

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Geotecnica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE



**Politecnico  
di Torino**

*Analisi parametriche per l'individuazione dei difetti  
nei rivestimenti definitivi delle gallerie*

*Relatore:*

Prof.ssa Monica Barbero

*Correlatori:*

Prof. Fabrizio Barpi

Ing. Lorenzo Milan

*Correlatore esterno:*

Ing. Georgios Kalamaras

*Candidato:*

Lorenzo Lo Giudice

Anno accademico 2020/2021



# Sommario

Nel momento in cui si entra all'interno di una qualsiasi galleria si possono notare delle fessure sul suo rivestimento che si estendono in direzioni diverse, in zone diverse, con ampiezze diverse. Sorge spontaneo chiedersi perché nascano queste fessure, a cosa possano essere dovute, e perché siano verticali piuttosto che orizzontali.

L'obiettivo di questo studio è indagare la genesi delle fessure in galleria, ricercando quali possano essere le condizioni tensionali e al contorno della galleria che stanno alla base della creazione di una zona contraddistinta da elevate tensioni di trazione.

A tal fine, dopo aver introdotto i metodi di costruzione di un tunnel, le forme tipiche di un tunnel, le tipologie di rivestimenti utilizzati e aver descritto le diverse tipologie di fessure, il presente elaborato descrive un'analisi parametrica condotta su una galleria di riferimento situata nel nord Italia, variando le condizioni di stato tensionale e di carico nel suo intorno. Per mezzo di tale analisi, si tenta di associare a ciascuna configurazione esaminata, una localizzazione e un'orientazione delle fessure che possono insorgere. Tale studio viene condotto in modo qualitativo, considerando scenari realistici ma ipotetici e arbitrari, e dunque prescinde dalle caratteristiche specifiche della singola galleria.

Successivamente, si integra lo studio con un'analisi specifica della galleria scelta. In particolare, noti i dati di monitoraggio riguardanti le reali condizioni di fessurazione riscontrate in sito, si punta ad individuarne le possibili cause, calibrando un modello che sia il più possibile vicino e rappresentativo del caso analizzato.

Nella parte finale dell'elaborato sono riportate le conclusioni dello studio effettuato e alcune personali considerazioni circa i possibili sviluppi futuri di questo lavoro di ricerca. Si punta al completamento di uno schema attraverso il quale si possa associare in maniera attendibile una particolare tipologia di fessura a delle specifiche cause e viceversa.

# Abstract

Almost in every concrete lined tunnel (even a steel bar reinforced one) cracks can be observed that have different orientations and aperture. The first question that arises is which are the causes of these cracks, why they vertical rather than horizontal.

The scope of this study is to investigate the genesis of cracks in concrete lined tunnels, searching the causes in geotechnical and stress-related factors.

Following a brief review of tunnel construction, section geometry, and lining types, the present study, through 3D parametric finite element analysis of a roadway tunnel, sheds light in zones where tensile stresses develop. By analyzing different hypothetical, yet realistic configurations of loading and boundary conditions, the location of cracks along the lining and the orientation of these cracks is examined.

The results of the parametric study are then implemented on a road tunnel in northern Italy where a monitoring programme of cracks on lining is undergoing. The 3D model provides a useful insight into the possible causes defining the ground for the remedial measures.

In the concluding chapters, an attempt is made to summarize the results of this work in a table format where the location and orientation of cracks is associated with boundary and loading conditions. Finally, the author provides his opinion on future work on this particularly important for the future subject, being the current study only the first step in understanding the complex mechanisms of cracks generation of lined tunnels.

# Indice

Sommario .....	I
Abstract .....	II
Indice.....	III
Indice delle figure .....	V
Indice delle tabelle .....	VII
Indice degli allegati.....	VIII
Introduzione .....	1
1. Inquadramento della tematica trattata .....	3
1.1. Tecniche costruttive .....	3
2. Studio bibliografico della difettologia in galleria su rivestimenti in calcestruzzo.....	9
2.1. Introduzione sulla genesi delle fessure.....	9
2.2. Metodi di costruzione e forme di una galleria - Tipologie di rivestimenti.....	10
2.2.1. Metodi di costruzione.....	10
2.2.2. Forme tipiche di una galleria .....	16
2.2.3. Tipologie di rivestimenti.....	18
2.3. Difetti associati al deterioramento degli elementi strutturali e alla geometria della galleria .....	24
2.3.1. Fessure orizzontali FI-1 .....	24
2.3.2. Fessure diagonali FI-2.....	25
2.3.3. Fessure verticali FI-3 .....	26
2.3.4. Fessure da ritiro FI-4.....	27
2.3.5. Fessure curvilinee (mezzaluna) FI-5.....	29
2.3.6. Fessure legate alle irregolarità di forma.....	30
3. Possibili cause e interventi correlati ai difetti analizzati.....	31
3.1. Introduzione generale sulle varie tipologie di cause .....	31
3.1.1. Fattori legati alle condizioni geologiche, geotecniche e idrogeologiche .....	31
3.1.2. Deterioramenti causati da variazioni delle condizioni della formazione rocciosa.....	32
3.1.3. Effetti della presenza di acqua sul deterioramento della galleria.....	32
3.1.4. Cause ambientali .....	32
3.1.5. Fattori legati alla costruzione .....	33
3.1.6. Fattori legati alla vita utile della struttura .....	34

3.2.	Identificazione dei parametri rilevanti per la conduzione di analisi numeriche.....	35
3.2.1.	Classificazione “IQA”.....	38
3.2.2.	Indagini in galleria .....	42
3.3.	Interventi di ripristino e impermeabilizzazione in galleria .....	45
4.	Analisi numeriche .....	47
4.1.	Simulazione della difettologia associata ad una specifica tratta di galleria esistente attraverso un’analisi FEM 2D.....	48
4.2.	Modellazione FEM 3D del problema analizzato.....	57
4.3.	Analisi parametrica – Variazione dei parametri definiti al fine di analizzarne gli effetti sull’evoluzione dei difetti.....	58
4.4.	Analisi parametrica – Applicazione dei risultati alla galleria esistente introdotta.....	80
5.	Conclusioni .....	89
	Bibliografia .....	93
	Sitografia.....	95
	Ringraziamenti.....	97
	Allegati.....	99

## Indice delle figure

Figura 1.1.1 Intervento di preconsolidamento per la realizzazione di una galleria [7].....	3
Figura 1.1.2 Esempi di fresa (sopra) e scudo (sotto) [7].....	5
Figura 1.1.3 Rivestimento di prima fase realizzato mediante spritz-beton [7].....	6
Figura 1.1.4 Impermeabilizzazione di una galleria mediante un manto in PVC [7].....	6
Figura 1.1.5 Rivestimento definitivo di una galleria [S1].....	7
Figura 2.2.1.1 Metodi di costruzione [3] .....	12
Figura 2.2.2.1 Forme tipiche di una galleria [3] .....	18
Figura 2.2.3.1 Tipologie di rivestimenti [3].....	21
Figura 2.3.1.1 Fessura orizzontale provocata dalla spinta del terreno circostante [2].....	24
Figura 2.3.2.1 Insieme di fessure diagonali provocate dalla spinta del terreno sovrastante [2] .....	25
Figura 2.3.3.1 Esempio di fessura verticale in galleria [20] .....	26
Figura 2.3.4.1 Sviluppo tipico di fessure da ritiro all'interno di una porzione di rivestimento in "calcestruzzo moderno" [2].....	28
Figura 2.3.4.2 Esempio di fessura da ritiro nel calcestruzzo armato [S4] .....	28
Figura 2.3.5.1 Esempio di fessura curvilinea in galleria [2] .....	29
Figura 3.2.2.1 Restituzione del laser termografico che associa al prospetto del quadro fessurativo anche la mappatura termica che individua in blu le infiltrazioni d'acqua che lo hanno generato [4].....	42
Figura 3.2.2.2 Esempio di restituzione del rilievo georadar con indicazione dell'effettivo spessore di rivestimento [4].....	43
Figura 3.2.2.3 Esempio di restituzione delle prove di pull-out eseguite in corrispondenza di due diverse zone coperte da reti di protezione all'interno di una stessa galleria [4] .....	43
Figura 3.2.2.4 Esempio di restituzione di una prova con martinetto piatto condotta in corrispondenza di 4 sezioni della calotta a tre progressive di una stessa galleria [4] .....	44
Figura 3.2.2.5 Esempio di restituzione di un modello tomografico. La scala di colore rappresenta da blu a rosso l'incremento dei valori di velocità sismica. L'incremento di tale parametro corrisponde ad un incremento delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso indagato [4].....	45
Figura 4.1.1 Modello numerico 2D per la sezione di interesse.....	49
Figura 4.1.2 Stages per la realizzazione del modello.....	53
Figura 4.1.3 Caratteristiche del "Composite" utilizzato su RS2.....	53
Figura 4.1.4 Stages per la realizzazione del modello assialsimmetrico.....	54
Figura 4.1.5 Andamento degli spostamenti registrati sul contorno dalla galleria.....	55
Figura 4.1.6 Grafico distanza dal fronte di scavo - spostamento .....	55
Figura 4.1.7 Curva caratteristica della galleria .....	56
Figura 4.2.1 Modello 3D per analisi parametrica .....	57
Figura 4.3.1 Configurazioni analisi parametrica.....	65
Figura 4.3.2 Tensioni di trazione configurazione g).....	67
Figura 4.3.3 Tensioni di trazione configurazione h).....	67
Figura 4.3.4 Tensioni di trazione configurazione i).....	68
Figura 4.3.5 Tensioni di trazione configurazione k).....	68
Figura 4.3.6 Tensioni di trazione configurazione m).....	69
Figura 4.3.7 Tensioni di trazione configurazione n).....	69
Figura 4.3.8 Rotazione configurazione b).....	71

Figura 4.3.9 Rotazione configurazione c).....	71
Figura 4.3.10 Rotazione configurazione d).....	72
Figura 4.3.11 Rotazione configurazione g).....	72
Figura 4.3.12 Rotazione configurazione h).....	73
Figura 4.3.13 Tensioni di trazione configurazione g) (2D) .....	75
Figura 4.3.14 Tensioni di trazione configurazione h) (2D) .....	75
Figura 4.3.15 Tensioni di trazione configurazione i) (2D) .....	76
Figura 4.3.16 Tensioni di trazione configurazione k) (2D) .....	76
Figura 4.3.17 Tensioni di trazione configurazione m) (2D) .....	77
Figura 4.3.18 Tensioni di trazione configurazione n) (2D) .....	77
Figura 4.3.19 Influenza dello stato di sollecitazione sul rivestimento sulle tensioni di trazione.....	79
Figura 4.4.1 Modello 3D rappresentativo del caso reale analizzato .....	80
Figura 4.4.2 Quadro fessurativo monitorato della galleria in esame [20].....	81
Figura 4.4.3 Configurazioni analisi caso reale.....	82
Figura 4.4.4 Configurazioni analisi caso reale non interessanti .....	83
Figura 4.4.5 Tensioni di trazione configurazione o).....	84
Figura 4.4.6 Tensioni di trazione configurazione p).....	84
Figura 4.4.7 Tensioni di trazione configurazione q).....	85
Figura 4.4.8 Tensioni di trazione configurazione r).....	85
Figura 4.4.9 Tensioni di trazione configurazione s) .....	86
Figura 4.4.10 Tensioni di trazione configurazione t).....	86
Figura 4.4.11 Tensioni di trazione configurazione r) (2D).....	88

## Indice delle tabelle

Tabella 3.2.1 Fattori d'influenza legati ai difetti [1].....	35
Tabella 3.2.2 Analisi delle problematiche e proposte di interventi per gallerie rivestite in cemento armato [1].....	37
Tabella 3.2.1.1 Classificazione IQOA [4].....	38
Tabella 3.2.1.2 Obiettivi della campagna di indagini in riferimento alla classificazione dei difetti [4].....	41
Tabella 3.3.1 Schema normativo UNI EN 1504 [16] .....	45
Tabella 4.1.1 Spostamenti registrati di interesse.....	55
Tabella 4.1.2 Valori considerati per la costruzione della curva caratteristica della galleria.....	56
Tabella 4.3.1 Tabella sintetica analisi parametrica .....	66
Tabella 4.3.2 Confronto tra i valori di $\sigma_3$ e $\sigma_{YY}$ per le varie configurazioni adottate .....	74
Tabella 4.3.3 Influenza dello stato di sollecitazione sul rivestimento sulle tensioni di trazione .....	79
Tabella 4.4.1 Confronto tra i valori di $\sigma_3$ e $\sigma_{YY}$ per le varie configurazioni adottate .....	87

## **Indice degli allegati**

Allegato 1 Zone di trazione modelli 3D.....	99
Allegato 2 Zone di trazione modelli 2D.....	103
Allegato 3 Quadro sinottico finale.....	107

# Introduzione

Nel presente elaborato di tesi si indaga sulla genesi delle fessure in galleria, individuando quali possono essere le condizioni tensionali e al contorno della galleria che stanno alla base della creazione di una zona contraddistinta da elevate tensioni di trazione. Si ricerca anche una correlazione tra le cause e le varie tipologie di fessure, che possono essere classificate in base alla loro orientazione in galleria. A tal fine si descrivono dapprima le tipologie di fessure e le cause che possono generarle da un punto di vista teorico, facendo riferimento a documenti presenti in letteratura, e successivamente, attraverso l'utilizzo di analisi numeriche agli elementi finiti (implementate nei softwares *RS2* e *RS3* prodotti da *Rocscience*), si realizzano dei modelli attraverso i quali si caratterizza il problema in esame. In particolare, lo studio è suddiviso in quattro capitoli principali.

Nel *Capitolo 1* si introduce la tematica da trattare e si elencano le diverse fasi costruttive per la realizzazione di una galleria.

Nel *Capitolo 2* si descrive la genesi delle fessure da un punto di vista teorico e meccanico, si introducono i metodi di costruzione di una galleria, le forme tipiche di una galleria, le tipologie di rivestimenti utilizzati. A questa parte preliminare segue la descrizione delle diverse tipologie di fessure, classificate in base alla loro orientazione.

Nel *Capitolo 3* si ricerca la correlazione tra i difetti analizzati e le possibili cause; questo è possibile attraverso delle tabelle presenti in letteratura, in cui vengono evidenziati i fattori d'influenza legati al singolo difetto, e attraverso la cosiddetta "*Classificazione IQOA*", che per mezzo di un codice alfanumerico individua la gravità/pericolosità del caso specifico, e a questa lega la programmazione nel tempo dell'intervento previsto per ridurla. Si elencano e descrivono brevemente anche le metodologie di indagini che possono consentire di raggiungere un adeguato livello di conoscenza, al fine di condurre in modo completo le verifiche strutturali e gli interventi che possono essere adottati per il ripristino del rivestimento e per l'impermeabilizzazione della galleria nel caso in cui questa risulti interessata da fessure più o meno diffuse, con un'apertura più o meno ampia.

Nel *Capitolo 4* si passa allo sviluppo di analisi numeriche di tipo parametrico, attraverso le quali si ricerca sempre una correlazione tra i difetti analizzati e le possibili cause. Al fine di validare le analisi parametriche, si decide di prendere come riferimento una galleria esistente, situata nel nord Italia, i cui lavori di adeguamento sono stati commissionati all'azienda *AK Ingegneria Geotecnica Srl*. Si realizza dapprima un modello 2D della galleria, per poi passare alla costruzione di diversi modelli 3D che permettono di condurre l'analisi parametrica; si variano le condizioni di stato tensionale e di carico nel suo intorno e si cerca di associare a ciascuna configurazione una localizzazione e un'orientazione delle fessure che possono nascere. Questa analisi viene condotta sulla base di condizioni al contorno realistiche ma ipotetiche e prescinde dunque dalle caratteristiche della singola galleria. In un secondo momento, si integra lo studio con un'analisi specifica della galleria scelta, in cui, noti i dati di monitoraggio riguardanti le reali condizioni di fessurazione riscontrate in sito, si punta ad individuarne le possibili cause, calibrando così il modello.



# 1. Inquadramento della tematica trattata

Nell'urbanistica e nella pianificazione territoriale, l'utilizzo di spazi nel sottosuolo è diventato di interesse notevole. Si sono discussi e spesso realizzati importanti progetti che permettono di utilizzare al meglio questa nuova risorsa. Le deformazioni del terreno circostante allo scavo interessano volumi tanto più ampi, quanto maggiori sono quelli scavati. Occorre quindi che questi progetti siano promossi con conoscenza di causa, per le notevoli ripercussioni che essi possono avere sull'ambiente, tenendo anche presente il fatto che esistono notevoli margini di incertezza e problemi costruttivi, legati alla natura geologica del territorio, dai quali, se non accuratamente valutati, possono nascere conseguenze gravi e costose.

## 1.1. Tecniche costruttive

Lo schema delle operazioni per la realizzazione di una galleria contempla l'esecuzione di diverse fasi costruttive, che verranno descritte nel seguito.

### 1. Interventi di preconsolidamento

La realizzazione di un preconsolidamento è necessaria in presenza di materiali poco resistenti. Tali interventi sono finalizzati a migliorare le qualità meccaniche dei materiali da attraversare, consentendo loro di manifestare condizioni di equilibrio all'apertura della cavità. In considerazione delle problematiche esistenti, i trattamenti possono interessare la sola zona di calotta oppure anche lo stesso fronte di scavo. Le tecniche di preconsolidamento maggiormente utilizzate sono le iniezioni di miscele cementizie e/o chimiche, il "jet-grouting", la chiodatura del fronte mediante tubi in vetroresina (*Figura 1.1.1*). Inoltre, i drenaggi e la realizzazione di un ombrello di infilaggi metallici sul fronte di scavo, hanno una funzione di presostenere il cavo della galleria.



*Figura 1.1.1* Intervento di preconsolidamento per la realizzazione di una galleria [7]

## 2. Scavo: metodologie di avanzamento

Lo scavo vero e proprio della galleria prevede la scelta del mezzo di abbattimento del fronte più idoneo, in funzione delle caratteristiche del materiale. Una volta demolito il nucleo viene allontanato dal fronte il materiale di risulta ("smarino"), il cui smaltimento costituisce uno dei principali problemi di impatto ambientale di un'opera in sotterraneo. Nel *Capitolo 2.2.1* verranno trattate nello specifico le varie tipologie di scavo.

