter eseguire un confronto tra i due approcci, sono state condotte diverse analisi assumendo le stesse caratteristiche meccaniche dell'ammasso e dei rivestimenti, nonché gli stessi valori della preconvergenza, adottati nelle analisi numeriche.

### Confronto tra i due metodi

L'obiettivo del confronto è di valutare l'applicabilità del metodo delle curve caratteristiche nella valutazione delle condizioni di carico di rivestimenti ad arco aperto.

A titolo di esempio, e con riferimento ad una coppia di parametri di resistenza delle argilliti (Tab. 1), sono posti a confronto nella Figura 4 la sollecitazione di sforzo normale  $N$  in corona secondo i due approcci, al variare della copertura  $H$  e per due valori del raggio della galleria  $a$  e del modulo di Young  $E$  dell'ammasso. Si osserva che l'incremento della copertura comporta un aumento sia, come atteso, della sollecitazione  $N$ , sia della divergenza tra i valori forniti dai due metodi. È stato pertanto individuato un valore limite della copertura  $H_{lim}$ , al di sotto del quale i due metodi forniscono sollecitazioni  $N$  da ritenersi indifferenziate, corrispondente ad un valore di soglia  $\Delta N / \bar{N} = 15\%$ , dove  $\Delta N$  ed  $\bar{N}$  sono, rispettivamente, la differenza ed il valore medio della sollecitazione  $N$  in corona determinata con i due metodi.

La sollecitazione del rivestimento ad arco aperto presenta una componente sia assiale  $N$  sia flessionale  $M$ , variabili lungo il rivestimento. Nel caso di copertura  $H < H_{lim}$  si osserva che la

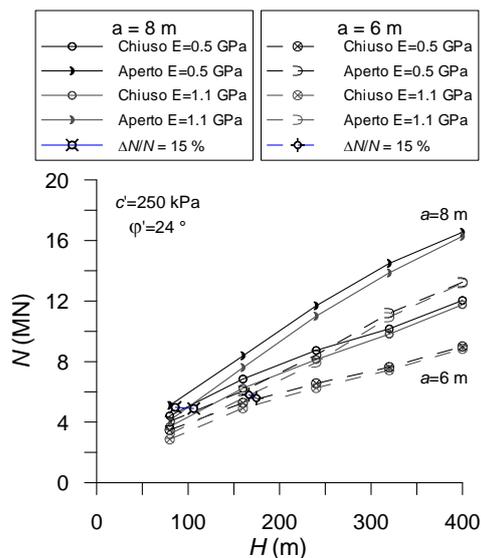


Figura 4. Sollecitazione di sforzo normale  $N$  in corona in funzione della copertura  $H$  (argilliti).  $E'$  segnalato da un simbolo il valore  $H_{lim}$  corrispondente alla soglia  $\Delta N / \bar{N} = 15\%$

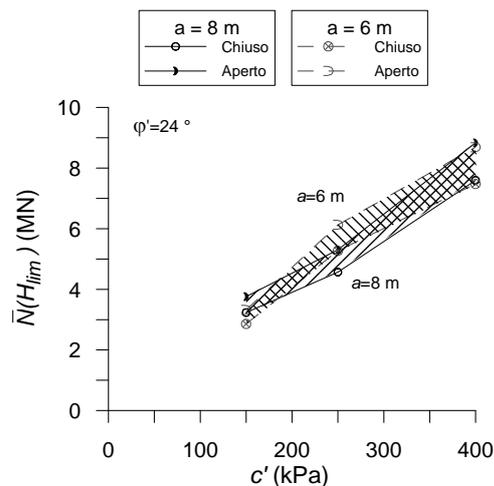


Figura 5. Sollecitazione di sforzo normale di soglia  $\bar{N}(H_{lim})$  al variare della coesione (argilliti). La forza  $\bar{N}$  è media tra i due tipi di rivestimento e per i due valori del modulo di Young indagati.

sollecitazione più gravosa è in corona, dove il contributo del momento flettente è trascurabile. Si può ritenere che in questo caso il metodo delle curve caratteristiche fornisce approssimazioni accettabili della sollecitazione assiale  $N$  in corona.

Le analisi indicano che la soglia  $H_{lim}$  cresce con l'incremento del modulo di Young dell'ammasso  $E$  e per valori tanto più bassi del raggio  $a$  della galleria (Fig. 4); il corrispondente valore medio di sollecitazione normale  $\bar{N}(H_{lim})$  tra i due tipi di rivestimento risulta invece poco affetto da tali parametri. Tale osservazione risulta ancora valida al variare delle caratteristiche di resistenza dell'ammasso, come si osserva nella Figura 5, nella quale la sollecitazione  $\bar{N}(H_{lim})$ , media tra i due tipi di rivestimento e per i due valori del modulo di Young indagati (Tab. 1), risulta poco affetta dal raggio della galleria.

## Conclusioni

La ricerca ha evidenziato che il metodo delle curve caratteristiche applicato all'analisi delle gallerie profonde in ammassi rocciosi costituisce uno strumento di progettazione preliminare idoneo alla determinazione delle condizioni di carico di rivestimenti di prima fase ad arco circolare aperto. E' stato delineato che in tale ipotesi il metodo delle curve caratteristiche può risultare ancora valido se sussiste la condizione, in termini di profondità della galleria

$$H \leq H_{lim}(c', \varphi', E, a) \quad (1)$$

nella quale la profondità  $H_{lim}$  dipende dalle caratteristiche di resistenza e deformabilità del mezzo sottoposto allo scavo ed anche dal raggio della galleria.

