

Estratto dagli atti del 17° Congresso C.T.E.  
Roma, 5-6-7-8 novembre 2008

## **STUDIO TRIDIMENSIONALE DEL RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE IN SPRITZ-BETON DI GALLERIE PROFONDE**

*PATRIZIA BERNARDI, ROBERTO CERIONI, ELENA MICHELINI, MARIA MIGLIAZZA*  
*Università di Parma*

### **SUMMARY**

*In this work the behaviour of shotcrete preliminary linings for tunnel construction has been analysed. This problem is quite complicated, due to the complexity of tunnel modelling and material nonlinearity. Few constitutive models able to describe the actual mechanical behaviour of the lining are available in technical literature. In most cases, material nonlinearity and the stress and strain distribution along the thickness of shotcrete lining are ignored and the design of lining thickness and reinforcement is frequently based on semi-empirical methods.*

*In order to investigate the influence of reinforcement type on shotcrete behaviour, a series of NLFE analyses simulating the conventional procedure of tunnel excavation and lining have been carried out. The attention has been mainly focused on deep tunnels excavated in rock, considering different opening geometries and initial stress distributions. The local behaviour of shotcrete has been modelled through the PARC constitutive model, which is able to describe the behaviour up to failure both of ordinary and fibre reinforced concrete structures.*

### **1. INTRODUZIONE**

Lo studio del comportamento meccanico, durante le fasi di scavo, dei rivestimenti di prima fase realizzati con calcestruzzo proiettato è un problema particolarmente complesso, a causa sia delle difficoltà legate alla modellazione stessa dello scavo, che al comportamento non lineare del materiale utilizzato [1, 2, 3].

La progettazione del rivestimento viene quindi frequentemente condotta ricorrendo a metodi di natura per lo più semi-empirica, trascurando la non linearità del materiale e l'effettiva distribuzione delle tensioni e delle deformazioni lungo lo spessore dell'anello di calcestruzzo. Queste metodologie semplificate, tuttavia, forniscono dei risultati poco accurati e, di conseguenza, non consentono di ottimizzare gli spessori e i quantitativi di armatura necessari per la realizzazione dei rivestimenti stessi.

Per tale ragione, nel presente lavoro si è cercato di fornire una rappresentazione più realistica dell'effettivo comportamento del rivestimento di prima fase in calcestruzzo proiettato, tenendo conto della non linearità meccanica del materiale e della differente tipologia di rinforzo adottata – rete metallica o fibre di acciaio. A tale scopo sono state effettuate numerose simulazioni tridimensionali agli elementi finiti, utilizzando il legame costitutivo PARC [4, 5, 6], in grado di descrivere il comportamento meccanico non lineare sia in fase non fessurata che in quella fessurata, in presenza di rinforzo con barre ordinarie e/o con fibre. Le analisi numeriche hanno inoltre consentito di considerare il progressivo aumento di resistenza del calcestruzzo proiettato nel corso delle varie fasi di scavo, mediante un'opportuna variazione delle sue proprietà meccaniche nel tempo. In tal modo è stato possibile effettuare una valutazione più realistica dello stato tenso-deformativo presente nel materiale ed una migliore simulazione dell'interazione tra terreno e struttura; tale conoscenza risulta particolarmente importante non solo per la progettazione del rivestimento di prima fase ma anche per il dimensionamento del successivo rivestimento finale.

### **2. MODELLAZIONE DEL PROBLEMA MEDIANTE ANALISI NON LINEARE AGLI ELEMENTI FINITI**

#### **2.1. DEFINIZIONE DEI CASI DI STUDIO ESAMINATI**

Lo studio del comportamento dei rivestimenti di prima fase in calcestruzzo proiettato è stato

affrontato mediante analisi non lineari tridimensionali agli elementi finiti. Si è fatto riferimento ad una situazione teorica di galleria profonda, scavata in un ammasso roccioso di qualità medio-bassa, in cui si sono mantenuti costanti sia la profondità del cavo, pari a circa 5D (ovvero 60.5 m, essendo  $D \approx 11.6$  m il diametro della galleria), che le caratteristiche meccaniche della roccia (Tabella 1). Il comportamento dell'ammasso roccioso è stato descritto tramite un modello costitutivo elastoplastico ideale, considerando il criterio di rottura di Mohr-Coulomb con dilatanza nulla. I parametri che sono stati fatti variare sono invece la geometria del cavo, passando dal caso di galleria circolare a quello a "ferro di cavallo" (Figura 1), e la distribuzione iniziale degli sforzi nell'ammasso, considerando sia il caso di stato tensionale iniziale isotropo ( $k_0 = 1$ ) che anisotropo ( $k_0 = 0.5$ ).

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	?	$f$ (°)	$\phi$ (°)	c (MPa)
25	1500	0.25	40	0	0.2

**Tabella 1.** Caratteristiche dell'ammasso roccioso.

Il rivestimento temporaneo è costituito da uno strato di calcestruzzo proiettato di spessore 20 cm, installato al fronte in calotta e ai piedritti, e da un arco rovescio in conglomerato non armato, assunto di classe C30/37 e spessore 80 cm, installato ad una distanza dal fronte variabile, compresa tra 8 e 10 m.