## 3. Mezzi di scavo

Di seguito si riporta un elenco e una breve descrizione dei mezzi di scavo che è possibile utilizzare per la realizzazione di una galleria:

- *Pale meccaniche*: riservate a materiali incoerenti o debolmente coerenti.
- *Martelli demolitori o "martelloni"*: capaci di abbattere rocce aventi caratteristiche scadenti ed utilizzati anche per correggere la profilatura di scavo dopo l'abbattimento con esplosivo.
- *Frese*: per materiale roccioso con caratteristiche meccaniche da medie ad elevate. Si dividono in *frese ad attacco puntuale* che sono versatili, poco ingombranti e consentono lo scavo di sezioni di qualsiasi forma e dimensione purché non superiore a 30m<sup>2</sup> e *frese ad attacco integrale* che risultano poco versatili e sono costituite da una testa rotante avente diametro pari a quello della galleria; è necessario un buon grado di stabilità dell'ammasso roccioso per consentire l'avanzamento della fresa (*Figura 1.1.2*).
- *Scudi*: per terreni sciolti o rocce così fratturate da avere un comportamento ad essi assimilabili. Si dividono in *scudi aperti*, simili a delle frese, la cui funzione è essenzialmente quella di proteggere lo scavo da possibili distacchi localizzati e *scudi chiusi o a pressione* che effettuano lo scavo del terreno mediante una testa tagliente; la stabilità del fronte è garantita mediante la pressione esercitata dallo scudo chiuso sul fronte stesso (*Figura 1.1.2*).
- *Scavo mediante esplosivo*: lo scavo mediante esplosivo prevede, in primo luogo, la realizzazione di un certo numero di fori da mina all'interno del fronte di scavo da abbattere; l'insieme delle mine inserite costituisce la cosiddetta "volata" e queste vengono fatte brillare contemporaneamente o in fasi successive distanziate fra loro di pochi millisecondi. La lunghezza dei fori da mina e la quantità di esplosivo utilizzata sono direttamente proporzionali alla qualità geomeccanica del mezzo.



Figura 1.1.2 Esempi di fresa (sopra) e scudo (sotto) [7]

#### 4. Consolidamenti radiali al contorno delle cavità

Consistono nella messa in opera di bulloni, iniezioni, laddove si hanno terreni in falda, al fine di garantire la stabilità dello scavo già effettuato.

#### 5. Rivestimento provvisorio o di prima fase

Finalizzato al conseguimento di condizioni di equilibrio a breve termine della cavità, è generalmente realizzato mediante calcestruzzo proiettato ("spritz-beton") eventualmente armato con rete elettrosaldata o rinforzato con fibre in acciaio e, in presenza di condizioni particolarmente gravose, ulteriormente armato con centine (Figura 1.1.3).



*Figura 1.1.3 Rivestimento di prima fase realizzato mediante spritz-beton [7]*

#### *6. Impermeabilizzazione della galleria*

Consiste nell'applicazione sulle pareti di scavo di un manto in PVC, al fine di impedire scambi di acqua con la falda (*Figura 1.1.4*).



*Figura 1.1.4 Impermeabilizzazione di una galleria mediante un manto in PVC [7]*

### 7. Rivestimento definitivo o di seconda fase

Getto di calcestruzzo eventualmente armato lungo le pareti della cavità, di spessore variabile in funzione delle condizioni geomeccaniche esistenti e generalmente compreso tra 30cm (situazioni particolarmente buone) a 120cm (situazioni eccezionalmente scadenti) (*Figura 1.1.5*).



*Figura 1.1.5 Rivestimento definitivo di una galleria [S1]*

### 8. Controllo in corso d'opera

Il controllo in corso d'opera riveste la funzione principale di verificare la corrispondenza tra i fenomeni deformativi reali e quelli previsti in fase progettuale. Dovranno essere acquisiti i dati relativi alle convergenze registrate in galleria e alle deformazioni sviluppatesi sul contorno dello scavo. Qualora la presenza di basse coperture lo consenta, risulta di grandissima utilità l'organizzazione di un controllo effettuato dalla superficie topografica (tramite assestimetri, inclinometri, piezometri), al fine di controllare le deformazioni prima, durante e dopo il passaggio del fronte di scavo [7].



## **2. Studio bibliografico della difettologia in galleria su rivestimenti in calcestruzzo**

### **2.1. Introduzione sulla genesi delle fessure**

La modifica della stabilità di un elemento murario crea una progressiva variazione del regime di tensione interno; a causa della ricerca di nuovi stati d'equilibrio, con naturali compressioni e dilatazioni del materiale costituente, la fase di rottura nasce quando la dilatazione è maggiore della tolleranza alla coesione del materiale in un punto. In quel punto si stabilisce una soluzione di continuità che si può propagare e apparire in superficie sotto forma di fessurazione. È chiaro quindi che le fessurazioni compaiono solitamente nelle fasi deformative inoltrate. Queste, in genere, sono precedute da lesioni compatibili con la continuità della massa che, prima di rompersi, subisce delle deformazioni elastiche e plastiche. La comparsa delle fessurazioni procede in base al tipo di perturbamento, ovvero a volte le fessure si manifestano immediatamente anche per dissesti di modesta entità, mentre, altre volte, appaiono dopo molto tempo, sino a quando la massa muraria è in condizioni alquanto instabili.

Le lesioni di una galleria sono gli effetti del suo dissesto e concorrono a determinarne il degrado. È fondamentale quindi analizzare il quadro fessurativo e deformativo al fine di poter formulare una diagnosi, che consiste nell'individuare le cause che hanno indotto il dissesto statico e valutarne la gravità in modo da determinare l'eventuale urgenza dell'intervento. Nello studio del legame fra lesioni e dissesti, i tecnici adottano diffusamente il *metodo deduttivo* poiché, allo stato attuale, è il più efficiente, avendo a che fare con materiali non omogenei e molto spesso caotici. Questo metodo si basa sull'analizzare i dissesti caratteristici dei semplici elementi, che costituiscono il complesso costruttivo. Si sottolinea che le lesioni sono una fotografia del dissesto statico in quel determinato tempo in cui si osservano e non forniscono, istantaneamente, indicazioni sul suo decorso a meno che non siano monitorate attentamente e per un periodo significativamente lungo.

Prima di analizzare nel dettaglio le varie tipologie di fessure e le cause ad esse correlate, è importante introdurre e avere una conoscenza di base dei metodi di costruzione di una galleria, della sua forma, dei tipi di rivestimenti utilizzati.

## 2.2. Metodi di costruzione e forme di una galleria - Tipologie di rivestimenti

### 2.2.1. Metodi di costruzione

In genere, esiste un metodo di costruzione ottimale per un dato insieme di condizioni di progetto. Le condizioni del sottosuolo giocano un ruolo importante nella decisione; tuttavia, ci sono altri fattori specifici del progetto che devono essere considerati prima di effettuare la scelta finale. I tipi di metodi di costruzione più utilizzati sono: *cut and cover*, *gallerie a scudo*, *meccanizzato (TBM)*, *jacked tunnels*, *tubo immerso*, *drill and blast*, e *scavo sequenziale* (Figura 2.2.1.1).



a) Cut and cover



b) Meccanizzato (TBM)



c) Jacked tunnel



d) Tubo immerso



e) Drill and blast



f) Scavo sequenziale

*Figura 2.2.1.1 Metodi di costruzione [3]*

- *Metodo “cut and cover”*

La costruzione attraverso il metodo “cut and cover” comporta tipicamente lo scavo di una trincea, la costruzione della struttura della galleria all'interno della trincea e il successivo ricoprimento con un materiale di riempimento ingegnerizzato. Poiché queste gallerie sono scavate a partire dal piano campagna, sono più economici se situati a basse profondità. Questo metodo di solito non è utilizzabile per attraversare fiumi, montagne o quando sono presenti servizi di pubblica utilità sotterranei. In genere, nelle gallerie realizzate con questo metodo si utilizzano rivestimenti in calcestruzzo gettati in sito. Il puntellamento temporaneo è generalmente costituito da pali rinforzati, rivestimenti isolanti, diaframmi. Rinforzi interni o tiranti sono normalmente necessari per sostenere le pareti temporanee durante la costruzione; quando c'è abbastanza spazio disponibile, le pareti laterali dello scavo possono essere inclinate invece di utilizzare i rinforzi. In alcuni casi, i pali sono installati lungo i bordi della trincea aperta per fornire supporto alla galleria e aiutare a prevenire cedimenti della struttura. Successivamente, in genere, si gettano in opera l'arco rovescio, i piedritti e la calotta della galleria. La carreggiata è costruita all'interno dell'impronta dello scavo e la struttura è dotata di tubi, condotti e altre utilità, se necessario.

- *Gallerie a scudo*

Le gallerie a scudo sono utilizzate quando il terreno deve essere controllato o comunque sostenuto durante il processo di scavo. Gli scudi chiusi sono utilizzati quando è necessario il controllo del livello della falda. Con questo metodo, uno scudo avanza un ciclo alla volta tipicamente mentre rimuove del fango e installando il supporto sul fronte simultaneamente. Questo processo viene poi ripetuto finché necessario per completare la galleria. Alcune applicazioni specifiche richiedono l'uso di macchine di perforazione (TBM) e queste gallerie possono essere circolari o rettangolari a seconda della forma della sezione trasversale dello scudo e della procedura utilizzata per scavare la galleria. In genere, l'intera faccia del fronte viene scavata prima dell'avanzamento dello scudo.

- *Scavo meccanizzato (TBM)*

Una *Tunnel Boring Machine (TBM)* è una macchina costituita da uno scudo con punte montate su una testa rotante che scava un'apertura circolare. Le caratteristiche del terreno hanno un'influenza significativa sulla scelta degli strumenti e sulla configurazione della macchina. Questi interventi possono coinvolgere aria compressa, denominati interventi iperbarici, per stabilizzare il terreno al fronte scavato. In generale, la maggior parte degli interventi è prevista in luoghi geologicamente favorevoli per minimizzare i rischi per il personale e per gestire i costi di produzione. L'utilizzo di queste macchine è considerato più efficiente in termini di costi su gallerie lunghe, dove le economie di scala consentono di recuperare il suo costo.

Nelle applicazioni su terreno tenero, la TBM è progettata per bilanciare la pressione del terreno e quella dell'acqua sul fronte di scavo, aspetto che aiuta a ridurre al minimo la perdita di terreno, l'entità dei cedimenti e i potenziali danni a strutture, servizi e strade. Le macchine sono sigillate per evitare che le acque sotterranee e il suolo non consolidato entrino nello scudo sul fronte di scavo.

Per limitare la perdita di terreno, il tasso di scavo è sincronizzato con il tasso di avanzamento della macchina: la macchina avanza e una quantità proporzionale di terreno viene rimossa al fronte di scavo.

Il terreno è sostenuto dallo scudo fino a quando i segmenti prefabbricati possono essere installati; la TBM avanza grazie a dei grandi martinetti idraulici che si spingono contro gli anelli dei segmenti prefabbricati assemblati.

Nelle applicazioni in roccia, le TBM sono progettate per avanzare rapidamente attraverso l'ammasso roccioso e non sono generalmente progettate per controllare la pressione del suolo o dell'acqua come nel caso di una macchina a faccia chiusa, poiché gli scavi in roccia sono generalmente relativamente stabili e abbastanza impermeabili; inoltre, non hanno bisogno di essere dotate di meccanismi complicati per controllare la perdita di terreno e l'entità dei cedimenti. In molti scavi in roccia, la TBM può efficacemente avanzare per mezzo di pinze che spingono contro le pareti dure dell'ammasso roccioso. Bulloni e altri tipi di supporto di roccia sono installati dietro la macchina, se necessario, per stabilizzare l'apertura. Dopo lo scavo della galleria, il rivestimento finale è installato in sito.

- *Tecnica “jacked tunnels”*

Ostruzioni come autostrade, edifici e linee ferroviarie possono precludere i metodi di scavo superficiali, come la tecnica “*cut and cover*”. La tecnica “*jacked tunnels*” è considerata relativamente non invasiva per la costruzione di gallerie. Il fronte viene fatto avanzare spingendo grandi sezioni di cemento all'interno del suolo, al di sotto di strutture e vie di trasporto, dove i cedimenti sono di primaria importanza. La cementazione o il congelamento possono essere utilizzati per stabilizzare il terreno intorno all'apertura della galleria; tuttavia, quando si utilizza il congelamento, il disgelo del terreno nel corso degli anni successivi può causare cedimenti a lungo termine. Grandi martinetti idraulici spingono le sezioni della galleria prefabbricata in posizione da un pozzo, mentre contemporaneamente si scava il terreno sul fronte. Questo processo viene ripetuto per completare la galleria dal pozzo iniziale al pozzo di ricezione; possono essere generate forze di attrito molto elevate, in particolare quando le distanze diventano importanti.

- *Tecnica “tubo immerso”*

Un corpo idrico, come un canale, un golfo o un fiume, può essere attraversato utilizzando la tecnica “*tubo immerso*”. Molte applicazioni moderne utilizzano massicci elementi di calcestruzzo prefabbricati che pongono l'attenzione sul mix design del calcestruzzo nel tentativo di controllare deformazioni termiche e la formazione di fratture durante il processo di fabbricazione. Considerazioni sui costi, requisiti di durabilità e problemi di costruzione sono i fattori principali che guidano il processo decisionale. Con elementi prefabbricati in calcestruzzo, un set di circa sei/otto elementi della galleria può generalmente essere costruito all'interno di un bacino di carenaggio per un periodo di circa un anno; a volte è necessario più di un set di elementi per completare la lunghezza della galleria. Ogni segmento è progettato individualmente per adattarsi all'allineamento e se la fessurazione del calcestruzzo dovesse risultare un problema, si può applicare un rivestimento impermeabile sulla sua superficie.

Quando il bacino di carenaggio viene inondato di acqua, gli elementi stagni galleggiano pochi metri sopra la superficie dell'acqua; successivamente, dei rimorchiatori legati a questi elementi, li rimorchiano verso il sito della galleria e una volta che questi sono allineati, vengono immersi e montati all'elemento precedente della galleria. Si utilizza una guarnizione, posizionata tra i segmenti lungo il loro perimetro, per garantire una tenuta stagna. Dopo aver posizionato gli elementi e aver installato le finiture interne della galleria, la trincea viene riempita con un riempimento ingegnerizzato, resistente all'erosione, per proteggere gli elementi della galleria dalle navi.

- *Tecnica “drill and blast”*

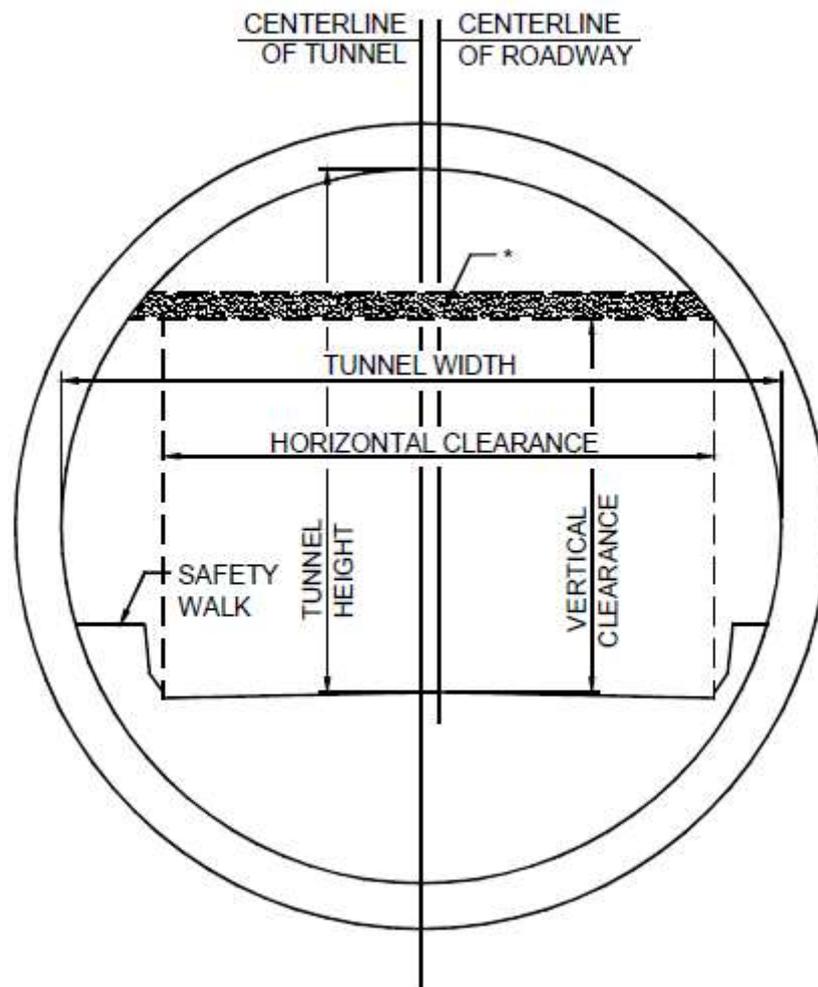
Nelle gallerie in roccia, la tecnica “*drill and blast*” può fornire una soluzione conveniente specialmente per applicazioni brevi o quando l'ammasso roccioso è soggetto a condizioni variabili, come zone di faglia e di taglio. Questo metodo può essere utilizzato in combinazione con metodi di scavo sequenziale quando si sviluppano grandi aperture nella roccia o quando la qualità della roccia è scadente. Queste gallerie sono solitamente scavate a ferro di cavallo per fornire un arco supportato o rinforzato sopra l'apertura, poiché l'instabilità principale si presenta in calotta. I piedritti e l'arco rovescio degli scavi sono relativamente stabili in formazioni rocciose solide. Quando l'ammasso roccioso è di qualità scadente e le tensioni sono più elevate, lo scavo può essere arrotondato o ovalizzato per fornire una certa curvatura in piedritti e arco rovescio. Le aperture sono realizzate con esplosivi, che riducono la roccia in piccoli frammenti, che possono essere caricati su veicoli o nastri trasportatori e rimossi dalla galleria. Un geologo di solito monitora le condizioni della roccia sulla parete e il personale specializzato installa il supporto iniziale necessario per stabilizzare l'apertura nell'ammasso roccioso. Il supporto iniziale consiste generalmente in una combinazione di bulloni, perni e calcestruzzo proiettato. Questo processo viene ripetuto ciclicamente fino al raggiungimento della lunghezza finale della galleria e a costruzione ultimata viene posizionato un rivestimento finale in sito.