La modesta influenza della deformabilità dell'ammasso e del raggio della galleria permettono di associare un valore medio della sollecitazione assiale alla condizione di copertura limite  $\bar{N}(H_{lim})$ . Il criterio di applicabilità del metodo delle curve caratteristiche, in termini di sollecitazione assiale nel rivestimento  $N_{CC}$ , è pertanto il seguente

$$N_{CC} \leq N_{lim}(c', \varphi') = \bar{N}(H_{lim}) \quad (2)$$

Le analisi parametriche condotte, per le argilliti e le arenarie e per diverse coppie dei

parametri di resistenza tipici ( $c'$ ,  $\varphi'$ ) (Tab. 1), hanno permesso di individuare i valori della sollecitazione assiale limite  $N_{lim}$  corrispondenti ai valori  $\bar{N}(H_{lim})$ , determinati sotto diverse ipotesi di deformabilità dell'ammasso e raggio della galleria (Figg. 6 e 7). E' da osservare che per le argilliti è stata adottata una soglia  $\Delta N / \bar{N} = 15\%$ , mentre nel caso delle arenarie è stata adottata una condizione più restrittiva  $\Delta N / \bar{N} = 10\%$ .

Nel caso di gallerie profonde in ammassi aventi caratteristiche meccaniche confrontabili con quelle del caso in esame la sollecitazione di un rivestimento di prima fase ad arco aperto può essere valutata preliminarmente con il metodo delle curve caratteristiche, verificando successivamente il grado di approssimazione del risultato confrontando la sollecitazione ottenuta  $N_{CC}$  con il valore limite  $N_{lim}$  (rel. (2)). Il valore limite  $N_{lim}$  può essere derivato dagli abachi delle Figure 6 e 7. Qualora non risulti verificata la condizione espressa dalla rel. (2), la sollecitazione di sforzo normale  $N_{CC}$  è da considerare approssimata e pertanto appare consigliabile il ricorso a metodi di analisi più rigorosi.

Gli abachi delle Figure 6 e 7 includono campi di variazione limitati delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso, ma si intende estenderli in una fase successiva della ricerca.

La variazione delle caratteristiche del rivestimento utilizzate nelle analisi non sono state indagate. Le analisi preliminari condotte e la ridotta influenza del raggio della galleria fanno ritenere che il criterio di applicabilità qui descritto non sia influenzato dalla rigidità dei rivestimenti, almeno nel campo di variazione tipico adottato nella pratica progettuale.

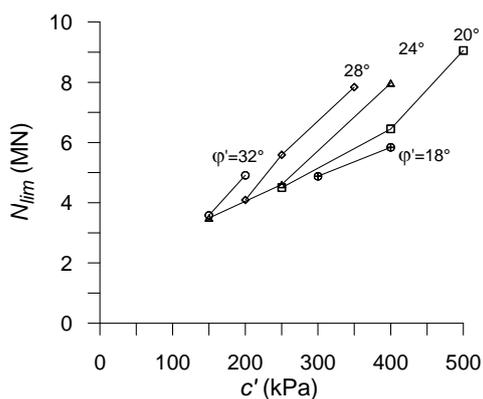


Figura 6. Sollecitazione di sforzo normale limite  $N_{lim}$  nel campo di variazione tipico delle argilliti. La soglia prefissata è  $\Delta N / \bar{N} = 15\%$

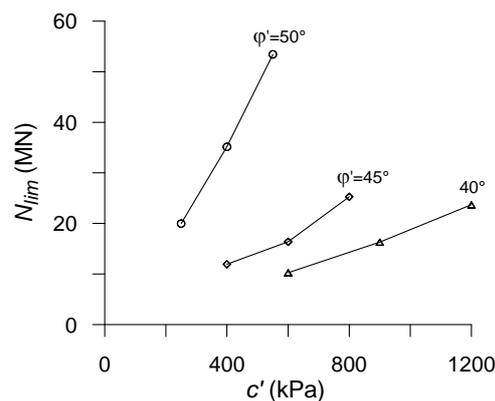


Figura 7. Sollecitazione di sforzo normale limite  $N_{lim}$  nel campo di variazione tipico delle arenarie. La soglia prefissata è  $\Delta N / \bar{N} = 10\%$

## Bibliografia

- Antiga, A. Chiorboli, M. and Coppola, P. (2007). Convergence-confinement method limit of application of the closed form solutions compared with numerical models. Computational Methods in Tunnelling (EURO: TUN 2007). Vienna, Austria, August 27-29
- González-Nicieza, C., Alvarez-Vigil A.E., Menéndez-Díaz, A. and González-Palacio C. (2008). Influence of the depth and shape of a tunnel in the application of the convergence-confinement method. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(1): 25-37.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 1: 267-273.
- Itasca (2006). Flac<sup>2D</sup>, Version 6, User's Manual, Minneapolis.
- Ribacchi, R. and Riccioni, R. (1977). Stato di sforzo e di deformazione intorno ad una galleria circolare. Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, 4: 7-18
- Vlachopoulos, N. and Diederichs, M.S. (2009). Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering, 42: 131-146.