Le proprietà meccaniche del calcestruzzo proiettato, riportate in Tabella 2, sono state continuamente aggiornate nel corso delle analisi numeriche per tenere conto del progressivo indurimento del materiale all'avanzare dello scavo. I valori di tali proprietà sono stati ricavati a 28 giorni sulla base di prove sperimentali su campioni di conglomerato; la loro variazione in funzione del tempo è stata invece calcolata utilizzando le formule contenute nell'EC2 [7].

t (giorni)	$f_c$ (MPa)	$f_{c,cube}$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$\nu$
1	14.85	17.89	1.34	27484	0.25
3	23.22	27.98	2.09	31430	0.25
7	28.68	34.55	2.58	33484	0.25
14	32.24	38.84	2.90	34682	0.25
28	35.03	42.20	3.15	35555	0.25

**Tabella 2.** Proprietà meccaniche assunte per il calcestruzzo proiettato in funzione del tempo.

Per quanto concerne l'armatura del rivestimento in calcestruzzo proiettato, sono state considerate due diverse soluzioni tecniche, rappresentate dall'impiego di rete elettrosaldata e di fibre in acciaio, facendo riferimento a quantitativi "tipici", reperibili in letteratura tecnica [8, 9, 10, 11] e comunemente utilizzati nella pratica progettuale.

Nelle analisi numeriche sono stati quindi considerati separatamente sia il caso di calcestruzzo proiettato armato con rete elettrosaldata di diametro  $f_6$  e passo 150 mm, che il caso di calcestruzzo proiettato rinforzato con fibre di acciaio di lunghezza  $L_f = 37$  mm, diametro  $f_f = 0.55$  mm (rapporto d'aspetto  $L_f/f_f = 67$ ) e percentuale in volume  $V_f = 0.51\%$ .

## 2.2. DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Per condurre le analisi numeriche sono state realizzate due discretizzazioni ad elementi finiti della porzione di ammasso ritenuta significativa, una per il caso di galleria circolare e una per il caso di galleria a ferro di cavallo, le cui caratteristiche sono riportate nelle Figure 1-a e 1-b, rispettivamente.

Data la simmetria di carico e di vincolo presente nel problema, è stata analizzata solo metà della sezione trasversale del cavo, mentre in direzione longitudinale è stata considerata una porzione di ammasso roccioso di lunghezza 70 m. Le dimensioni della porzione di ammasso roccioso esaminate sono state scelte in modo tale da evitare effetti di bordo, verificando che il disturbo tenso-deformativo indotto dallo scavo non raggiunga i confini del modello.

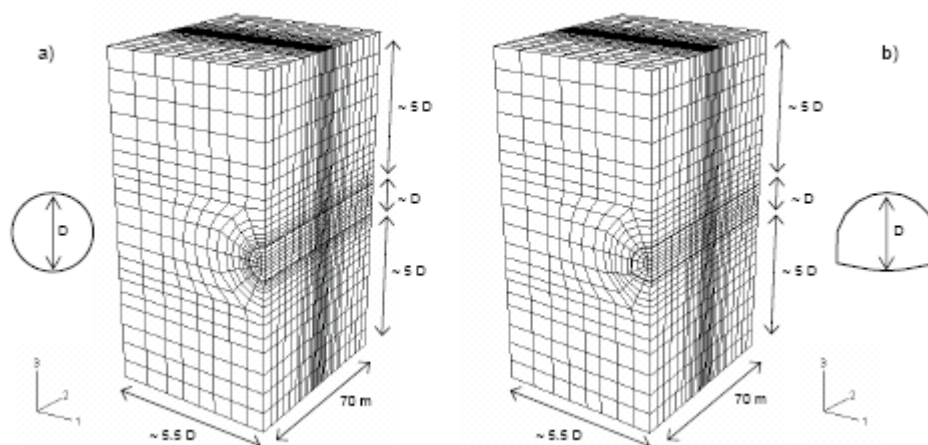
Come già sottolineato in precedenza, per ciascuna geometria sono state analizzate due distribuzioni iniziali di tensione, rispettivamente isotropa ( $k_0 = 1$ ) e anisotropa ( $k_0 = 0.5$ ). Per maggior chiarezza espositiva, un prospetto riassuntivo della analisi numeriche condotte è presentato in Tabella 3. Tutte le analisi sono state realizzate utilizzando il codice di calcolo ABAQUS.

L'ammasso roccioso è stato modellato mediante elementi brick lineari a 8 nodi, utilizzando una

legge costitutiva elastoplastica basata sul criterio di rottura di Mohr-Coulomb, disponibile nella libreria del programma. Il rivestimento in calcestruzzo proiettato e l'arco rovescio sono stati invece modellati utilizzando elementi shell composti a 4 nodi, adottando un'integrazione di Gauss ridotta nel piano dell'elemento e un'integrazione di Simpson nello spessore, in modo da poter valutare i risultati numerici in corrispondenza dell'intradosso (lato cavo) e dell'estradosso (lato ammasso) del rivestimento.

Il comportamento meccanico del rivestimento di prima fase in calcestruzzo proiettato è stato descritto implementando il modello PARC (per elementi in conglomerato rinforzati con armatura ordinaria o con fibre) nel codice di calcolo; l'arco rovescio, meno sollecitato, è stato invece modellato ipotizzando un comportamento elasticolineare, in modo da limitare gli oneri computazionali e i tempi di calcolo.

Nel corso delle analisi numeriche sono state simulate le varie fasi di scavo della galleria, dalla sezione iniziale del modello fino alla sezione di mezzeria.



**Figura 1.** Modello tridimensionale agli elementi finiti: geometria e mesh nel caso di a) galleria circolare e b) galleria a ferro di cavallo.

All'inizio della simulazione sono stati disattivati gli elementi del rivestimento e dell'arco rovescio e si è proceduto all'applicazione del carico litostatico all'ammasso roccioso.