- *Scavo sequenziale*

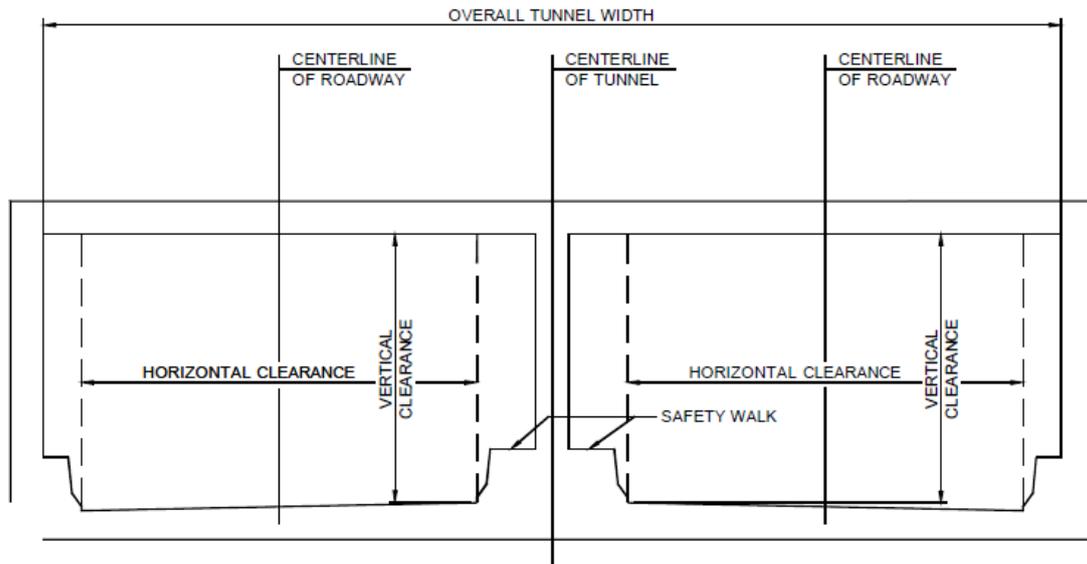
Quando il terreno manca della resistenza per supportare uno scavo *full-face*, la rimozione può essere effettuata in fasi. Le fasi intermedie sono supportate se necessario, e la porzione successiva viene scavata in modo incrementale fino al completamento della sezione trasversale. Con questo metodo, un ingegnere geotecnico di solito controlla le condizioni del terreno sul fronte mentre gli addetti ai lavori installano il supporto iniziale necessario per stabilizzare l'apertura. Questo processo è indicato come metodo di scavo sequenziale (*SEM*). Anche se è comunemente utilizzato in terreni teneri e rocce deboli, può anche essere combinato con il metodo “*drill and blast*” e utilizzato in applicazioni in roccia dura. Questo metodo è utile per lo scavo di grandi aperture sotterranee come una caverna o una camera, mentre le gallerie sono solitamente costruite con una forma ovale poiché le sezioni arrotondate sono più efficienti nel contrastare le tensioni che si sviluppano intorno all'apertura. Il SEM è generalmente utilizzato per realizzare gallerie corte mentre l'uso della TBM è spesso più economico per la realizzazione di gallerie lunghe. I metodi di supporto utilizzati in uno scavo sequenziale sono molto efficaci nel controllare i cedimenti durante lo scavo della galleria e una volta che questa è completata, viene posizionato un rivestimento finale in sito per contrastare i carichi permanenti [3].

### 2.2.2. Forme tipiche di una galleria

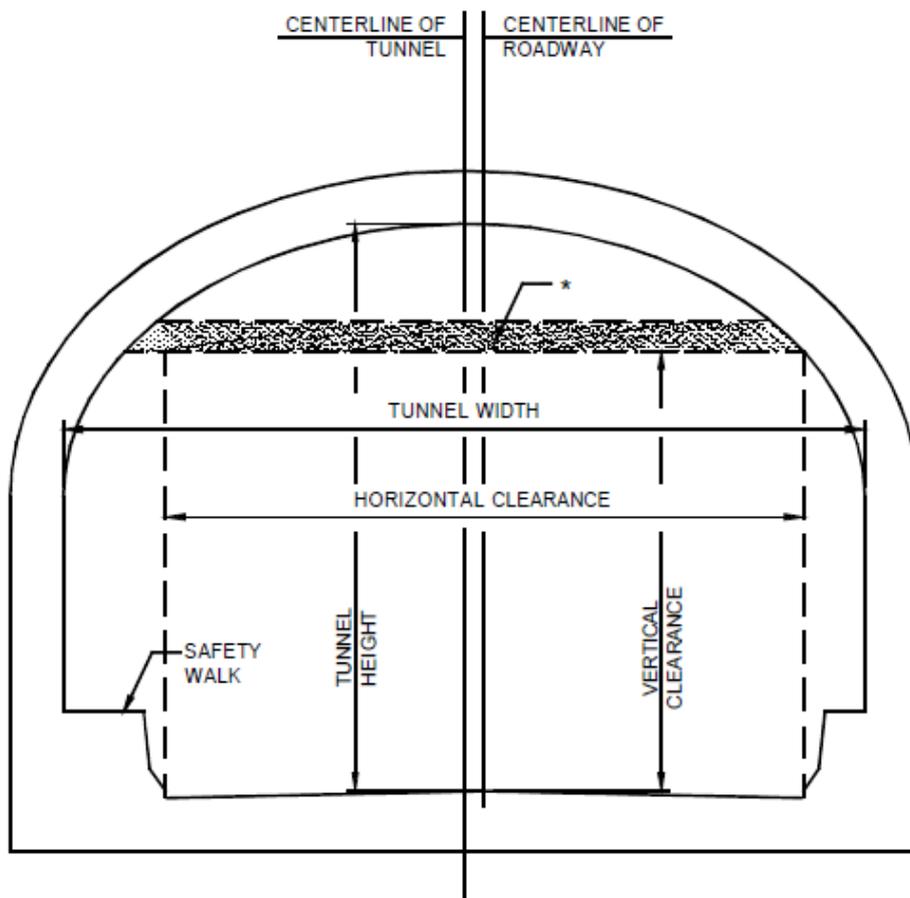
Le quattro forme più comuni per la realizzazione di una galleria sono: circolare, rettangolare, a ferro di cavallo, ovale. La forma di una galleria viene determinata in base alla forma esterna e non in base a quella interna, che spesso risulta rettangolare. La forma esterna generalmente è correlata al metodo di costruzione utilizzato e alle condizioni del terreno circostante. Alcune gallerie possono avere forme diverse lungo la propria lunghezza, proprio perché possono variare le condizioni al contorno e la copertura al di sopra degli stessi. La forma varia, dunque, in funzione del metodo di costruzione, in modo tale da sopportare elevate sollecitazioni anche ad elevate profondità (*Figura 2.2.2.1*) [3].



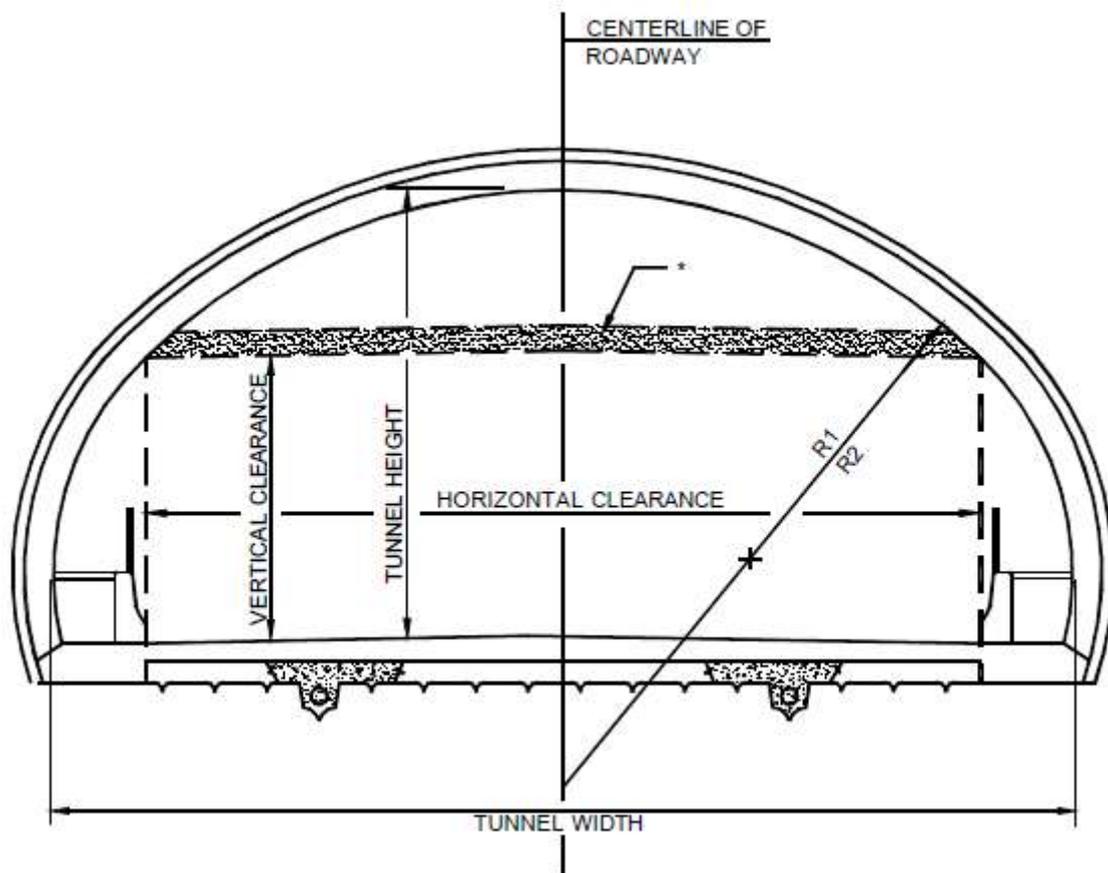
a) Galleria circolare



b) Galleria rettangolare



c) Galleria a ferro di cavallo



d) Galleria ovale

Figura 2.2.2.1 Forme tipiche di una galleria [3]

### 2.2.3. Tipologie di rivestimenti

Il supporto allo scavo di una galleria è fornito dal rivestimento, che stabilizza il terreno circostante e resiste all'infiltrazione delle acque sotterranee. Molte gallerie hanno un sistema a due linee di rivestimento, una iniziale (supporto temporaneo) e una finale (supporto permanente). Il supporto iniziale è tipicamente costituito da calcestruzzo proiettato e bulloni di roccia, sistemi con centine e rivestimenti isolanti, diaframmi. Il supporto finale è fornito da calcestruzzo armato, che può essere gettato in sito o realizzato attraverso segmenti prefabbricati, o in alternativa da ghisa e acciaio. Il tipo di rivestimento è influenzato dal metodo di costruzione utilizzato e dalle caratteristiche del terreno attraversato (Figura 2.2.3.1).



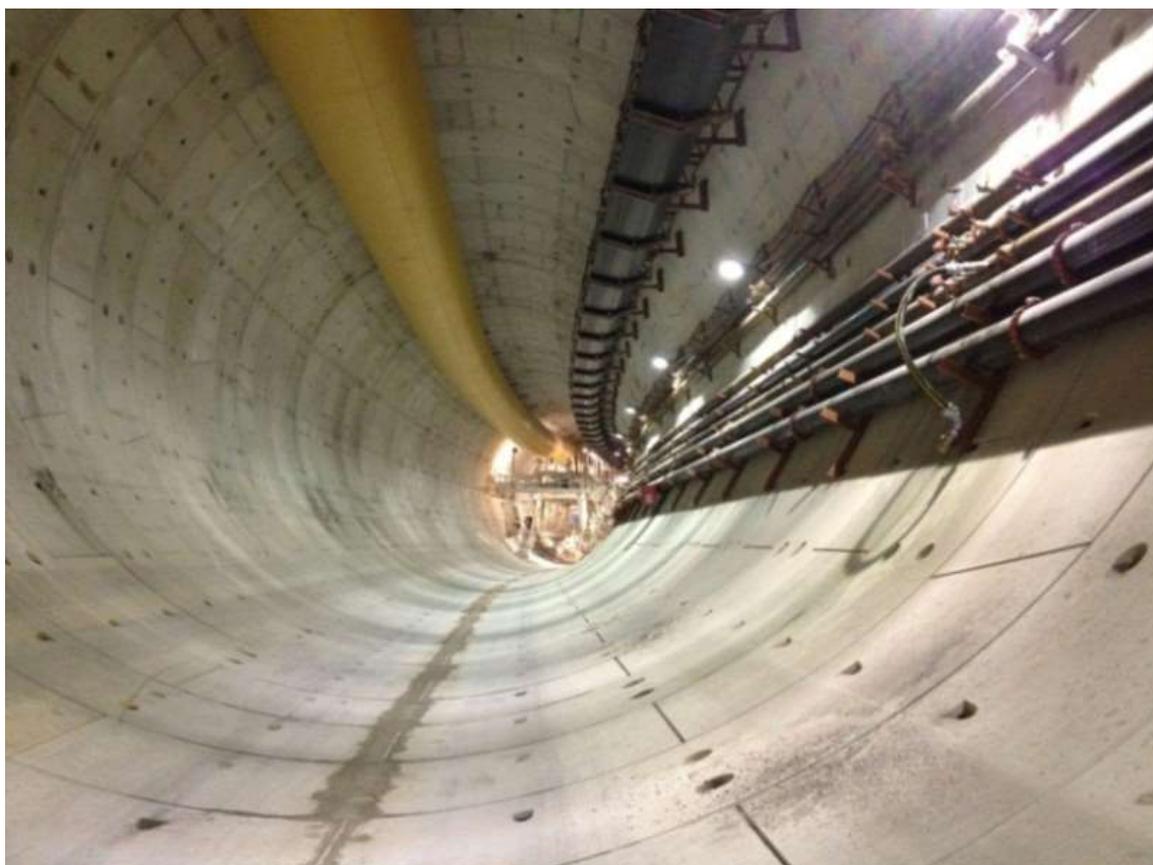
a) Assenza di rivestimento



b) Calcestruzzo proiettato



c) Sistemi con centine e rivestimenti isolanti



d) Calcestruzzo prefabbricato



e) Calcestruzzo gettato in sito



f) Diaframmi

*Figura 2.2.3.1 Tipologie di rivestimenti [3]*

I tipi di sostegno più comuni sono elencati e descritti brevemente di seguito:

- *Scavo in rocce senza rivestimento, con rinforzo della roccia*  
Alcune gallerie scavate in roccia non richiedono un rivestimento, poiché queste gallerie sono autoportanti grazie all'aiuto di elementi di rinforzo per la roccia, localizzati o sistematici. Il supporto della roccia è usato per aumentare la stabilità dell'ammasso roccioso cucendo i difetti strutturali intorno all'apertura scavata. Ad esempio, quando i blocchi di roccia contengono faglie e fratture, perni non tensionati o bulloni tesi possono essere utilizzati per bloccare questi blocchi di roccia nella loro posizione. Si possono applicare, inoltre, cinghie metalliche, legature, rete elettrosaldata e calcestruzzo proiettato per evitare che la roccia debole si frantumi tra i bulloni o i perni. Le gallerie di roccia non rivestite erano comuni nelle vecchie ferrovie di montagna.
- *Calcestruzzo proiettato*  
Il calcestruzzo proiettato è un calcestruzzo applicato pneumaticamente, convogliato attraverso tubi flessibili e proiettato ad alta velocità sulle superfici; esso è rinforzato da barre di acciaio convenzionali, reti di acciaio e/o fibre. Esso è comunemente utilizzato come supporto temporaneo per la sua facilità di applicazione e per il breve tempo di indurimento anche se può essere utilizzato anche come rivestimento finale nel caso di strutture leggermente caricate. Il calcestruzzo proiettato, che può essere spruzzato sia bagnato che asciutto, con o senza presenza di rinforzi, viene spruzzato sulla superficie in strati fino al raggiungimento dello spessore voluto.
- *Sistemi con centine e rivestimenti isolanti*  
I sistemi con centine sono utilizzati in applicazioni in terreni e rocce tenere per la costruzione di gallerie e pozzi; tuttavia, le centine sono di solito installate come supporto temporaneo nel processo di rivestimento a due passaggi. Il primo passaggio consiste nell'installazione di centine in legno, acciaio o calcestruzzo proiettato distanziate a seconda delle condizioni del terreno incontrate. Dopo l'installazione, l'isolante è comunemente posizionato tra le centine per evitare che il terreno si rilassi e si sgretoli; l'isolante aiuta anche a proteggere i lavoratori e le attrezzature da eventuali detriti che cadono.  
Il rivestimento finale in cemento armato viene quindi posizionato durante il secondo passaggio. Gli effetti a lungo termine delle centine sono generalmente ignorati per la stabilità in quanto non sono generalmente dotati di protezione contro la corrosione sufficiente a garantire la longevità. Travi a traliccio spruzzate con calcestruzzo proiettato possono essere utilizzate per formare un sistema di questo tipo.
- *Calcestruzzo prefabbricato*  
I segmenti di calcestruzzo prefabbricati sono installati per sostenere il foro della galleria dietro la TBM in applicazioni in terreno tenero e roccia debole. La TBM avanza spingendo contro gli anelli completati dei segmenti di calcestruzzo prefabbricato, che forniscono il supporto iniziale e finale del terreno in un processo di rivestimento a un singolo passaggio. I segmenti sono progettati per resistere ai carichi permanenti provenienti dal terreno e dalla falda, nonché ai carichi temporanei derivanti dalla produzione, dal trasporto e dalla costruzione.