L'avanzamento dello scavo e la posa in opera dei sostegni sono stati modellati nei passi di carico successivi, eliminando progressivamente gli elementi di roccia e attivando al contempo gli elementi del rivestimento. Come già osservato, mentre gli elementi che rappresentano il calcestruzzo proiettato in calotta e ai piedritti vengono attivati in corrispondenza del fronte, gli elementi che simulano l'arco rovescio vengono attivati ad una distanza dal fronte variabile tra 8 e 10 m.

Geometria del cavo	Stato tensionale iniziale ( $k_0$ )	Armatura
Circolare	$k_0 = 1$	Rete f6/150" Fibre, $V_f = 0.51$ , $L_f/f_f = 67$
	$k_0 = 0.5$	Rete f6/150" Fibre, $V_f = 0.51$ , $L_f/f_f = 67$
Ferro di cavallo	$k_0 = 1$	Rete f6/150" Fibre, $V_f = 0.51$ , $L_f/f_f = 67$
	$k_0 = 0.5$	Rete f6/150" Fibre, $V_f = 0.51$ , $L_f/f_f = 67$

**Tabella 3.** Prospetto riassuntivo delle analisi numeriche condotte.

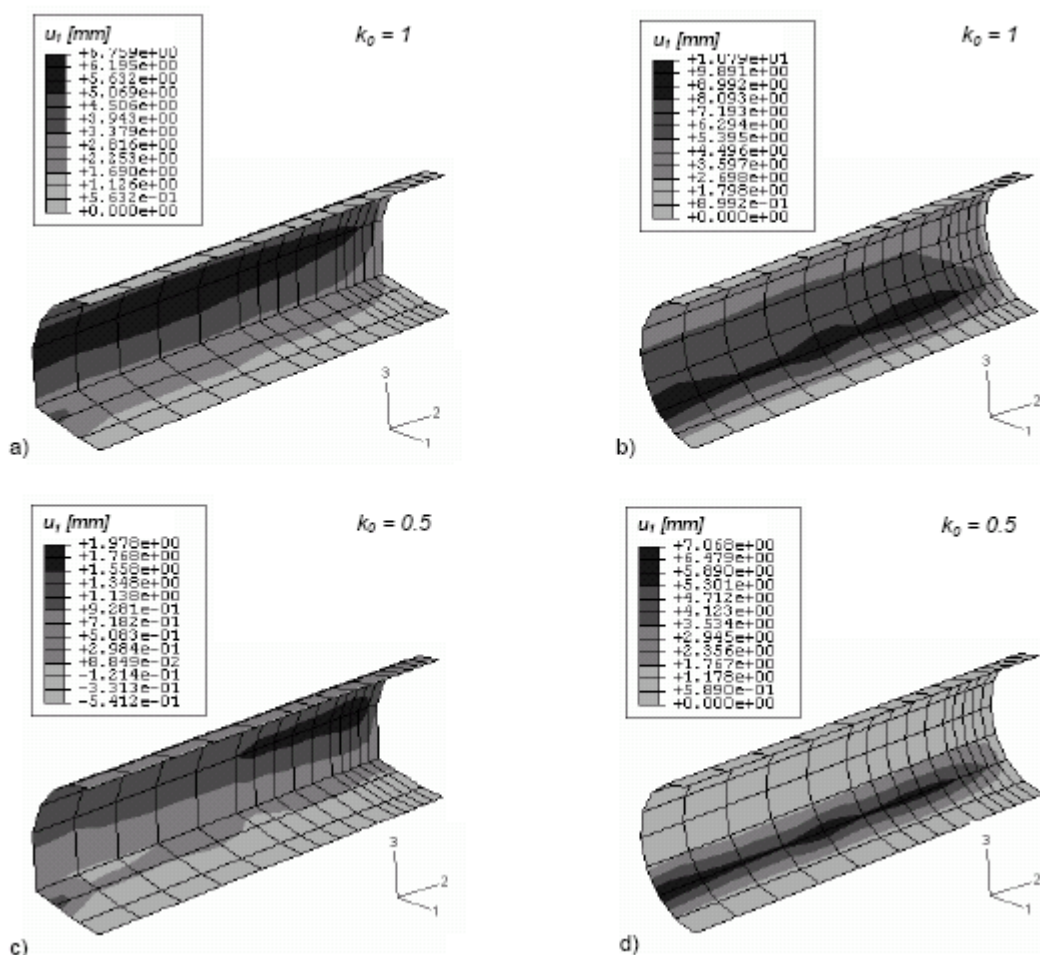
L'implementazione del modello costitutivo all'interno del codice ABAQUS ha consentito l'aggiornamento delle proprietà meccaniche del calcestruzzo (a partire dai valori ad 1 giorno, riportati in Tabella 2) in funzione del progressivo avanzamento dello scavo e della conseguente

maturazione del materiale. Date le caratteristiche medio-basse dell'ammasso roccioso, è stata ipotizzata una velocità di scavo di 2m/giorno.

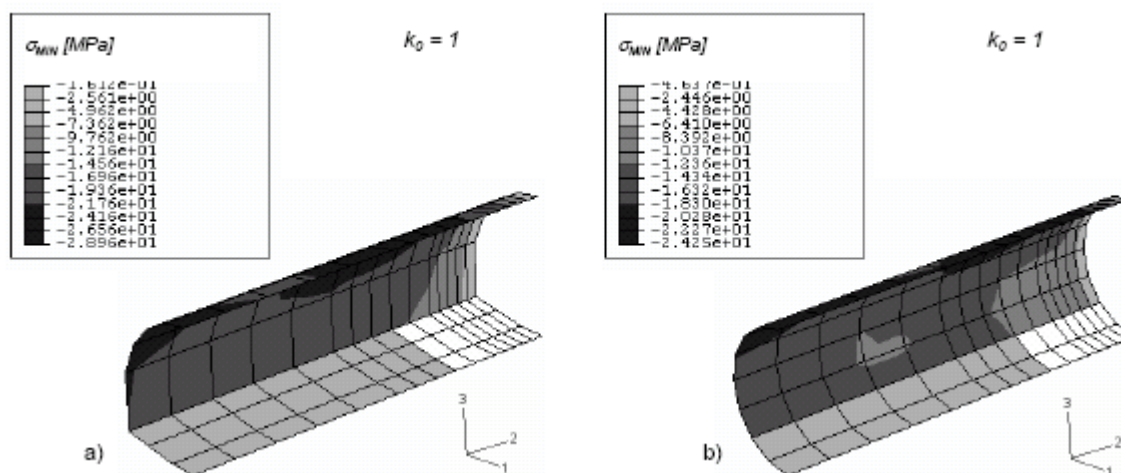
### 3. DISCUSSIONE DEI PRINCIPALI RISULTATI NUMERICI

Le analisi numeriche, simulando l'interazione tra il rivestimento di prima fase e l'ammasso roccioso circostante, permettono la valutazione delle principali quantità che governano il comportamento del rivestimento stesso, sia a livello globale, in termini di tensioni e spostamenti, che a livello locale, in termini di quadro fessurativo e tensioni nei materiali costituenti.

Il campo di spostamenti risulta principalmente influenzato dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso circostante, dallo stato tensionale preesistente in sito (e quindi dal valore assunto per  $k_0$ ) e dalla forma del cavo, mentre sembra essere pressoché indipendente dal tipo di armatura utilizzata per il rivestimento in calcestruzzo proiettato (rete o fibre metalliche). Questo aspetto viene messo in evidenza dai contours riportati in Figura 2, relativi all'intradosso della porzione di rivestimento compresa tra la sezione di estremità del modello e quella centrale (corrispondente alle fasi di scavo effettivamente considerate nell'analisi), i quali mostrano la variazione degli spostamenti orizzontali.



**Figura 2.** Distribuzione degli spostamenti orizzontali nel rivestimento in calcestruzzo proiettato armato con rete elettrosaldata (intradosso): a) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 1$ ; b) geometria circolare,  $k_0 = 1$ ; c) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 0.5$ ; d) geometria circolare,  $k_0 = 0.5$ .



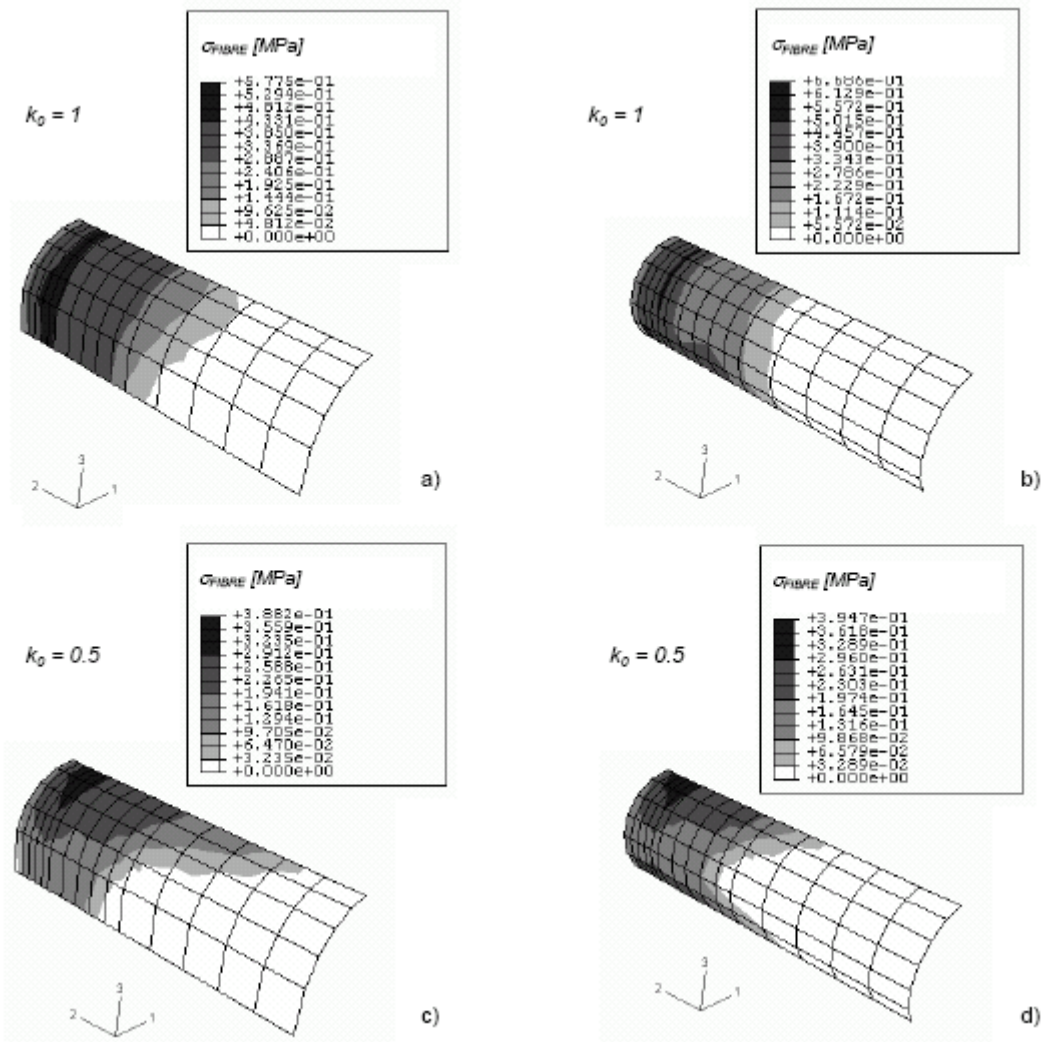
**Figura 3.** Distribuzione delle tensioni principali minime all'intradosso del rivestimento in calcestruzzo proiettato armato con rete elettrosaldata ( $k_0 = 1$ ): a) geometria a ferro di cavallo; b) geometria circolare.