I carichi temporanei di solito governano il progetto di questi elementi. I segmenti della galleria sono rinforzati per resistere alle tensioni di trazione allo stato limite di esercizio e allo stato limite ultimo. Essi sono imbullonati tra loro con guarnizioni per ridurre la quantità di acqua che potrebbe infiltrarsi attraverso i giunti.

- *Calcestruzzo gettato in sito*

I rivestimenti in calcestruzzo gettati in sito sono utilizzati per fornire una finitura durevole soprattutto per le strutture delle gallerie grandi e complesse. Il calcestruzzo gettato in sito viene trasportato in uno stato fluido, e gettato all'interno di casseri. Questo è comunemente utilizzato come rivestimento finale per un sistema di rivestimento a due passaggi. Il calcestruzzo è di solito rinforzato con armatura o rete elettrosaldata. Il calcestruzzo è un materiale facile da lavorare, e può essere installato su supporti temporanei, posto contro una membrana impermeabilizzante, o utilizzato come finitura non strutturale per la protezione dal fuoco e dalla corrosione.

- *Diaframmi*

Le tipologie di costruzione dei diaframmi variano a seconda delle condizioni del progetto. Una tecnica comune è quella di scavare pannelli primari e secondari lungo una trincea in modo tale che la configurazione del muro finito rispetti quella proposta. Durante la costruzione, questi pannelli sono riempiti e mantenuti con del fango e successivamente dei rinforzi vengono abbassati al loro interno per stabilizzarli. Il calcestruzzo viene poi collocato sul fondo della trincea in modo da spostare il fango più leggero sopra. Una volta completati i pannelli murari, lo scavo globale inizia con i diaframmi che fungono da puntellamento; questi possono essere rinforzati utilizzando puntoni o tiranti. La costruzione di diaframmi può essere utilizzata come supporto temporaneo, o meno comunemente, possono essere incorporati nella struttura finale [3].

### 2.3. Difetti associati al deterioramento degli elementi strutturali e alla geometria della galleria

Si fa riferimento all'elenco dei difetti riportato nella guida “*Road tunnel civil engineering inspection guide – Book 2: Catalogue of deteriorations (January 2015)*” [2]; questi possono essere causati dall'interazione con l'acqua, dovuti al terreno circostante, legati al deterioramento dei materiali di rivestimento, legati a elementi strutturali. In questo studio ci si concentra sul *deterioramento degli elementi strutturali e della geometria della galleria*, in cui le diverse tipologie di fessure possono essere sintetizzate come segue:

#### 2.3.1. Fessure orizzontali FI-1

##### Descrizione (evidenze della presenza del difetto)

Queste fessure hanno direzione parallela all'asse longitudinale della galleria (*Figura 2.3.1.1*); la larghezza è generalmente maggiore rispetto alle fessure da ritiro.

##### Parametri da caratterizzare

Numero di fessure - Estensione - Larghezza - Deterioramenti ai bordi delle fessure - Determinare se le fessure interessano un singolo concio o più consecutivi

##### Difetti associati di cui valutare la presenza

Deformazione del rivestimento - Aree risonanti vuote - Distacchi di calcestruzzo - Fessure anomale o deformazioni del fondo stradale

##### Origini e possibili cause

Fessure legate ad un degrado dei materiali del rivestimento, con o senza influenza del terreno circostante

##### Fattori aggravanti

Rivestimento deteriorato - Vuoti all'estradosso

##### Osservazioni

Le fessure longitudinali si possono sviluppare lungo la galleria in qualsiasi punto della sezione trasversale. Le zone in cui è presente il difetto possono indicare i punti intorno a cui sta avvenendo una deformazione del rivestimento.

##### Fessure sui rivestimenti in calcestruzzo:

Possono formarsi su fessure già presenti dovute al ritiro che si riattivano, allargandosi, a causa di deformazioni avvenute durante l'esercizio dell'opera o in corrispondenza di giunti costruttivi.



Figura 2.3.1.1 Fessura orizzontale provocata dalla spinta del terreno circostante [2]

### 2.3.2. Fessure diagonali FI-2

#### Descrizione (evidenze della presenza del difetto)

Chiamate anche fessure oblique, la loro direzione è diagonale rispetto all'asse longitudinale della galleria (Figura 2.3.2.1). Raramente è presente una singola fessura, ma spesso diverse in successione; la larghezza è generalmente maggiore rispetto a quelle da ritiro.

#### Parametri da misurare

Estensione - Larghezza - Deterioramenti ai bordi delle fessure - Determinare se le fessure seguono o meno le riprese di getto o interventi di ripristino.

#### Deterioramenti o difetti associati da guardare

Formazione di porzione di rivestimento instabile (se le fessure si intersecano) - Rottura di spigoli - Fessure o deformazioni sulle carreggiate

#### Origini e possibili cause

Fessure di origine patologica spesso legata ad un'azione del terreno circostante - cedimenti differenziali - Deformazione della calotta per torsione o taglio obliquo rispetto all'asse longitudinale

#### Fattori aggravanti

Rivestimento deteriorato – Vuoti all'estradosso

#### Osservazioni

Le fessure diagonali spesso derivano da una deformazione torsionale della galleria. Le crepe diagonali hanno una direzione lineare o possono essere la combinazione di fessure verticali e orizzontali.

Questo deterioramento deve essere tenuto sotto osservazione perché può indicare la presenza di gravi problematiche per la galleria (inclinazione di un portale, cedimenti delle fondazioni, instabilità dei pendii ecc.).

#### Fessure sui rivestimenti in calcestruzzo:

La fessurazione può verificarsi su una fessura da ritiro preesistente, riattivata da una deformazione della struttura avvenuta durante la vita dell'opera; le fessure si allargheranno.



Figura 2.3.2.1 Insieme di fessure diagonali provocate dalla spinta del terreno sovrastante [2]

### 2.3.3. Fessure verticali FI-3

#### Descrizione (evidenze della presenza del difetto)

Le fessure verticali possono apparire in qualsiasi sezione della galleria. La loro direzione è perpendicolare all'asse longitudinale della galleria (*Figura 2.3.3.1*); la larghezza delle fessure è generalmente maggiore rispetto a quelle da ritiro.

#### Parametri da misurare

Numero di fessure - Lunghezza - Larghezza - Posizione rispetto alla progressiva metrica - Deterioramenti ai bordi delle fessure

#### Deterioramenti o difetti associati da cercare

Deformazione del rivestimento - Zone risonanti vuote - Fessure o deformazioni sulle carreggiate

#### Origini e possibili cause

Deformazione o variazione dello spessore del rivestimento - Errori in fase di esecuzione (rimozione casseforme) - Cedimenti differenziali

#### Fattori aggravanti

Rivestimento deteriorato – Evoluzioni e deformazioni del terreno circostante

#### Informazioni aggiuntive

Le fessure verticali possono essere isolate e continue, o apparire come una serie di fessure successive. Questo tipo di fessura può verificarsi nelle immediate vicinanze di un portale (a causa della variazione dello spessore del rivestimento, o cedimenti), ma anche nelle zone interne (a causa dell'influenza del terreno circostante). Occorre determinare se appaiono su una discontinuità sottostante o se sono causati da qualcos'altro.

#### *Fessure sui rivestimenti in calcestruzzo:*

La fessurazione può verificarsi su una fessura da ritiro preesistente, riattivata da una deformazione della struttura avvenuta durante la vita dell'opera; le fessure si allargheranno.



*Figura 2.3.3.1 Esempio di fessura verticale in galleria [20]*

#### 2.3.4. Fessure da ritiro FI-4

##### Descrizione (evidenze della presenza del difetto)

Si tratta di sottili fessure la cui lunghezza aumenta nel tempo.

Su rinforzi in calcestruzzo non armato la larghezza difficilmente supera i 3 mm.

In caso di deformazione del profilo della galleria, alcune fessure possono aprirsi per motivi strutturali; in questo caso sono da considerarsi fessure orizzontali, diagonali o verticali e non fessure da ritiro.

##### Parametri da misurare

Posizione - Quantità - Distanza fra le fessure e ampiezza delle stesse - Larghezza

##### Deterioramenti o difetti associati da cercare

Infiltrazioni d'acqua attraverso le fessure (galleria senza membrana impermeabile all'estradosso) – Suono vuoto alla battitura - Umidità

##### Origini e possibili cause

Il ritiro si verifica con il normale invecchiamento del calcestruzzo. Fessure causate da ritiro nel calcestruzzo non costituiscono un deterioramento o un difetto. Il livello di ritiro è legato ai materiali utilizzati per il mix design e all'esecuzione

##### Fattori aggravanti

Scarsa qualità del calcestruzzo o, al contrario, alto dosaggio di cemento - Infiltrazioni d'acqua - Cicli di gelo-disgelo - Sollecitazioni sul rivestimento

##### Informazioni aggiuntive

La fessura da ritiro non è in realtà un deterioramento in quanto tale; indica la riduzione del volume che accompagna l'essiccazione del calcestruzzo e la presenza di un vincolo che ne ostacola il ritiro.

##### *Calcestruzzo gettato "moderno" non armato*

Le crepe da ritiro sono facilmente identificabili, nonostante la loro dimensione fine (da 0,1 a 0,3 mm inizialmente, quindi da 1 a 3 mm dopo diversi anni).

La *Figura 2.3.4.1* illustra alcune delle forme tipiche che prendono:

1. fessure verticali (1) si sviluppano dal fondo del piedritto; dopo alcuni anni, possono unirsi con crepe orizzontali;
2. le fessure orizzontali (2) indicano il restringimento della massa di calcestruzzo nel piano perpendicolare all'asse longitudinale della galleria.

In tutte le gallerie ispezionati fino ad oggi, le fessure da ritiro più ampie (generalmente grandi fessure orizzontali) si stabilizzano ad una larghezza di circa 2-3 mm, a seconda delle dimensioni della superficie dell'intradosso. Qualsiasi maggiore larghezza è sospetta e richiede eventualmente l'uso di strumentazione di monitoraggio. Si nota che nei rivestimenti recenti protetti da una membrana impermeabile all'estradosso ci sono meno fessure rispetto al passato. Ciò può essere spiegato da rotture del fondo di scavo attenuate dal calcestruzzo spruzzato utilizzato come supporto, la presenza di materiali impermeabilizzanti che limitano il restringimento, la migliore attenzione durante il getto e l'utilizzo di materiali migliori.

La fessurazione da ritiro non si sviluppa sotto forma di crepe continue, ma può apparire come una fessura ampiamente distanziata e discontinua.

##### *Calcestruzzo gettato "vecchio" non armato*

La composizione (alto contenuto di acqua) e la scarsa attenzione durante il getto, ma anche spessori irregolari e l'assenza di membrane impermeabili, sono i principali responsabili della comparsa di queste fessure. In assenza di impermeabilizzazione l'infiltrazione d'acqua attraverso le fessure può portare ad altri deterioramenti.

La porosità e l'eterogeneità significative del calcestruzzo più vecchio fanno sì che le fessure da ritiro si diffondano lungo tutta la superficie e le fessure stesse siano meno visibili.

*Calcestruzzo armato*

La presenza di armature limita la formazione di fessure da ritiro. Spesso però si notano fessure fini in corrispondenza delle armature stesse (Figura 2.3.4.2).

*Calcestruzzo spruzzato*

Il calcestruzzo spruzzato fibrorinforzato ha poche o nessuna fessura.

La presenza di una rete saldata non elimina completamente la fessurazione dovuta a ritiro.

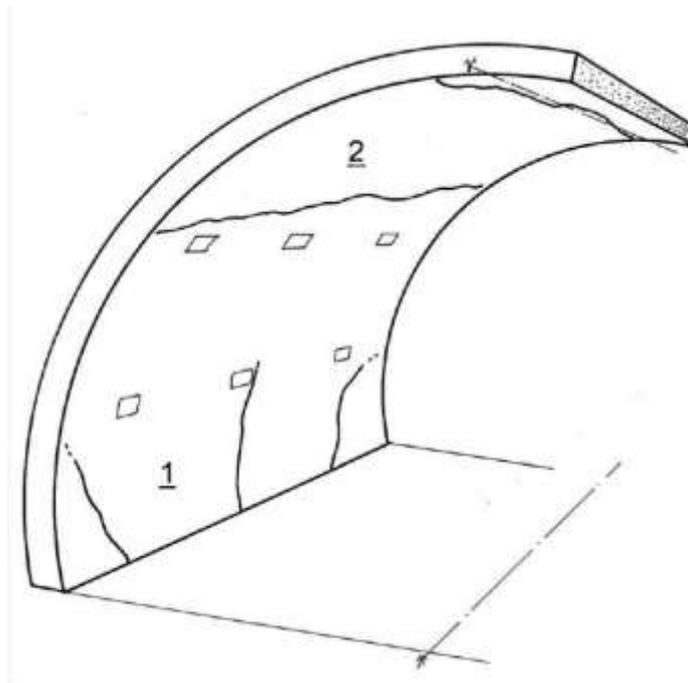


Figura 2.3.4.1 Sviluppo tipico di fessure da ritiro all'interno di una porzione di rivestimento in "calcestruzzo moderno" [2]



Figura 2.3.4.2 Esempio di fessura da ritiro nel calcestruzzo armato [S4]

### 2.3.5. Fessure curvilinee (mezzaluna) FI-5

#### Descrizione (aspetto visivo del deterioramento)

Una fessura curva uniforme (Figura 2.3.5.1), generalmente situata nella sezione trasversale alla fine di un concio, che inizia e termina sullo stesso giunto di costruzione.

#### Parametri da misurare

Larghezza - Bordi irregolari - Dimensioni dell'area inscritta dalla mezzaluna

#### Deterioramenti o difetti associati da cercare

Area di suono vuoto

#### Origini e possibili cause

Rottura generata dalla presenza della cassaforma del concio successivo che esercita una pressione su quello precedente il cui getto non è completamente asciugato.

#### Fattori aggravanti

Vuoto tra il calcestruzzo il terreno

#### Informazioni aggiuntive

Questo deterioramento è abbastanza comune nelle gallerie moderne, dove i getti di calcestruzzo si verificano in rapida successione. Questo tipo di fessura di solito appare sul rene, e più raramente in calotta. Appare sul bordo del concio precedentemente gettato.



Figura 2.3.5.1 Esempio di fessura curvilinea in galleria [2]

### 2.3.6. Fessure legate alle irregolarità di forma

Un altro aspetto da analizzare è legato alla forma irregolare della galleria; questo aspetto può indurre concentrazioni di tensione sul rivestimento in calcestruzzo con successiva formazione di fessure e, in alcuni casi, collassi locali. Tali irregolarità possono portare ad una riduzione della capacità strutturale del rivestimento significativa, anche più elevata del 50%, e ad un maggiore livello di deformazione rispetto al caso di una galleria con forma omogenea. I rivestimenti di una galleria sono generalmente progettati sotto l'assunzione di galleria con forma regolare, e dunque considerando uno spessore costante del rivestimento; questa assunzione può portare a sottostimare le reali tensioni agenti su di esso poiché tali variazioni di spessore possono pregiudicare la stabilità finale dell'intera struttura. Quando l'irregolarità delle rocce circostanti aumenta, si ha di conseguenza un aumento delle tensioni di compressione agenti mentre queste diminuiscono all'intradosso fino a diventare di trazione [6]. Questa trazione può diventare critica poiché porta alla formazione di fessure sul rivestimento. Per questo motivo gli effetti legati alle irregolarità non possono essere trascurati nei rivestimenti in calcestruzzo, in particolare se questi costituiscono il rivestimento definitivo della galleria.

### 3. Possibili cause e interventi correlati ai difetti analizzati

#### 3.1. Introduzione generale sulle varie tipologie di cause

Lo scopo di un'ispezione in galleria è quello di identificare i deterioramenti che si verificano nel tempo al fine di stabilire una diagnosi delle condizioni della struttura. Eventuali deterioramenti constatati sono quindi le conseguenze di un meccanismo di deterioramento che può avere diverse cause alla radice:

- le condizioni geologiche, geotecniche e idrogeologiche dell'ammasso roccioso che circonda la sezione della galleria possono influire sull'estradosso, se esiste un rivestimento, o direttamente sulle pareti della galleria;
- la costruzione della galleria qualora siano accertati difetti nella progettazione, nell'uso o anche nella natura dei materiali che costituiscono la galleria;
- l'invecchiamento dei materiali causato dai vari attacchi chimici cui è sottoposta la struttura.

Lo scopo della diagnosi è quindi quello di identificare il contributo relativo di ciascuno di questi fattori. Quando un rivestimento esiste, solo il suo intradosso mostrerà segni di deterioramento. Una buona conoscenza della costruzione di una sezione rivestita della galleria e del suo funzionamento sono quindi essenziali.

#### 3.1.1. Fattori legati alle condizioni geologiche, geotecniche e idrogeologiche

La vita di una galleria comprende due fasi: una fase di costruzione e una fase operativa. L'ispezione è spesso condotta in questa seconda fase, al fine di determinare come la struttura si sta logorando nel tempo. Tuttavia, le informazioni raccolte durante la fase di scavo sono essenziali perché forniscono accuratamente le condizioni in cui la galleria è scavata. Nel caso di una galleria rivestita, le informazioni geologiche, geotecniche e idrogeologiche sono disponibili solo al momento dello scavo.

Quando si considera la zona geotecnica di influenza, ci sono tre principali cause di deterioramento che possono verificarsi singolarmente o contemporaneamente:

- *geologica e geotecnica*: la natura e le caratteristiche del terreno che la galleria attraversa, hanno un'influenza significativa sul suo comportamento;
- *idrogeologica*: le caratteristiche idrogeologiche della massa rocciosa svolgono un ruolo importante nell'attivazione o nell'accelerazione del processo di invecchiamento delle strutture;
- *ambientale*: meccanismi antropici in prossimità di una galleria possono avere ripercussioni sulla zona interna della struttura o alle sue estremità. Inoltre, i meccanismi biologici, climatici e sismici sono catalizzatori per i deterioramenti.