Come si può notare, la differente forma del cavo influenza principalmente la distribuzione del campo di spostamenti, con il raggiungimento di valori massimi rispettivamente alla base dei piedritti, nella zona di attacco con l'arco rovescio (galleria circolare, Figure 2-b e 2-d) o alla loro sommità (galleria a ferro di cavallo, Figure 2-a e 2-c). Lo stato tensionale iniziale influenza invece maggiormente l'entità degli spostamenti stessi, che risultano ovviamente maggiori nel caso di  $k_0 = 1$ .

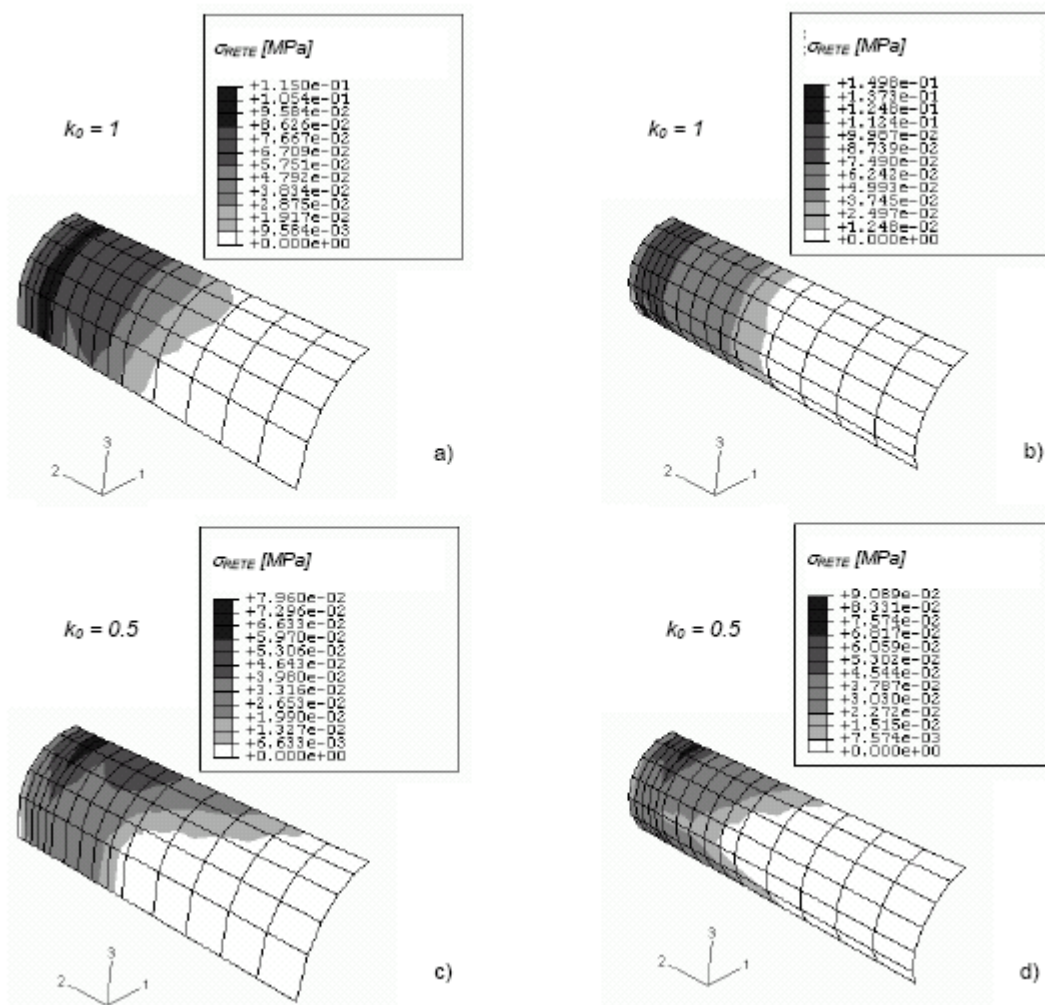
La distribuzione degli spostamenti verticali appare invece più omogenea nei diversi casi esaminati, evidenziando un fenomeno di chiusura del cavo maggiormente accentuato in corrispondenza dell'arco rovescio rispetto alla calotta, anche in ragione delle diverse tempistiche di attivazione dei sostegni.

In maniera del tutto analoga, anche la distribuzione delle tensioni di compressione e di trazione presenti nel rivestimento appare scarsamente influenzata dalla tipologia di rinforzo adottata, risentendo invece maggiormente della geometria e del valore assunto per  $k_0$ .