### 3.1.2. Deterioramenti causati da variazioni delle condizioni della formazione rocciosa

- *Durante lo scavo: rilascio tensionale*

Sottoposta al peso delle formazioni sovrastanti ed eventuali compressioni tettoniche, la formazione rocciosa subisce una compressione. Lo scavo provoca un rilascio tensionale del terreno intorno alla galleria. A seconda della situazione, questo rilascio tensionale può essere concesso o deve essere fermato per prevenire possibili cedimenti in superficie. Di norma, nel caso di una galleria in esercizio, si può ritenere che l'ammasso roccioso trovi un nuovo equilibrio e che il rilascio tensionale non sia un fattore di deterioramento, bensì di alterazione.

- *Durante l'esercizio: alterazione*

L'alterazione è quasi interamente legata all'azione dell'acqua (falda, umidità). Tende a indebolire le proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso modificando le caratteristiche mineralogiche di rocce, giunti e il loro riempimento. Si tratta quindi di un comportamento a medio-lungo termine.

### 3.1.3. Effetti della presenza di acqua sul deterioramento della galleria

- *Alterazione*: un aumento del contenuto di acqua di alcuni materiali sensibili li altera e li ammorbidisce, permettendo loro di essere erosi.
- *Erosione, trasporto e deposito*: l'azione meccanica del flusso d'acqua trasporta particelle erose e le deposita altrove; si creano lentamente dei vuoti all'interno delle strutture.
- *Congelamento*: nelle regioni fredde, il congelamento può avere un effetto dannoso sulle strutture, ma anche sui costituenti dei materiali porosi (muratura, malta, calcestruzzo). Non è l'intensità di congelamento che innesca l'erosione, ma la frequenza di cicli gelo/disgelo; di contro, è proprio l'intensità e la durata del congelamento che determina la profondità del danno nel materiale. L'applicazione di membrane impermeabilizzanti all'estradosso delle nuove gallerie riduce questo deterioramento.
- *Pressione idrostatica*: il flusso d'acqua può penetrare nella galleria stessa (o entrare in contatto con il suo rivestimento) a seconda del tipo di permeabilità dell'ammasso roccioso. Dal momento che la maggior parte delle gallerie stradali si trovano sopra la falda freatica, la pressione sul rivestimento dovuta all'acqua è inusuale, e dunque non interessa l'intera struttura.

In generale, poiché l'acqua è uno dei principali fattori di deterioramento, la sua origine deve essere determinata (fonti naturali, perdite nella rete di distribuzione), nonché la sua composizione chimica e la sua portata.

### 3.1.4. Cause ambientali

- *Attacchi chimici e biochimici*: microrganismi sono presenti in tutte le tipologie di terreno e alcuni batteri hanno un effetto nocivo sulle strutture, anche se generalmente sembrano agire come catalizzatori per le reazioni piuttosto che innescarle direttamente. Per questo motivo non è stato finora attribuito alcun problema significativo nelle gallerie stradali, dovuto alla loro presenza. In ambienti chimici aggressivi, come gli ambienti marittimi, il processo di corrosione delle armature può essere notevolmente accelerato.

- *Influenza del clima*: le variazioni di temperatura, principalmente ai portali ma anche nella zona interna, introducono fenomeni di espansione/contrazione nelle strutture, che a volte accelerano il loro deterioramento. I movimenti dell'aria possono provocare un rapido essiccamento e, di conseguenza, il trasferimento di vapore acqueo con migrazione dei sali nei materiali.
- *Sismicità*: si ritiene che la struttura della galleria formata dal sistema di sostegno e dal rivestimento sia solidale con il suolo e che di conseguenza vibra in modo armonico con il suolo in caso di terremoto, mantenendo la stabilità. Tuttavia, le attrezzature che sono sospese o fungono da meccanismo di supporto (supporti di ventilazione, partizioni, carreggiata a due piani), potrebbero reagire negativamente a determinati carichi di origine sismica. Inoltre, in vecchie gallerie, rivestimenti che sono già deteriorati o mal fissati al suolo hanno più probabilità di subire danni in presenza di terremoti.

### 3.1.5. Fattori legati alla costruzione

Anche se i metodi di ricerca attuali e gli sviluppi delle tecniche e delle attrezzature rendono possibile ridurre l'incertezza nei progetti e la loro esecuzione, difetti legati alla costruzione sono ancora oggi possibili da riscontrare. Tutti i difetti originali identificati come potenzialmente dannosi per la struttura devono essere identificati e trattati durante le fasi di lavoro.

- *Progetto*: molte vecchie gallerie sono state costruite con indagini minime o con conoscenze geotecniche limitate; la progettazione era basata sui feedback di strutture precedenti. I rivestimenti non sono sempre stati progettati per resistere a comportamenti del terreno a lungo termine e i deterioramenti, a volte gravi, che si sono verificati durante la costruzione, sono stati risolti "nel miglior modo possibile" con i mezzi a disposizione. La considerazione scorretta della presenza dell'acqua ha talvolta portato a creare strutture scarsamente drenate, con rapido degrado locale.
- *Metodi di costruzione*: l'influenza di questo fattore può essere applicata a tutti i tipi di gallerie e a tutti i periodi di tempo. Alcuni problemi, che hanno richiesto un intervento complesso nelle vecchie gallerie, dimostrano le maggiori difficoltà nel processo di costruzione incontrate da aziende che non sempre sapevano come gestire imprevisti deterioramenti. Si notano spesso discrepanze tra il lavoro svolto e le specifiche di capitolato, nonché il mancato rispetto delle regole fondamentali di costruzione, nonostante i controlli di supervisione. I rivestimenti più vecchi, realizzati con calcestruzzo proiettato, mostrano difetti che erano inerenti alle tecniche del momento, che avevano prestazioni molto più scadenti rispetto ad oggi (dosaggio impreciso, mancanza di omogeneità).
- *Natura dei materiali*: se si fa riferimento al calcestruzzo, alcuni vecchi getti in calcestruzzo sono stati interamente alterati dopo pochi decenni. La causa può essere ricondotta alla solubilità dei leganti cementizi, all'uso di aggregati non idonei che contengono minerali suscettibili alla degradazione dei leganti, o alla variabilità nel dosaggio e nella miscelazione del calcestruzzo per la struttura; i cementi utilizzati erano a volte molto sensibili all'aggressione dell'acqua. Nelle strutture moderne, i deterioramenti legati alla qualità del calcestruzzo sono molto meno frequenti.

### 3.1.6. Fattori legati alla vita utile della struttura

- *Traffico*: a seconda dell'intensità del traffico, i suoi effetti possono essere permanenti, accidentali o eccezionali. Il deterioramento può essere additivo. Le procedure operative possono consentire di ridurre al minimo le conseguenze negative legate al traffico, in particolare se soggette a regolare monitoraggio e manutenzione.
- *Monitoraggio e manutenzione*: indipendentemente dalla complessità della struttura, è necessario applicare un monitoraggio regolare e formalizzato; tale controllo deve applicarsi sia alla struttura che alle attrezzature e deve consentire una corretta gestione delle operazioni di manutenzione ordinaria. La manutenzione specializzata è generalmente affidata ad aziende e viene attivata periodicamente dal gestore della galleria in base ai risultati del monitoraggio o dell'ispezione in corso [1].

### 3.2. Identificazione dei parametri rilevanti per la conduzione di analisi numeriche

Nella *Tabella 3.2.1* sono riportati tutti i difetti identificati in *Road tunnel civil engineering inspection guide – Book 2: Catalogue of deteriorations (January 2015)*, indicando con il simbolo “+” l’origine del difetto e con il simbolo “++” il fattore dominante:

*Tabella 3.2.1 Fattori d’influenza legati ai difetti [1]*

Lista dei difetti	Foglio num.	Fattore d’influenza							
		Sito			Costruzione			Vita della struttura	
		Terreno circostante	Azione dell’acqua	Condizioni ambientali	Progetto	Metodo di costruzione	Natura dei materiali	Operatività	Monitoraggio
<b>Interazione con l’acqua</b>									
Infiltrazioni d’acqua	HY-1	++	++	+			+		
Concrezioni	HY-2	+	++	+					
Effetti del gelo	HY-3		++	+			++		
Efflorescenze su malta o calcestruzzo	HY-4	+	++				+		
<b>Deterioramenti dovuti al terreno circostante</b>									
Carsi e cavità	ZI-1	++	+						
Deterioramento dei portali	ZI-2	+	+	+		+			+
Instabilità dei pendii	ZI-3	++	+						
<b>Deterioramenti nelle sezioni non rivestite</b>									
Distacco di blocchi da roccia alterata	NR-1	++	+	+		+			+
Distacco di porzioni da roccia stratificata	NR-2	++	+	+		+			+
<b>Deterioramento dei materiali di rivestimento</b>									
<b>Rivestimenti in muratura o pietra</b>									
Deterioramento superficiale a nido d’ape	RM-1		+	+			++		
Desquamazione	RM-2		+	+			++		
Esfoliazione	RM-3		+				++		
Distaccamenti dovuti a carichi di compressione	RM-4	++				+	+		
Deterioramento dei letti di malta	RM-5		++	+	+	+	++		

<b>Deterioramento dei materiali di rivestimento</b>								
<b>Rivestimenti in calcestruzzo (gettato in opera o prefabbricato)</b>								
Scheggiatura	RB-1			+		+		++
Rigonfiamenti	RB-2		++	+		+	+	
Lesioni e distacchi dovuti a carichi di compressione	RB-3	++				+		
Lesioni e distacchi dovuti a corrosione delle armature	RB-4		++		+	+		
Deterioramento dello spritzbeton	RB-5	+	+			+		
<b>Deterioramento dei sistemi di impermeabilizzazione, drenaggio e raccolta acque superficiali</b>								
Deterioramento del drenaggio d'intradosso	ED-1		+	+	+	++	+	+
Deterioramento delle canalette di raccolta in calotta	ED-2		+		+	++	+	++
Deterioramento delle canalette di raccolta in carreggiata	ED-3		+		+	++	+	++
Deterioramento delle membrane impermeabilizzanti	ED-4					++		
Deterioramento delle onduline	ED-5		+			+	+	++
Rigonfiamento delle membrane impermeabilizzanti	ED-6		++	+	+	+	+	
Deterioramento dei rivestimenti in malta	ED-7		++	+	+	+	+	
Deterioramento dei pannelli isolanti impermeabili	ED-8				+	+		
Deterioramento dei cordoli idroespandibili	ED-9		++			++	+	
<b>Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria</b>								
<b>Fessure</b>								
Fessure orizzontali	FI-1	++						
Fessure diagonali	FI-2	++						
Fessure verticali	FI-3	++						
Fessure da ritiro	FI-4					+	+	
Fessure curvilinee (mezzaluna)	FI-5					++		
<b>Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria</b>								
<b>Deformazioni</b>								
Abbassamento in chiave – Innalzamento in chiave – Deformazione asimmetrica	DF-1	++			+	+	+	
Imbozzamento localizzato	DF-2	+	+		+	++	++	
Disassamento dei conci murari	DF-3					++		
Deterioramento dell'arco rovescio	DF-4	+	+		+	+		+
Rottura dell'arco	DF-5	+	+			+	+	
<b>Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria</b>								
<b>Difetti legati alla realizzazione dell'opera</b>								
Fondi di fori di scoppio instabili	MO-1	+				++		+

Vuoti superficiali nel rivestimento	MO-2					++	+		
Vespai	MO-3					++	+		
Deterioramento dei giunti in calcestruzzo	MO-4				+	++			
Difetti superficiali nel calcestruzzo	MO-5					++	+		
<b>Altri deterioramenti</b>									
Difetti della carreggiata stradale	EQ-1	+	+			+	+	+	+
Deterioramento di lastre e tamponature	EQ-2				+	+		+	
<b>Deterioramenti associati al fuoco</b>									
Deterioramenti dovuti al fuoco	IN-1				+		+	+	+
<b>Deterioramenti causati da scarsa manutenzione</b>									
Scarsa manutenzione	EN-1							+	++

A seguire si riporta l'analisi delle problematiche e le proposte di interventi per le gallerie rivestite in cemento armato (Tabella 3.2.2).

Tabella 3.2.2 Analisi delle problematiche e proposte di interventi per gallerie rivestite in cemento armato [1]

<b>Studio preliminare</b>
<b>Condizioni sfavorevoli del terreno al momento della costruzione</b>
- Cambiamento delle condizioni del terreno non adeguatamente prese in considerazione durante la costruzione
<b>Deterioramenti al momento della costruzione</b>
- Mancanza di copriferro - armatura troppo vicina alle casseforme (calcestruzzo gettato in sito)
- vespai, distacco di inerti
- Calcestruzzo sottoposto a congelamento e scongelamento, a volte quando viene gettato per la prima volta
- difetti associati all'impermeabilizzazione
- Scarsa resistenza delle riparazioni localizzate o vecchie
<b>Identificazione dei deterioramenti e del loro sviluppo</b>
<b>Deterioramenti indotti</b>
- Corrosione delle barre di armatura con conseguente distacco del copriferro
- Indebolimento o frattura per impatto
- Distaccamento delle aree soggette a riparazione
- Attacco chimico legato agli afflussi aggressivi di acqua, tanto più deleteri in quanto il calcestruzzo è permeabile
- Effetto delle pressioni esterne del terreno che possono generare fessure e distaccamenti, i quali possono indicare la presenza di una deformazione in corso.
<b>Rischi</b>
- Caduta di calcestruzzo o detriti degradati
<b>Evoluzione</b>
- Sviluppo di segni visibili di difetti (cambiamento prevedibile se il monitoraggio strutturale è condotto correttamente)
- Creazione di nuovi deterioramenti a seguito di riparazioni inadeguate
<b>Indagini supplementari</b>
- Misurazione della deformazione (monitoraggio della fessura, convergenza, livellamento, misurazione del profilo)
- Misurazione del rivestimento, misurazione della profondità della carbonatazione
- Misura della riduzione di sezione di armatura resistente e analisi della capacità residua tale da garantire un margine di sicurezza (staffe di supporto del solaio di ventilazione, ad esempio)
- Prove di laboratorio (analisi di calcestruzzo, acqua, ecc.)
<b>Diagnosi finale</b>
<b>Analisi</b>
- Spiegazione delle cause dei difetti rilevati, della loro velocità di cambiamento, dei rischi indotti
- Spiegazione dei principali fattori responsabili dei deterioramenti
<b>Rimedi</b>
- Rimozione del calcestruzzo degradato
- Applicazione di passivante sulle armature e ricostruzione del copriferro
- Rinforzo, possibilmente complesso, del rivestimento fratturato (questo rimedio potrebbe non essere sufficiente se la rottura è dovuta al carico del terreno)

### 3.2.1. Classificazione “IQOA”

L'ispezione di una struttura è un approccio basato principalmente sull'osservazione e la descrizione del difetto e/o deterioramento e l'obiettivo è l'individuazione di questi ultimi più che la definizione delle cause e/o dei fattori che li hanno generati. È importante evidenziare che la loro gravità non è sempre necessariamente proporzionale alla loro "visibilità".

A tale scopo si fa riferimento alla *Classificazione “IQOA”* ("*Image qualité des ouvrages d'art*"), che come definito nel nome permette di avere una visione dello stato di salute della struttura.

La classificazione delle difettosità secondo il *Sistema IQOA* è ampiamente riportata nelle *Linee Guida CETU (Centre D'Etudes des Tunnels) 2015* riguardanti le opere di genio civile:

- *Road tunnel civil engineering inspection guide – Book 1: from disorder to analysis, from analysis to rating (January 2015)*
- *Road tunnel civil engineering inspection guide – Book 2: Catalogue of deteriorations (January 2015)*

Tale classificazione si scompone in due parti, la prima permette la classificazione dei difetti civili, la seconda classifica le venute d'acqua (*Tabella 3.2.1.1*).

*Tabella 3.2.1.1 Classificazione IQOA [4]*

CLASSIFICAZIONE IQOA Fessure / alterazioni	
1	in buono stato apparente
2	difetti superficiali
2E	difetti superficiali con evoluzione
3	degrado profondo che necessita intervento
3U	degrado profondo che necessita intervento urgente
S	sicurezza per gli utenti

CLASSIFICAZIONE Venute d'acqua	
1	nessun problema, solo macchie d'umidità
2	presenza d'acqua importante, possibile evoluzione dei degni a lungo termine
2E	presenza d'acqua importante, possibile rischio per l'opera, rafforzare sorveglianza e adottare provvedimenti
S	sicurezza per gli utenti

Con riferimento alla parte civile, la *Classificazione IQOA* prende in considerazione quadri fessurativi, lesioni ed alterazioni, in genere durante la fase di ispezione, identificandole con un codice alfanumerico che ne individua la gravità/pericolosità, in relazione alla quale l'intervento può essere programmato nel tempo, programmato urgentemente (nel giro di qualche giorno/settimana), immediato, in quanto riguarda la sicurezza degli utenti.

La *Classificazione IQOA* considera anche le difettosità relative alle venute d'acqua, la cui presenza può esaltare ed accelerare il degrado strutturale, in relazione anche alle caratteristiche chimiche dell'acqua, sia sulla matrice di calcestruzzo che sulle barre di armatura qualora presenti.

Si precisa che queste valutazioni indicano zone puntuali presenti nelle diverse tratte, e non riguardano quindi tutta l'opera; per cui anche una singola anomalia può far apparire grave la situazione, sebbene essa non riguardi la sicurezza strutturale dell'intero tratto dell'opera, ma solo un singolo punto che potrebbe costituire, comunque, un pericolo per l'utenza.

Con la procedura d'ispezione e la classificazione proposta, l'ispezione ed il monitoraggio si rendono sempre più efficaci; quest'ultimo permette, infatti, di sorvegliare in modo ottimale l'opera e di reagire tempestivamente ad ogni eventuale problema riscontrato, consentendo anche di prevedere l'andamento dello stato della galleria nel tempo.