In tutti i casi esaminati, lo stato sollecitativo presente nell'arco rovescio appare relativamente contenuto rispetto a quello presente nel rivestimento di prima fase in calcestruzzo proiettato, per effetto della loro diversa distanza di installazione dal fronte di scavo.



**Figura 4.** Distribuzione delle tensioni assorbite dalle fibre del rivestimento in corrispondenza delle fessure (intradosso) in direzione longitudinale: a) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 1$ ; b) geometria circolare,  $k_0 = 1$ ; c) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 0.5$ ; d) geometria circolare,  $k_0 = 0.5$ .



**Figura 5.** Distribuzione delle tensioni assorbite dalla rete elettrosaldata in corrispondenza delle fessure (intradosso) in direzione longitudinale: a) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 1$ ; b) geometria circolare,  $k_0 = 1$ ; c) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 0.5$ ; d) geometria circolare,  $k_0 = 0.5$ .

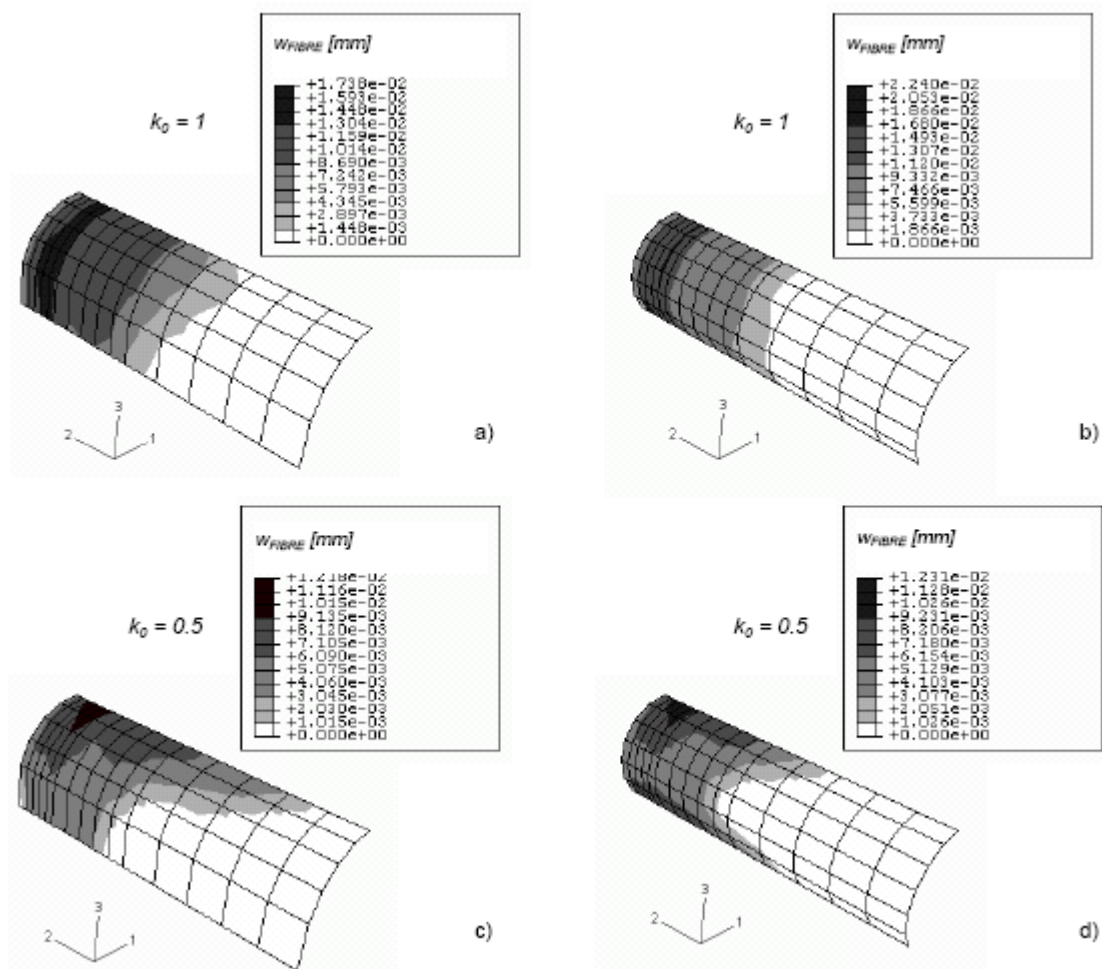
In Figura 3 viene riportato l'andamento delle tensioni principali minime nel caso più gravoso, corrispondente a  $k_0 = 1$ ; come si può notare, la forma del cavo esercita una modesta influenza sulla distribuzione degli sforzi nel rivestimento, ma ne condiziona in modo non trascurabile l'entità.

L'analisi del quadro fessurativo e della distribuzione degli sforzi di trazione nella matrice di conglomerato in corrispondenza delle fessure stesse non può invece prescindere dalla particolare tipologia di rinforzo adottato. Le Figure 4 e 5 mostrano infatti le diverse aliquote di tensione assorbite dalle fibre e dalla rete elettrosaldata, determinate mediante il legame costitutivo PARC. Nel caso delle fibre, i principali parametri del modello di Li, Stang e Krenchel adottato nelle analisi ad elementi finiti (maggiori dettagli possono essere trovati in [12]) sono stati opportunamente calibrati modellando prove sperimentali di flessione su travette fibrorinforzate intagliate. A parità di condizioni (stessa geometria e stesso  $k_0$ ), le fibre limitano l'apertura delle fessure e, di conseguenza, sono in grado di assorbire tensioni di trazione più elevate in corrispondenza delle fessure stesse.