Ad ogni valutazione (3,3U, S) corrisponderà una tempistica di intervento al fine di riparare/ridurre l'entità del difetto:

- Votazione 3: intervento nell'arco di pochi mesi;
- Votazione 3U: intervento nell'arco di poche settimane;
- Votazione S: intervento immediato.

La vigente normativa in materia di costruzioni, il *D.M. 17/01/2018 (NTC18)* [18], corredato dalla *Circolare esplicativa n.7 del Febbraio 2019* [19], pur concentrandosi prevalentemente su costruzioni di nuova realizzazione, affronta al *Capitolo 8* il tema delle costruzioni esistenti specificando che le incertezze intrinseche nel metodo di valutazione della sicurezza di un'opera possono essere ridotte in funzione del livello di conoscenza che si è in grado di raggiungere su tali aspetti.

Per raggiungere un appropriato livello di conoscenza, e quindi di affidabilità delle valutazioni di sicurezza sull'opera, è necessario preliminarmente condurre un'analisi storico-critica di tutta la documentazione, effettuando sopralluoghi e rilievi geometrico-strutturali per verificare la corrispondenza alla realtà di quanto riportato nella documentazione storica. In seguito si integra l'analisi con opportune indagini sperimentali, finalizzate a valutare l'effettiva consistenza del degrado riscontrato definendone tipologia, estensione e gravità.

Per avere una completa caratterizzazione dello stato di conoscenza e salute della galleria, gli obiettivi da perseguire possono essere sintetizzati come segue:

- 1) Definire/verificare le caratteristiche geometriche e costruttive del rivestimento in termini di:
  - a. Geometria della galleria
  - b. Spessore del rivestimento e valutazione del copriferro
  - c. Presenza di armature in intradosso e di eventuali centine (pre-rivestimento)
- 2) Analizzare le eventuali criticità del rivestimento definitivo e della sua interfaccia con l'ammasso roccioso in termini di:
  - a. Quadro fessurativo
  - b. Presenza di venute d'acqua e zone di umidità
  - c. Presenza di possibili vuoti a tergo del rivestimento
  - d. Presenza di discontinuità/lesioni all'interno dello spessore del rivestimento
  - e. Presenza di situazioni di degrado o disomogeneità all'interno dello spessore del rivestimento
  - f. Quadro deformativo
- 3) Determinare/verificare le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo del rivestimento
- 4) Definire lo stato di sollecitazione del rivestimento definitivo ed eventualmente monitorare situazioni critiche
- 5) Verificare lo stato di consistenza del rivestimento coperto da reti di protezione
- 6) Analizzare mediante indagini indirette, generalmente geofisiche, l'ammasso a tergo del rivestimento, definendo lo stato di sollecitazione che si riversa sul rivestimento.

Si riportano in *Tabella 3.2.1.2* gli obiettivi della campagna di indagini in riferimento alla classificazione dei difetti desunta dal metodo IQOA.

Capitolo 3 – Possibili cause e interventi correlati ai difetti analizzati

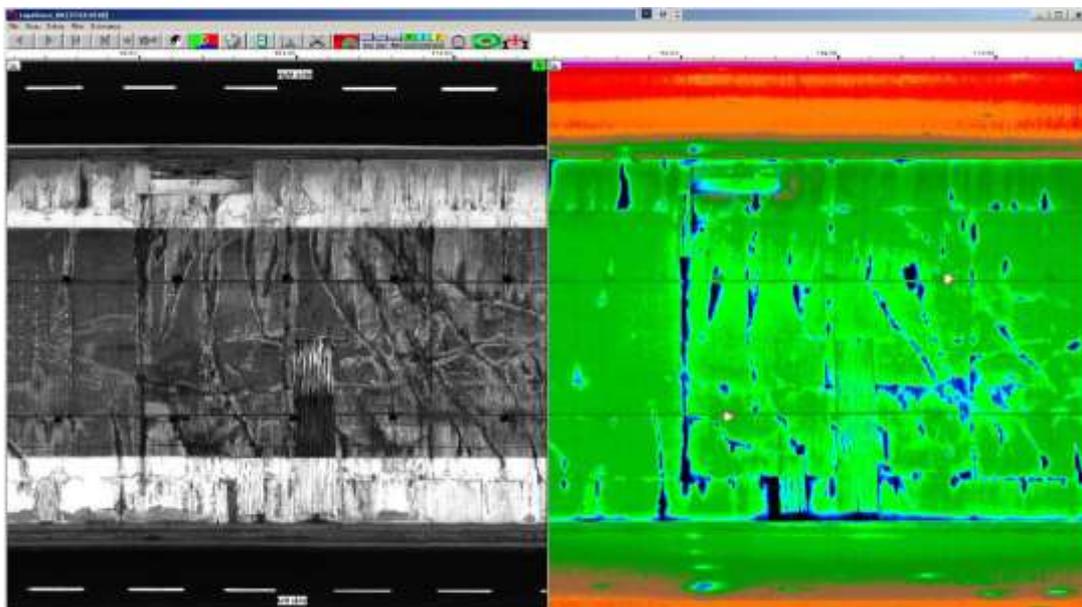
Tabella 3.2.1.2 Obiettivi della campagna di indagini in riferimento alla classificazione dei difetti [4]

Codice IQOA	Descrizione difetto secondo classificazione IQOA	Obiettivi legati allo stato di consistenza dell'opera e del suo contesto							
		2.a) Analisi del quadro fessurativo	2.b) Presenza di vene d'acqua e zone di umidità	2.c) Presenza di possibili vuoti a tergo del rivestimento	2.d) Presenza di discontinuità/lesioni all'interno dello spessore di rivestimento	2.e) Presenza di degrado/dissomiglianze all'interno dello spessore di rivestimento	2.f) Analisi dello strato corticale del rivestimento	2.g) Analisi del quadro deformativo	6) Stato di consistenza del rivestimento coperto da reti di protezione
<b>HY</b>	<b>Interazione con l'acqua</b>								
HY-1	Infiltrazioni d'acqua								
HY-2	Concrezioni		X						
HY-3	Effetti del gelo							X	
HY-4	Efflorescenze su malta o calcestruzzo								
<b>ZI</b>	<b>Deterioramenti dovuti al terreno circostante</b>								
ZI-1	Carsi e cavità								
ZI-2	Deterioramento dei portali			X					
ZI-3	Instabilità dei pendii								X
<b>NR</b>	<b>Deterioramenti nelle sezioni non rivestite</b>	Casistica non presente nelle gallerie autostradali in esame							
NR-1	Distacco di blocchi da roccia alterata								
NR-2	Distacco di porzioni da roccia stratificata								
<b>RM</b>	<b>Deterioramento dei materiali di rivestimento - Rivestimenti in muratura o pietra</b>								
RM-1	Deterioramento superficiale a nido d'ape								
RM-2	Desquamazione				X	X	X		
RM-3	Esfoliazione								
RM-4	Distaccamenti dovuti a carichi di compressione								
RM-5	Deterioramento dei letti di malta								
<b>RB</b>	<b>Deterioramento dei materiali di rivestimento - Rivestimenti in calcestruzzo</b>								
RB-1	Scheggiatura								
RB-2	Rigonfiamenti				X	X	X		
RB-3	Lesioni e distacchi dovuti a carichi di compressione								
RB-4	Lesioni e distacchi dovuti a corrosione delle armature								
RB-5	Deterioramento dello shotcrete								
<b>ED</b>	<b>Deterioramento dei sistemi di impermeabilizzazione, drenaggio e raccolta acque superficiali</b>								
ED-1	Deterioramento del drenaggio d'intradosso								
ED-2	Deterioramento delle canalette di raccolta in calotta								
ED-3	Deterioramento delle canalette di raccolta in carreggiata								
ED-4	Deterioramento delle membrane impermeabilizzanti	X					X		X
ED-5	Deterioramento delle onduline								
ED-6	Rigonfiamento delle membrane impermeabilizzanti								
ED-7	Deterioramento dei rivestimenti in malta								
ED-8	Deterioramento dei pannelli isolanti impermeabili								
ED-9	Deterioramento dei cordoli idroespandibili								
<b>FI</b>	<b>Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria - Fessure</b>								
FI-1	Fessure orizzontali								
FI-2	Fessure diagonali	X							X
FI-3	Fessure verticali								
FI-4	Fessure da ritiro								
FI-5	Fessure curvilinee (mezzaluna)								
<b>DF</b>	<b>Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria - Deformazioni</b>								
DF-1	Abbassamento in chiave – Innalzamento in chiave – Deformazione asimmetrica							X	
DF-2	Imbozzamento localizzato								
DF-3	Disassamento dei conci murari								
DF-4	Deterioramento dell'arco rovescio								
DF-5	Rottura dell'arco								
<b>MO</b>	<b>Difetti degli elementi strutturali e della geometria della galleria - Difetti legati alla realizzazione dell'opera</b>								
MO-1	Fondi di fori di scoppio instabili								
MO-2	Vuoti superficiali nel rivestimento				X	X	X		
MO-3	Vespai								
MO-4	Deterioramento dei giunti in calcestruzzo								
MO-5	Difetti superficiali nel calcestruzzo								
<b>EQ</b>	<b>Altri deterioramenti</b>								
EQ-1	Difetti della carreggiata stradale							X	
EQ-2	Deterioramento di lastre e tamponature								
<b>IN</b>	<b>Deterioramenti associati al fuoco</b>	Da valutare in funzione della natura del difetto riscontrato							
IN-1	Deterioramenti dovuti al fuoco								
<b>EN</b>	<b>Deterioramenti causati da scarsa manutenzione</b>	Da valutare in funzione della natura del difetto riscontrato							
EN-1	Scarsa manutenzione								

### 3.2.2. Indagini in galleria

Le principali metodologie di indagini che possono consentire di raggiungere un adeguato livello di conoscenza ai fini delle verifiche strutturali previste in *NTC2018 - Capitolo 8*, che allo stesso tempo rappresentano delle tecniche di monitoraggio per lo stato delle gallerie in esercizio, sono elencate di seguito:

- *Laser scanner abbinato alla termografia*: metodologia di indagine non distruttiva in cui al rilievo di precisione della geometria della galleria e al rilievo del quadro fessurativo superficiale, possibili attraverso l'utilizzo del laser scanner, si associano delle immagini termografiche che permettono di rilevare le cause che hanno potuto generare tali fessure, come diffuse infiltrazioni d'acqua visibili in colore blu (*Figura 3.2.2.1*).



*Figura 3.2.2.1 Restituzione del laser termografico che associa al prospetto del quadro fessurativo anche la mappatura termica che individua in blu le infiltrazioni d'acqua che lo hanno generato [4]*

La velocità di acquisizione, la rapidità nella fase di elaborazione ed utilizzazione dei dati geometrici testimoniano inoltre la flessibilità di questa tecnica di rilievo, diretta alla modellazione tridimensionale delle infrastrutture.

- *Georadar*: metodologia geofisica non distruttiva di screening che si basa sulla propagazione di onde elettromagnetiche ad elevata frequenza, utile per definire la mappatura degli spessori del rivestimento di galleria, per individuare la presenza e la posizione di centine, di armature in intradosso, per verificare la presenza e la posizione di possibili vuoti a tergo del rivestimento, la presenza di discontinuità/lesioni all'interno dello spessore del rivestimento, la presenza di situazioni di degrado all'interno dello spessore del rivestimento (*Figura 3.2.2.2*).

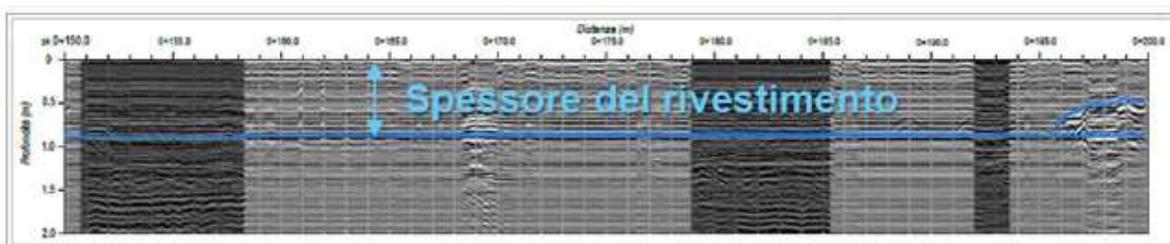


Figura 3.2.2.2 Esempio di restituzione del rilievo georadar con indicazione dell'effettivo spessore di rivestimento [4]

- **Videoendoscopia:** metodologia che permette di verificare direttamente le anomalie individuate dalle indagini georadar, in particolare nel caso di presenza di possibili vuoti. È possibile constatare la presenza della cavità e valutarne l'effettiva profondità ed estensione, nonché visionare lo stato delle pareti, la consistenza dei materiali; anche nel caso di lesioni e/o discontinuità, la videoendoscopia si rivela molto utile perché consente di esaminare le superfici distaccate e di quantificare l'entità e la propagazione delle lesioni.
- **Carotaggi e prove di laboratorio:** metodologia che permette di caratterizzare dal punto di vista meccanico il calcestruzzo costituente il rivestimento; viene previsto il prelievo di un significativo numero di campioni, da sottoporre successivamente a prove di laboratorio per la determinazione della resistenza a compressione.
- **Prove di pull-out:** tecnica di indagine non distruttiva in cui la misura della resistenza avviene interpolando i dati misurati con curve di correlazione predefinite, che però è buona regola tarare con riferimento ad alcuni campioni prelevati in sito. Al fine di avere un'indicazione sull'adeguatezza della resistenza del calcestruzzo superficiale dove risultano immorsati i tasselli di aggancio delle reti, si esegue una caratterizzazione meccanica della porzione corticale del calcestruzzo costituente il rivestimento (Figura 3.2.2.3).

A12_GALLERIA MADONNA DELLA NEVE SINISTRA - PROVE PULL OUT					
Rck [MPa] = (0,743*P[bar] + 235,84)/10					
ZONA	PK	ID PROVA	P <sub>estrazione</sub> [bar]	Rck [MPa]	MED
1	0+083	1	129	33.2	35.9
	0.087	2	194	38.0	
	0.+092	3	176	36.7	
2	0+103	4	166	35.9	35.2
	0+111	5	200	38.4	
	0+117	6	103	31.2	

Figura 3.2.2.3 Esempio di restituzione delle prove di pull-out eseguite in corrispondenza di due diverse zone coperte da reti di protezione all'interno di una stessa galleria [4]

- *Prove con martinetto piatto semplice*: tale metodologia consiste nell’ eseguire un taglio in un elemento strutturale per poi applicare sulle superfici del taglio una pressione nota che porti al ripristino delle condizioni iniziali. Dal momento che le condizioni al contorno di una galleria risultano notevolmente mutate rispetto a quelle originarie a causa della presenza di acqua, umidità, zone disgregate o per la presenza di vuoti e cavità, è importante poter quantificare l’impegno statico attualmente richiesto al rivestimento e controllare la sua evoluzione nel tempo. A tale scopo, attraverso prove con martinetti piatti, caratterizzati da modesta invasività e immediata restituzione, si è in grado di restituire lo stato tensionale agente (*Figura 3.2.2.4*).

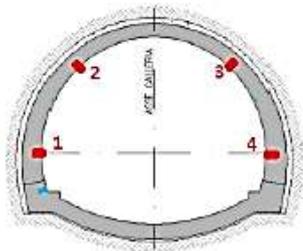
PROVE DI STATO TENSIONALE SUPERFICIALE MARTINETTO PIATTO SEMPLICE				
CARATTERISTICHE DEL MARTINETTO PIATTO IMPIEGATO			POSIZIONE	
Tipo	SEMIOVALE			
Area (cm <sup>2</sup> )	778.57			
Dimensioni(mm)	349*259*4.5			
Coeff. di taratura (-)	0.86			
DATI IDENTIFICATIVI DELL'AREA DI PROVA				
Lungh. basi primarie	mm	250		
Superficie del taglio [At]	cm <sup>2</sup>	900		
Coefficiente di forma [Ka]	0,86 - 0,9			
Coeff. di correzione di pressione [Kp]	0.87			
				
Galleria	Sezione	Paramento	Posizione	P ripristino (Mpa)
Campurione 20 m da imbocco galleria	1	destro	3	scarico
		destro	4	scarico
		sinistro	1	scarico
		sinistro	2	scarico
Campurione 65 m da imbocco galleria	2	destro	4	scarico
		destro	3	scarico
		sinistro	1	0.7
		sinistro	2	scarico
Campurione 20 m a fine galleria	3	destro	4	2.5
		destro	3	scarico
		sinistro	1	scarico
		sinistro	2	scarico

Figura 3.2.2.4 Esempio di restituzione di una prova con martinetto piatto condotta in corrispondenza di 4 sezioni della calotta a tre progressive di una stessa galleria [4]

- *Tomografia sismica*: tale metodologia viene prevista qualora sia necessario eseguire indagini sull’ammasso a tergo del rivestimento o sull’ammasso costituente il setto tra i due forni che ospitano le due carreggiate autostradali, ovvero in aree non accessibili. Per mezzo di impulsi di energia che attraversano l’area oggetto di indagine, è possibile ricostruire un profilo sismostratigrafico del sottosuolo, ma tale tecnica può servire anche all’individuazione delle proprietà fisiche dei mezzi indagati, alla ricostruzione di faglie, superfici di scivolamento, alla determinazione della profondità del substrato roccioso e alla stima del suo grado di fratturazione (*Figura 3.2.2.5*) [4].