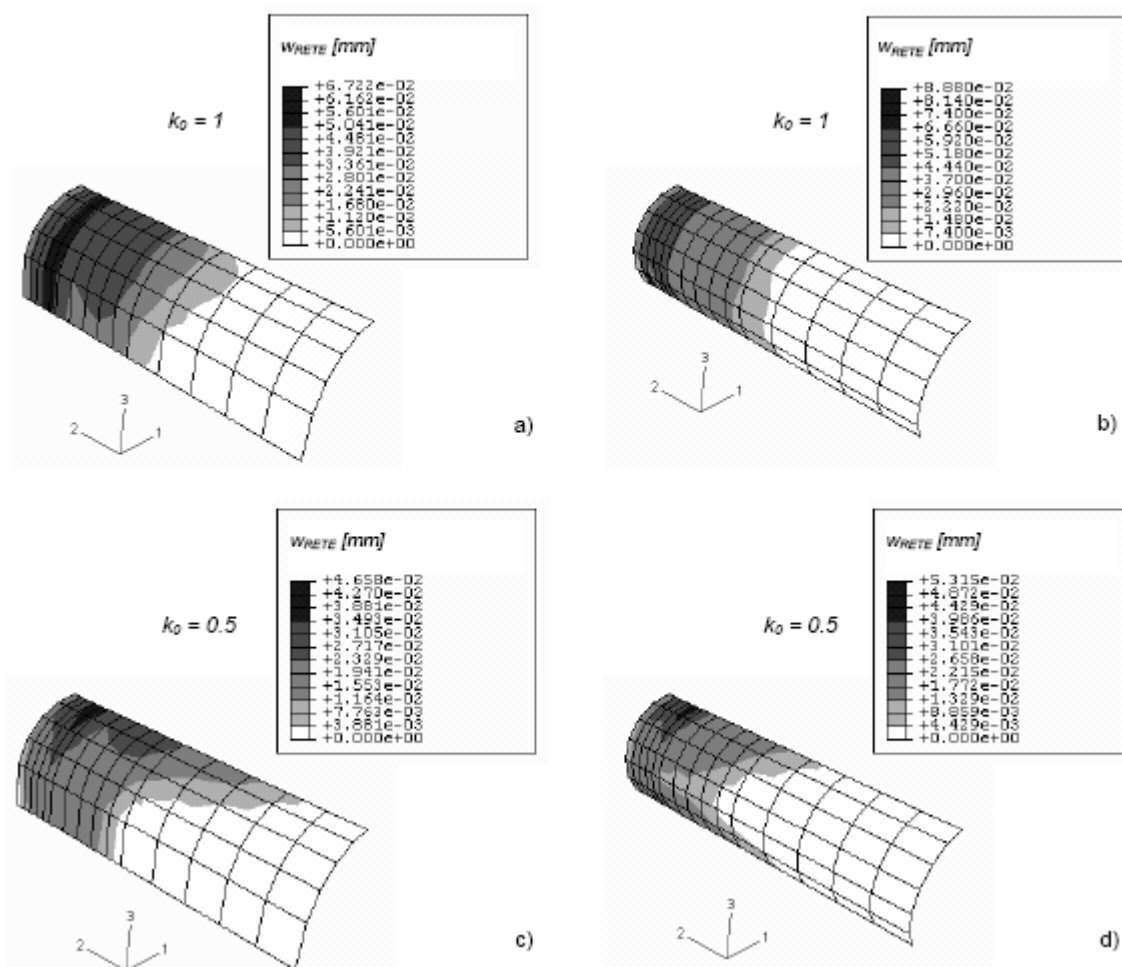
Il quadro fessurativo presente all'intradosso del rivestimento in calcestruzzo proiettato al termine della fase di scavo è mostrato nelle successive Figure 6 e 7. Come si può notare, la distribuzione delle fessure varia con la geometria del cavo e con lo stato tensionale iniziale; in particolare, una distribuzione di sforzi anisotropa ( $k_0 = 0.5$ ) determina una concentrazione delle tensioni di trazione - e conseguentemente delle fessure - in calotta. A causa della mancata simmetria del problema in esame, anche nel caso di distribuzione isotropa ( $k_0 = 1$ ) si registra la presenza di fessure nel rivestimento, principalmente localizzate in prossimità del fronte di scavo. La forma del cavo esercita invece un'influenza piuttosto modesta sull'estensione del quadro fessurativo, che comunque appare più limitata nel caso di geometria circolare rispetto

al caso di galleria a ferro di cavallo.

La tipologia di rinforzo adottata sembra condizionare maggiormente l'ampiezza  $w$  delle fessure, che risulta decisamente più contenuta, a parità di condizioni esterne, nel caso di utilizzo di fibre metalliche in sostituzione dell'armatura tradizionale. La distribuzione omogenea delle fibre e il loro orientamento casuale all'interno del calcestruzzo proiettato garantisce infatti una ripartizione più uniforme delle sollecitazioni nella struttura e determina un aumento della duttilità e un miglioramento del comportamento in fase post-fessurata.



**Figura 6.** Quadro fessurativo e ampiezza di fessura  $w$  all'intradosso del rivestimento in calcestruzzo proiettato fibrorinforzato: a) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 1$ ; b) geometria circolare,  $k_0 = 1$ ; c) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 0.5$ ; d) geometria circolare,  $k_0 = 0.5$ .