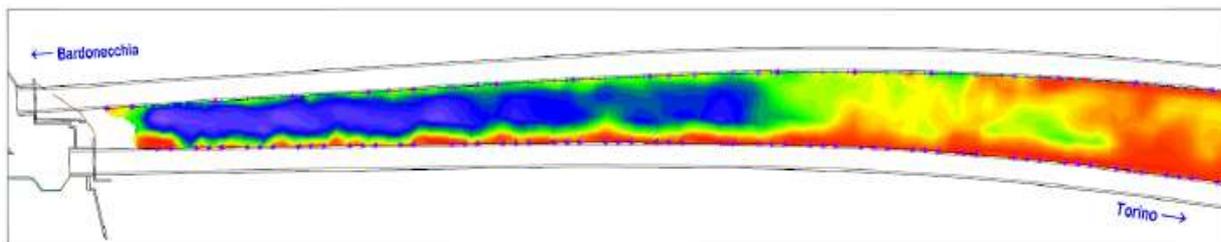


Figura 3.2.2.5 Esempio di restituzione di un modello tomografico. La scala di colore rappresenta da blu a rosso l'incremento dei valori di velocità sismica. L'incremento di tale parametro corrisponde ad un incremento delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso indagato [4]

### 3.3. Interventi di ripristino e impermeabilizzazione in galleria

I rivestimenti delle gallerie della rete viaria italiana realizzati in calcestruzzo presentano spesso situazioni di degrado variabili e generalmente diffuse. Tali problematiche si manifestano con particolare frequenza nelle gallerie di non recente epoca di realizzazione, caratterizzate da gravi e complessi problemi di conservazione. Il calcestruzzo del rivestimento può infatti essere interessato da un processo di ammaloramento più o meno diffuso, con presenza di fessure, lesioni, o distacchi accentuati dalla eventuale presenza di infiltrazioni di acqua. Un intervento di manutenzione straordinaria abbastanza diffuso consiste nel ripristino del rivestimento in calcestruzzo e/o nell'impermeabilizzazione della galleria. In particolare, nella *UNI EN 1504 Parte 5* [21] vengono specificati i requisiti e i criteri di conformità per l'identificazione, le prestazioni (inclusi gli aspetti di durabilità) e la sicurezza dei prodotti per iniezione, per la riparazione e per la protezione delle strutture in calcestruzzo. Lo schema normativo *UNI EN 1504* viene riportato nella *Tabella 4.1*.

Tabella 3.3.1 Schema normativo UNI EN 1504 [16]

	Parte	Oggetto
1	UNI EN 1504-1:2005	Definizioni
2	UNI EN 1504-2:2005	Sistemi di protezione della superficie di calcestruzzo
3	UNI EN 1504-3:2006	Riparazione strutturale e non strutturale
4	UNI EN 1504-4:2005	Incollaggio strutturale
5	UNI EN 1504-5:2005	Iniezione del calcestruzzo
6	UNI EN 1504-6:2007	Ancoraggio dell'armatura di acciaio
7	UNI EN 1504-7:2007	Protezione contro la corrosione delle armature
8	UNI EN 1504-8:2005	Controllo di qualità e valutazione delle conformità
9	UNI EN 1504-9:2008	Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi
10	UNI EN 1504-10:2005	Applicazioni in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori

Il rilievo e la rappresentazione grafica delle fessure costituiscono un utile strumento per la valutazione delle cause del fenomeno di ammaloramento e per la scelta della migliore tecnica di intervento. Nel caso di aperture di fessura inferiori a 0.2 mm non sono richiesti interventi di ripristino del rivestimento, a meno che non vi siano speciali richieste in termini di durabilità. Le possibili tecniche di intervento di ripristino del rivestimento possono essere suddivise in classi di intervento, in funzione della tipologia delle fessure, della misura delle loro ampiezze e movimenti nel tempo e della condizione del supporto. Una prima differenziazione del quadro di danno è svolta considerando lo stato di umidità della fessura, suddividendo in fessure con assenza o presenza di acqua [16].

Si elencano e si descrivono brevemente di seguito i principali interventi adottati per il ripristino del rivestimento e per l'impermeabilizzazione della galleria:

- *Membrane in PVC*: in presenza di acqua generalmente si fa ricorso ad un sistema di drenaggio ed impermeabilizzazione, posizionato fra la parete di scavo in roccia ed il rivestimento in conglomerato cementizio della galleria, costituito da una membrana in PVC.
- *Sigillatura con malte cementizie o inserimento di reti inox o reti in carbonio*: in presenza di fessure locali, per aumentare la durabilità ed assicurare la protezione del calcestruzzo dalla penetrazione di acqua e di agenti aggressivi presenti nell'atmosfera, si può effettuare un trattamento superficiale di sigillatura con malte cementizie polimero rinforzate o, in alternativa, dopo aver scavato la parte interessata dalla fessura, si possono inserire reti inox o reti in carbonio e ripristinare il rivestimento.
- *Consolidamento al contorno*: in presenza di cavità sul contorno della galleria o di terreni di proprietà meccaniche scadenti, è possibile ricorrere a interventi di consolidamento sul contorno della galleria tramite iniezioni. In particolare, si possono distinguere iniezioni di permeazione, iniezioni di compattazione, iniezioni per microfessurazione, iniezioni in rocce fessurate, trattamento di miscelazione in sito (jet-grouting).
- *Bullonatura / Ancoraggi a trefoli*: in presenza di convergenze importanti e forze/carichi agenti sul contorno della galleria, è possibile prevedere degli interventi di bullonatura o di ancoraggi a trefoli che permettono di stabilizzare la massa rocciosa scavata trasferendo il carico da una superficie instabile o dall'esterno della roccia, alla parte interna più solida della roccia.
- *Blindaggio*: in presenza di fessurazione diffusa, una tecnica da poter adottare è rappresentata dal blindaggio, che consiste nell'installazione di un sistema in acciaio nella parte interna dello scavo, lungo tutta la sua profondità. Il blindaggio dello scavo, avente larghezza variabile, è effettuato con puntellazioni regolabili in modo continuo o in modo incrementale e la realizzazione della protezione lungo il tracciato dello scavo è attuata collegando in orizzontale uno o più moduli dei sistemi di blindaggio.
- *Alesaggio + Sostituzione rivestimento*: in presenza di fessurazione diffusa, un'altra tecnica da poter adottare è rappresentata dall'alesaggio, che consiste nell'allargamento della galleria attraverso lo scavo della parte più interna ammalorata e nella sua sostituzione con un nuovo rivestimento, dunque conducendo un nuovo getto in cemento armato.

Dopo un qualsiasi intervento di ripristino e/o impermeabilizzazione è necessario prevedere un sistema di monitoraggio (*Capitolo 3.2.2*), se questo non è già presente, atto a indagare sullo stato della galleria e sulle prestazioni dell'intervento realizzato.

## 4. Analisi numeriche

Nell'ambito della presente tesi, si è proceduto ad affrontare lo studio della genesi delle fratture nel rivestimento delle gallerie, mediante analisi numeriche di tipo parametrico. In particolare, verranno condotte analisi numeriche agli elementi finiti bidimensionali (2D) tramite l'utilizzo del software *RS2*, prodotto da *Rocscience*, e successivamente analisi numeriche agli elementi finiti tridimensionali (3D) tramite l'utilizzo del software *RS3*, anch'esso prodotto da *Rocscience*. Per tale tipo di studio è necessario considerare anche lo sviluppo longitudinale della galleria, dunque la "terza dimensione", per cui l'analisi 2D servirà più che altro per validare i risultati delle analisi 3D.

Al fine di condurre le analisi parametriche in modo realistico, si è deciso di prendere come riferimento una galleria esistente, situata nel nord Italia, i cui lavori di adeguamento sono stati commissionati alla Società di Ingegneria *AK Ingegneria Geotecnica Srl*. Tale scelta permette di lavorare con stati di sollecitazione realistici, geometria dell'opera e caratteristiche del rivestimento noti; inoltre, si conosce lo stato attuale di tale galleria e la localizzazione delle fessure più rilevanti presenti. A partire da questo caso reale, si conduce un'analisi parametrica tridimensionale variando le condizioni di carico e di stato tensionale sul contorno della galleria, al fine di individuare le zone maggiormente sollecitate per ogni configurazione analizzata e, di conseguenza, le condizioni più critiche che a lungo termine possono portare a un degrado significativo del rivestimento definitivo. Prima di passare alle analisi 2D e 3D si sottolinea che la galleria in esame è una galleria superficiale, avente una copertura di 60 m in corrispondenza del suo baricentro e che il rivestimento viene assunto elastico nella modellazione. A seguire si riportano le caratteristiche geotecniche del terreno circostante la galleria e le informazioni sulla sezione tipo considerata, con i dettagli relativi al suo rivestimento.

### Condizioni geologiche e geotecniche

Il tratto di galleria in oggetto è caratterizzato da una elevata complessità geologica e geotecnica determinata dal contatto tra la formazione dei *Calcescisti con Pietre Verdi* con quella delle *Dolomie dello Chaberton*. Oltre alle ben note carnirole, la galleria ha attraversato una serie caotica a prevalente componente argillosa, fortemente eterogenea sia per litologia sia per geometria dei corpi che la compongono. In particolare, nel tratto di galleria che mostra la presenza di fessure nel rivestimento definitivo, sono stati condotti due rilievi del fronte: nel secondo rilievo il fronte si presenta omogeneo, con la presenza dei calcescisti costituiti da scisti carbonatici grigio-nerastri afferenti all'Unità del Lago Nero; il primo rilievo presenta invece una successione (a partire dalla calotta) di:

- detrito a litologia eterogenea che interessa una zona limitata della calotta;
- carnirole alterate;
- argille limose.

### Sezione tipo di scavo

Lo scavo della tratta è caratterizzato dalla presenza di:

- consolidamento del fronte mediante 41 elementi strutturali in VTR di lunghezza 13m;
- presostegno della calotta mediante 45 tubi metallici  $\phi 139.6\text{mm}$  spessore 10mm di lunghezza 13m;
- scavo di avanzamento per sfondi massimi di 1m eseguito dapprima in sezione di calotta e poi completato con lo scavo di ribasso. La lunghezza del campo di scavo è pari a 10m.
- sostegno di prima fase costituito da centine metalliche 2IPN200 passo 1m e calcestruzzo proiettato di spessore 25cm fibrorinforzato.
- 3+3 ancoraggi radiali autoperforanti, ad iniezione dinamica con barre cave a filettatura continua, di tipo MAI R32N: diametro 32mm, maglia 1.5mx1.0m di lunghezza 6m, ancorati alle centine.
- Rivestimento definitivo in calcestruzzo armato di calotta di spessore variabile da un minimo di 50cm ad un massimo di 120cm; in arco rovescio il rivestimento è sempre armato con spessore di 90cm. L'armatura flettente di calotta è realizzata mediante tralicci costituiti da n.3 barre in acciaio  $\phi 24\text{mm}$  di cui n.2 in intradosso; il passo tra i tralicci è di 80cm. I ripartitori sono costituiti da barre in acciaio  $\phi 10\text{mm}$  a passo 30cm. L'armatura dell'arco rovescio è costituita da 5+5 barre in acciaio  $\phi 18$  oltre agli spilli  $\phi 12/40/20$ .

Durante lo scavo non sono state riscontrate condizioni critiche in questa tratta e non sono state registrate sofferenze sul sostegno di prima fase [20].

#### **4.1. Simulazione della difettologia associata ad una specifica tratta di galleria esistente attraverso un'analisi FEM 2D**

Si procede dapprima alla realizzazione del modello 2D della galleria in esame, prendendo in considerazione le caratteristiche geologiche riscontrate nel secondo rilievo, in cui il fronte si presenta omogeneo. Per la realizzazione del modello numerico bidimensionale bisogna definire:

- *Project Settings*, in cui si settano le unità di misura del sistema internazionale ed il numero di *stage* da considerare durante l'analisi;
- *Boundaries*, che vengono importati in formato *.dxf* da *Autocad*, in cui si considera come *External Boundary* il profilo topografico e come *Material Boundary* la sezione trasversale della galleria. Si sottolinea che le dimensioni del modello sono ottenute discostandosi a destra, a sinistra e in basso di circa 10 D rispetto al centro della galleria, dove D è il diametro equivalente della galleria, mentre in alto si simula la reale copertura della galleria in esame;
- *Mesh*, in cui si setta il tipo di mesh (*Graded*), il tipo di elementi con cui viene realizzata (*3 Nodes Triangles*) e l'infittimento nell'area che interessa e circonda le gallerie. È necessario assicurarsi che il "*Mesh Quality*" sia buono e che non ci siano zone in corrispondenza delle quali si ha un eccessivo infittimento poiché questo aspetto risulta spesso legato ad errori di precisione nella definizione dei nodi o aspetti simili;

- *Field stress*, in cui si considera il tipo “Gravity” dal momento che è necessario considerare la reale copertura al di sopra della galleria nella definizione dello stato di tensione. Nel caso in esame si ipotizza il coefficiente di spinta a riposo  $k_0 = 0.405$ , valore ottenuto per mezzo della formula di Jaky, e si assume, dunque, un regime anisotropo.

$$k_0 = 1 - \text{sen } \varphi \quad (4.1.1)$$

- *Displacement*, in cui impongono le condizioni al contorno. In questo caso si assume superficie libera in corrispondenza della parte superiore del modello (e dunque del pendio), si vincolano con carrelli i due lati verticali del modello, e si vincola con cerniere la base del modello;
- *Material Properties*, in cui si inseriscono le caratteristiche geotecniche della roccia in esame, quelle del calcestruzzo con cui vengono realizzate le gallerie, quelle della strada realizzata nell’ultima fase del modello. In particolare, per i calcescisti, si considerano le caratteristiche meccaniche indicate nella *relazione geotecnica generale* [20] in prossimità della sezione considerata ( $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$ ,  $E = 1100 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.35$ ,  $c = 160 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 36.5^\circ$ ).

Si sottolinea che il modello deve essere più possibile vicino all’origine degli assi (0,0) definito dal software RS2 in modo tale da rendere più veloce la computazione dei risultati una volta avviata l’analisi, in particolare si è posizionato il vertice in basso a sinistra del modello nel punto di coordinate (0,0).

Si riporta nella *Figura 4.1.1* il modello 2D relativo alla sezione di interesse, realizzato definendo gli aspetti appena descritti:

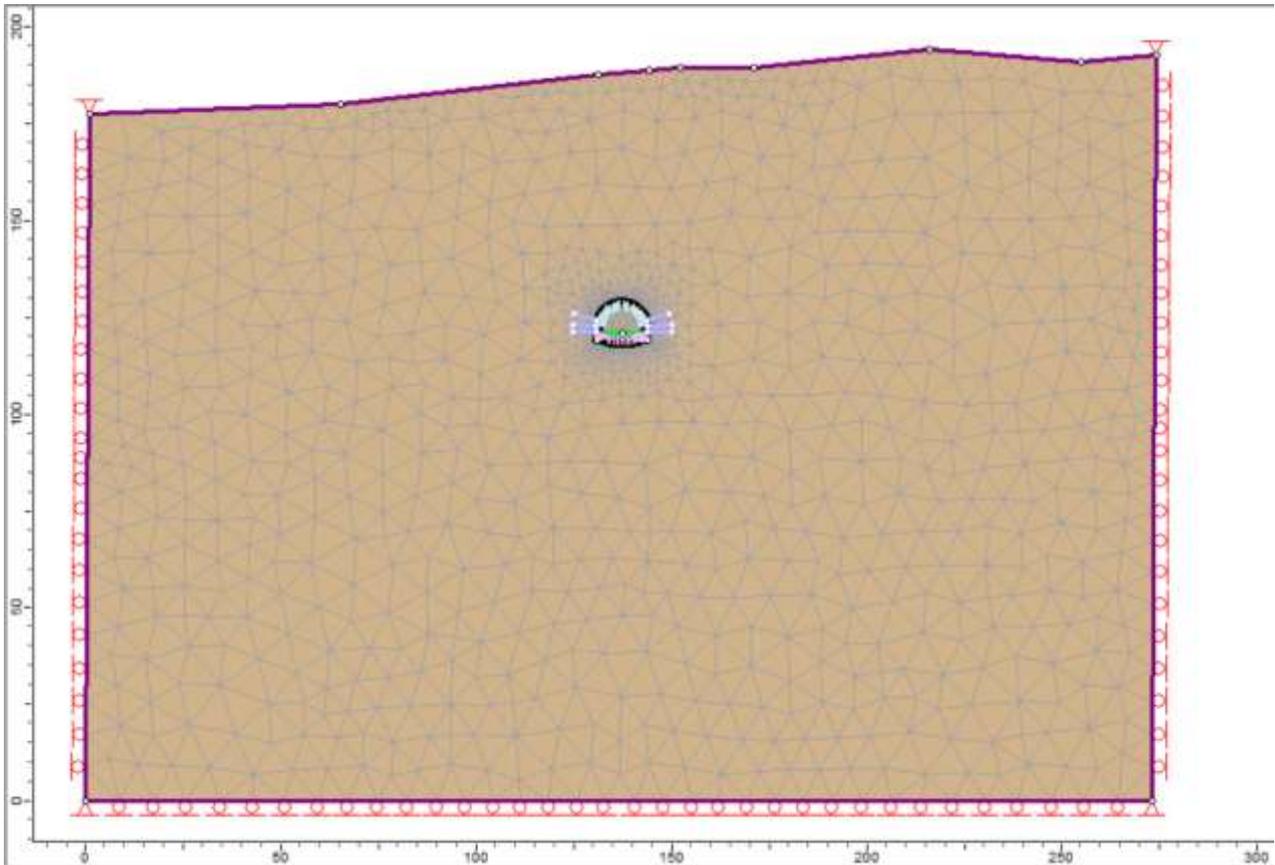


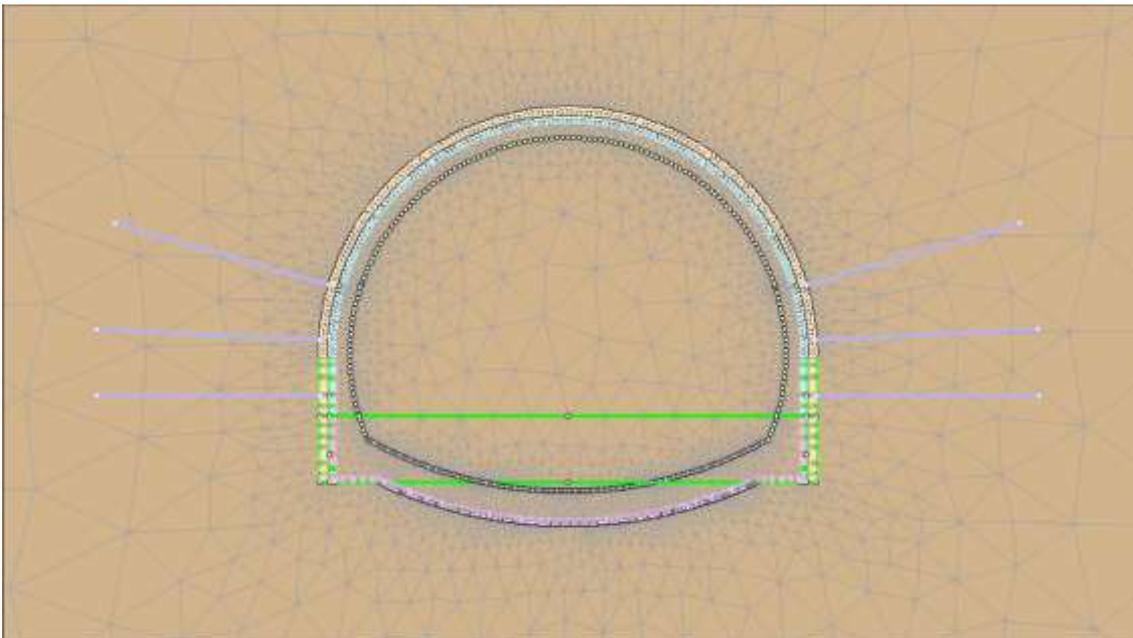
Figura 4.1.1 Modello numerico 2D per la sezione di interesse