**Figura 7.** Quadro fessurativo e ampiezza di fessura  $w$  all'intradosso del rivestimento in calcestruzzo proiettato armato con rete: a) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 1$ ; b) geometria circolare,  $k_0 = 1$ ; c) geometria a ferro di cavallo,  $k_0 = 0.5$ ; d) geometria circolare,  $k_0 = 0.5$ .

#### 4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata studiata l'influenza esercitata da alcuni parametri ritenuti significativi (geometria del cavo, stato tensionale iniziale in sito, tipo di rinforzo - rete o fibre metalliche - adottato per il rivestimento) sull'interazione tra ammasso roccioso e struttura nel caso di gallerie profonde. Come era lecito attendersi, le analisi non lineari agli elementi finiti hanno confermato che il comportamento deformativo globale del rivestimento di prima fase in calcestruzzo proiettato risulta scarsamente influenzato dalla particolare tipologia di rinforzo adottata, mentre risente in misura molto maggiore della situazione al "contorno", rappresentata dalle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, dallo stato tensionale presente in sito e dalla forma della sezione trasversale della galleria. Al contrario, la scelta di rinforzare il calcestruzzo proiettato con fibre metalliche o con armatura ordinaria esercita un'influenza non trascurabile sul comportamento meccanico locale del rivestimento, specialmente in termini di estensione del quadro fessurativo e relative ampiezze di fessura. L'utilizzo delle fibre, infatti, oltre a presentare vantaggi di tipo tecnologico connessi alla maggiore facilità di posa in opera del rivestimento stesso, migliora le caratteristiche meccaniche del materiale, specie in fase post-fessurativa. Questo benefico effetto, generalmente trascurato in fase di progettazione, è stato valutato nelle analisi numeriche condotte mediante il legame costitutivo PARC, grazie al quale è anche stato possibile tenere in conto il progressivo indurimento del calcestruzzo proiettato durante le varie fasi di scavo della galleria, eseguendo un continuo aggiornamento delle proprietà del materiale nel tempo. Lo studio del comportamento strutturale dei rivestimenti di prima fase costituisce il punto di partenza per un'analisi più generale riguardante anche l'ottimizzazione dei rivestimenti definitivi, spesso sovradimensionati nella corrente prassi progettuale.

## 5. RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata finanziata dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito del Progetto nazionale "Ottimizzazione delle prestazioni strutturali, tecnologiche e funzionali delle metodologie costruttive e dei materiali nei rivestimenti di gallerie".

Gli Autori ringraziano inoltre il Prof. G. Plizzari e l'Ing. G. Tiberti per aver fornito i dati sperimentali relativi al calcestruzzo fibrorinforzato, utilizzati nel presente lavoro per la calibrazione della legge costitutiva impiegata.

## 6. BIBLIOGRAFIA

[01] G. SWOBODA, A. MOUSSA, "Numerical modelling of shotcrete and concrete tunnel linings", Tunnelling and Ground Conditions, Abdel Salam ed., Balkema, Rotterdam, pp.427-436, 1994.

[02] A. GRAZIANI, D. BOLDINI, R. RIBACCHI, "Practical estimate of deformations and stress relief factors for deep tunnels supported by shotcrete", Rock Mechanics and Rock Engineering n 38 (5), pp. 345-372, 2005.

[03] G. GALLI, A. GRIMALDI, A. LEONARDI, "Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining", Computer and Geotechnics n 31, pp. 171-183, 2004.

[04] B. BELLETTI, R. CERIONI, I. IORI, "A Physical Approach for Reinforced Concrete (PARC) membrane elements", ASCE Journal n. 127 (12), pp. 1412-1426, 2001.

[05] R. CERIONI, I. IORI, E. MICHELINI, P. BERNARDI, "Multi-directional modelling of crack pattern in 2D R/C members", Engineering Fracture Mechanics n. 75 (3- 4), pp. 615-628, 2008.

[06] P. BERNARDI, R. CERIONI, E. MICHELINI, M. MIGLIAZZA, "Numerical study on the role of fibres in tunnel preliminary lining", Proceedings of BEFIB 2008-7th RILEM international symposium on FRC, Chennai (India), Settembre, 2008, pp. 773-783.

[07] UNI EN 1992-1-1:2005, "Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture in calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici", 2005.

[08] UNI 10834:1999, "Calcestruzzo proiettato", 1999.

[09] E. HOEK, E.T. BROWN, "Underground Excavations in Rock", IMM, Londra, 1980.

[10] ACI 506.1R-98, "Committee Report on Fiber Reinforced Shotcrete", 1998.

[11] ITA REPORT WG12, "Shotcrete for rock support. A summary report on state-of-the- art", 2006.

[12] B. BELLETTI, P. BERNARDI, R. CERIONI, I. IORI, "On a fibre reinforced concrete constitutive model for NLFE analysis", Studies and Researches n. 24, Graduate School in Concrete Structures – Fratelli Pesenti, Politecnico di Milano, Italy, 2003.

### *Contatti con gli autori:*

Patrizia Bernardi: [patrizia.bernardi@unipr.it](mailto:patrizia.bernardi@unipr.it)

Roberto Cerioni: [roberto.cerioni@unipr.it](mailto:roberto.cerioni@unipr.it)

Elena Michelini: [elena.michelini@nemo.unipr.it](mailto:elena.michelini@nemo.unipr.it)

Maria Migliazza: [mariarita.migliazza@unipr.it](mailto:mariarita.migliazza@unipr.it)