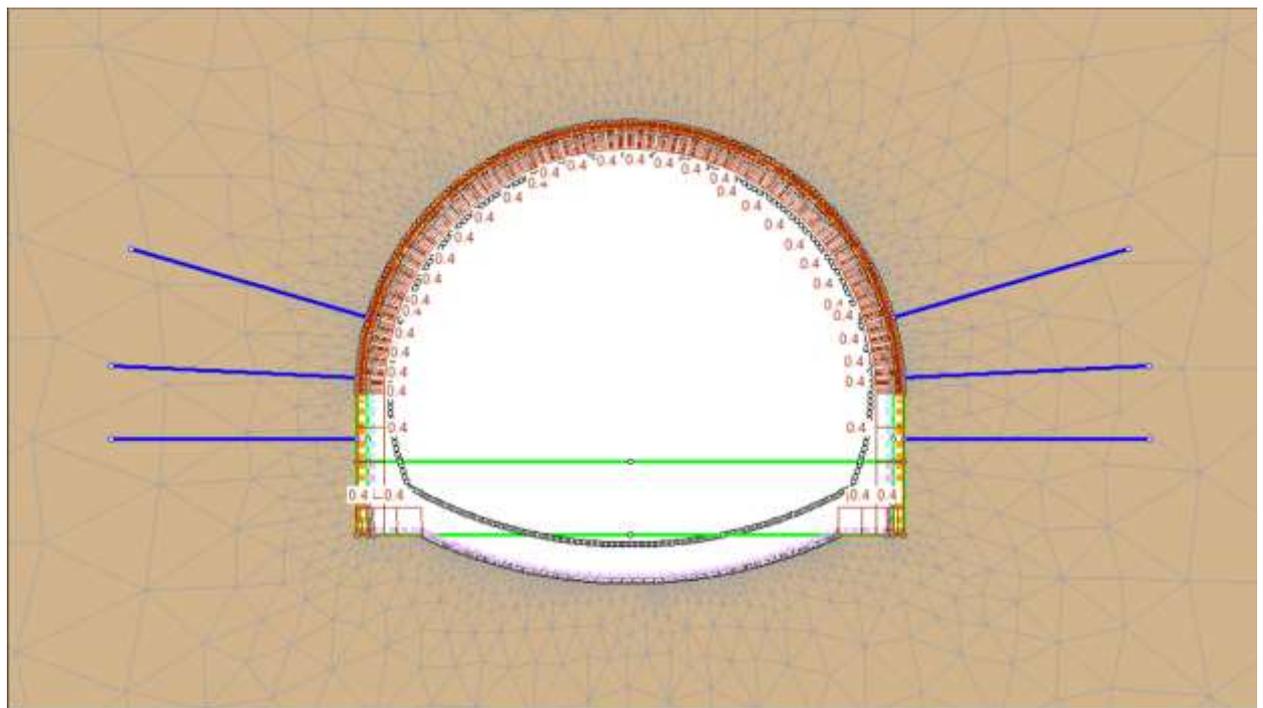
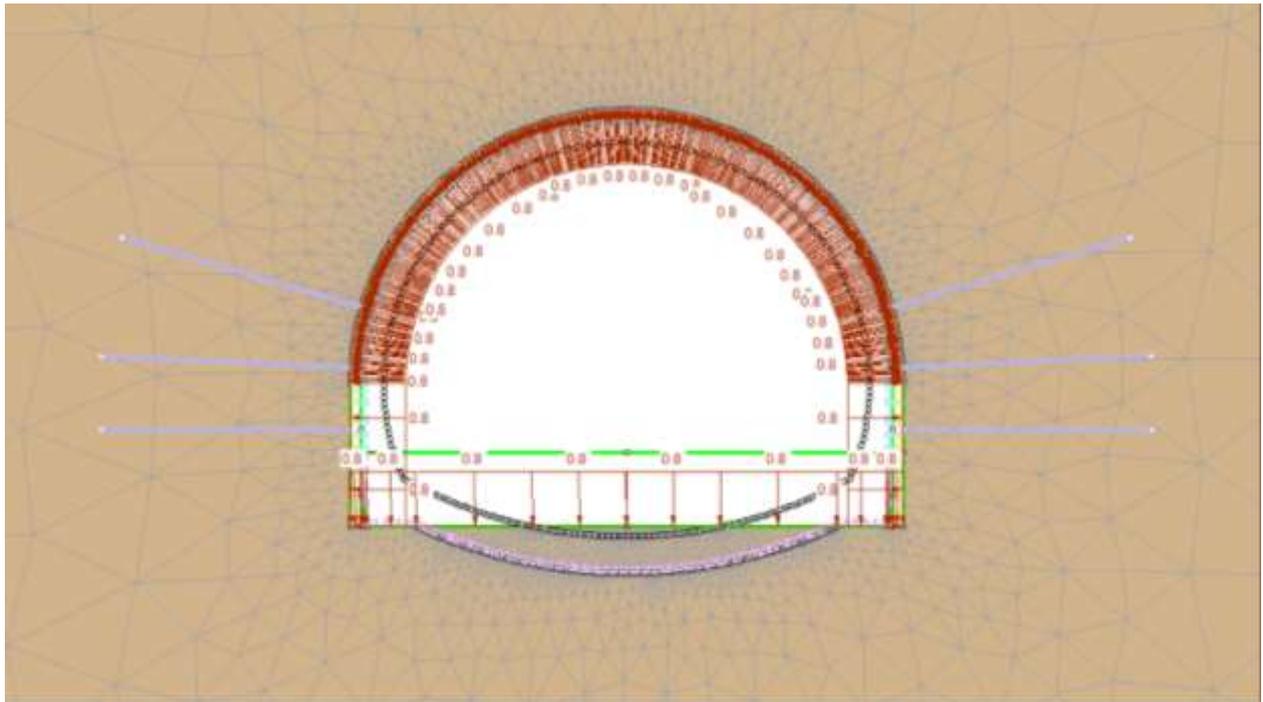
Una volta definito il modello, l'aspetto fondamentale dell'analisi consiste nella definizione degli *stages*, ovvero degli step in cui questa deve essere divisa affinché si possano valutare i risultati in termini di tensioni, spostamenti, deformazioni, tra diverse fasi temporali successive.

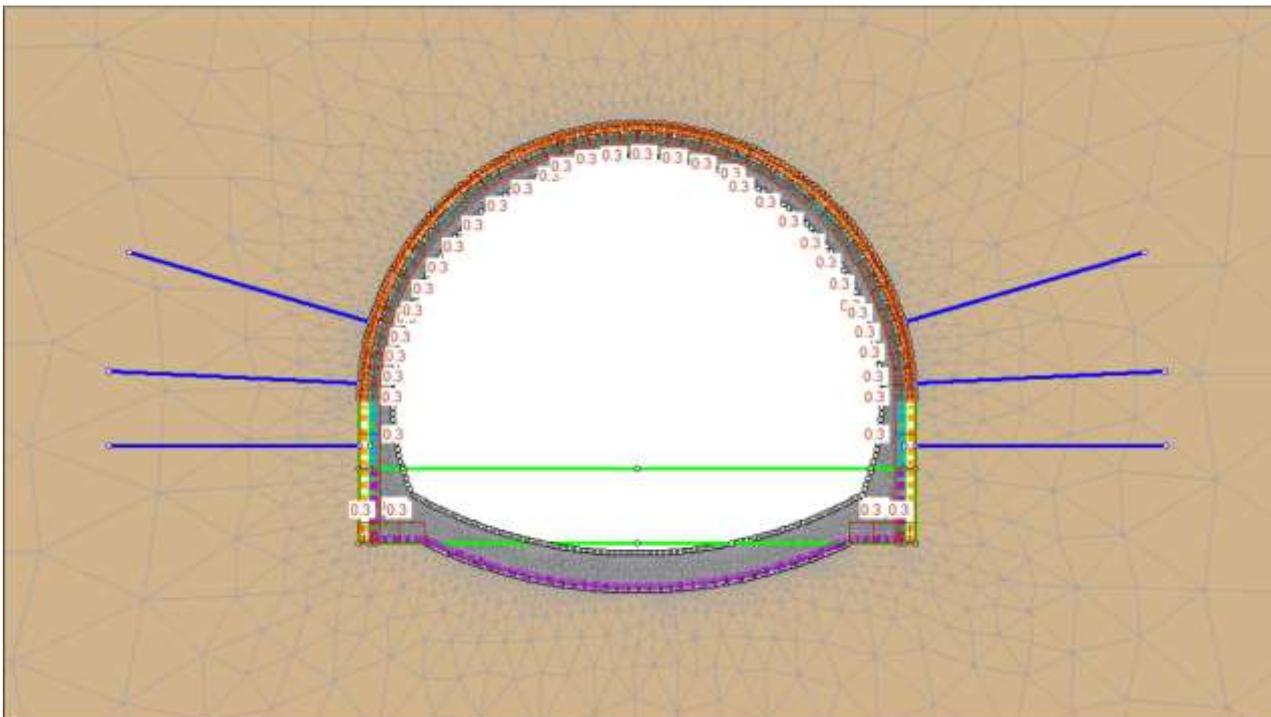
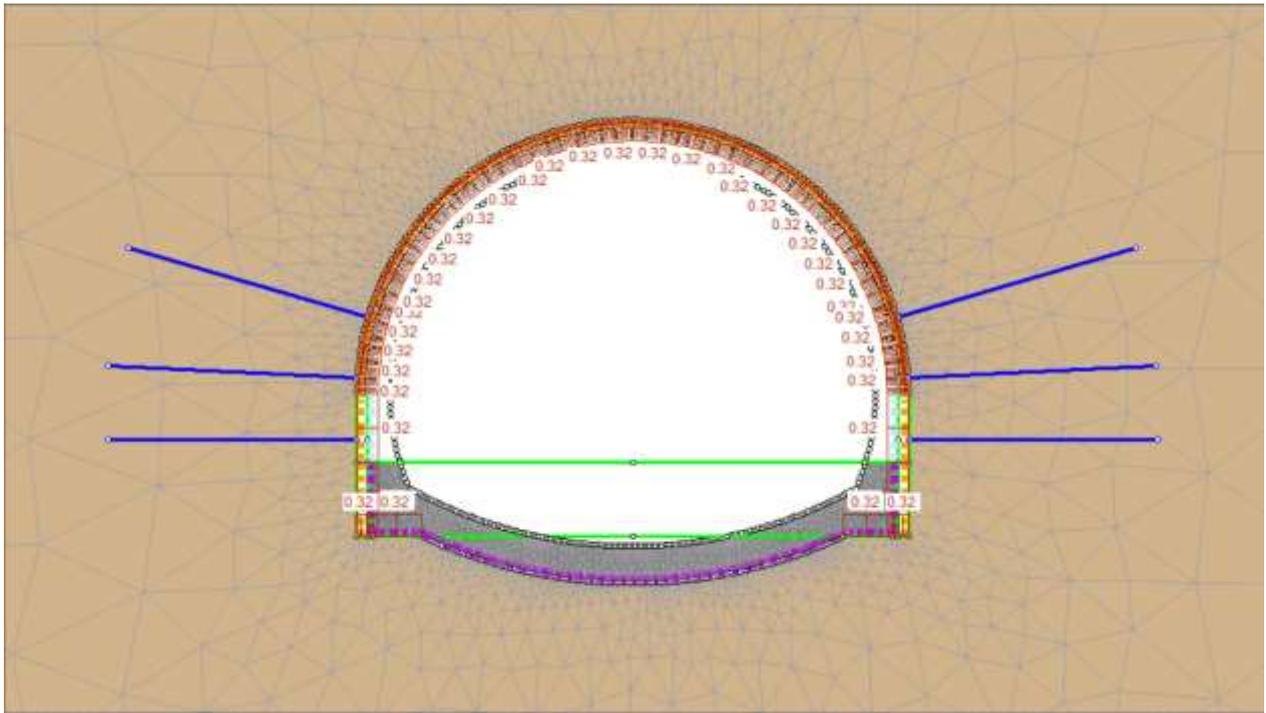
La galleria in esame è una galleria naturale, ovvero completamente realizzata e inglobata in roccia, per cui gli stages seguiti per la realizzazione del modello sono i seguenti:

1. Situazione geostatica in cui lo scavo non è ancora avvenuto;
2. Scavo di calotta e piedritti e introduzione di una pressione interna distribuita su tutto il contorno dello scavo per simulare la pressione che il materiale rimosso esercitava sul contorno;
3. Introduzione di un rivestimento di prima fase ad una percentuale di pressione stabilita da un modello assialsimmetrico, realizzato parallelamente a quello principale, e scavo dell'arco rovescio;
4. Introduzione del rivestimento definitivo ad una percentuale di pressione stabilita dal modello assialsimmetrico, dapprima sull'arco rovescio e successivamente su calotta e piedritti.

Tali stages vengono illustrati nella *Figura 4.1.2*:







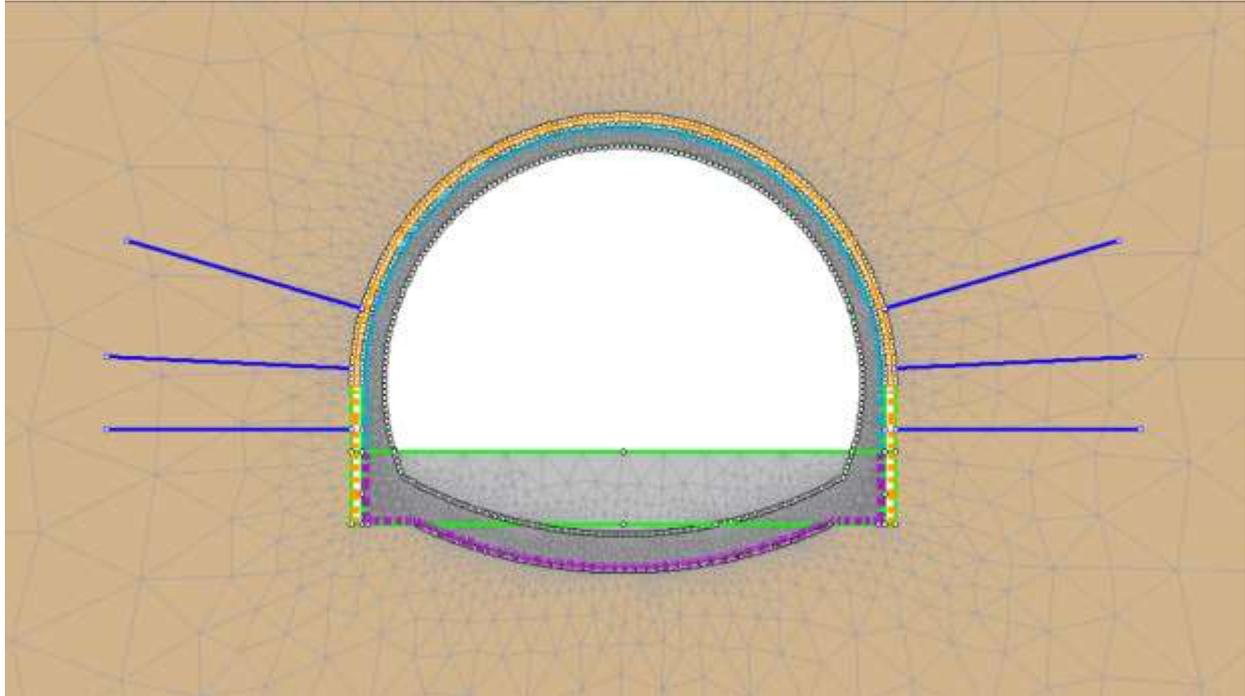


Figura 4.1.2 Stages per la realizzazione del modello

Come accennato precedentemente, le percentuali di rilascio tensionale alle quali introdurre il rivestimento di prima fase e quello definitivo, vengono stabilite attraverso un modello assialsimmetrico, che rappresenta l'estensione longitudinale di metà canna di galleria, simmetrica rispetto ad un asse verticale; si considera dunque il raggio equivalente della canna in esame e la larghezza del piedritto per la sua realizzazione. Si simula l'avanzamento del fronte di scavo, l'introduzione, dopo 0.5m di scavo, del rivestimento di prima fase e l'introduzione dopo 1.5m di scavo del rivestimento definitivo; nella *Figura 4.1.3* si riportano le caratteristiche del "Composite" utilizzato su RS2 per simulare entrambi i rivestimenti e la loro installazione in momenti successivi, mentre nella *Figura 4.1.4* sono riportati gli stages più significativi del modello. Le distanze di installazione variano a seconda della situazione specifica e devono essere ipotizzate sulla base delle informazioni costruttive e di quelle sul contesto geologico/geomeccanico circostante disponibili; si sottolinea che su tutto il modello assialsimmetrico si assume uno stato di tensione costante, pari quello calcolato alla profondità della galleria.

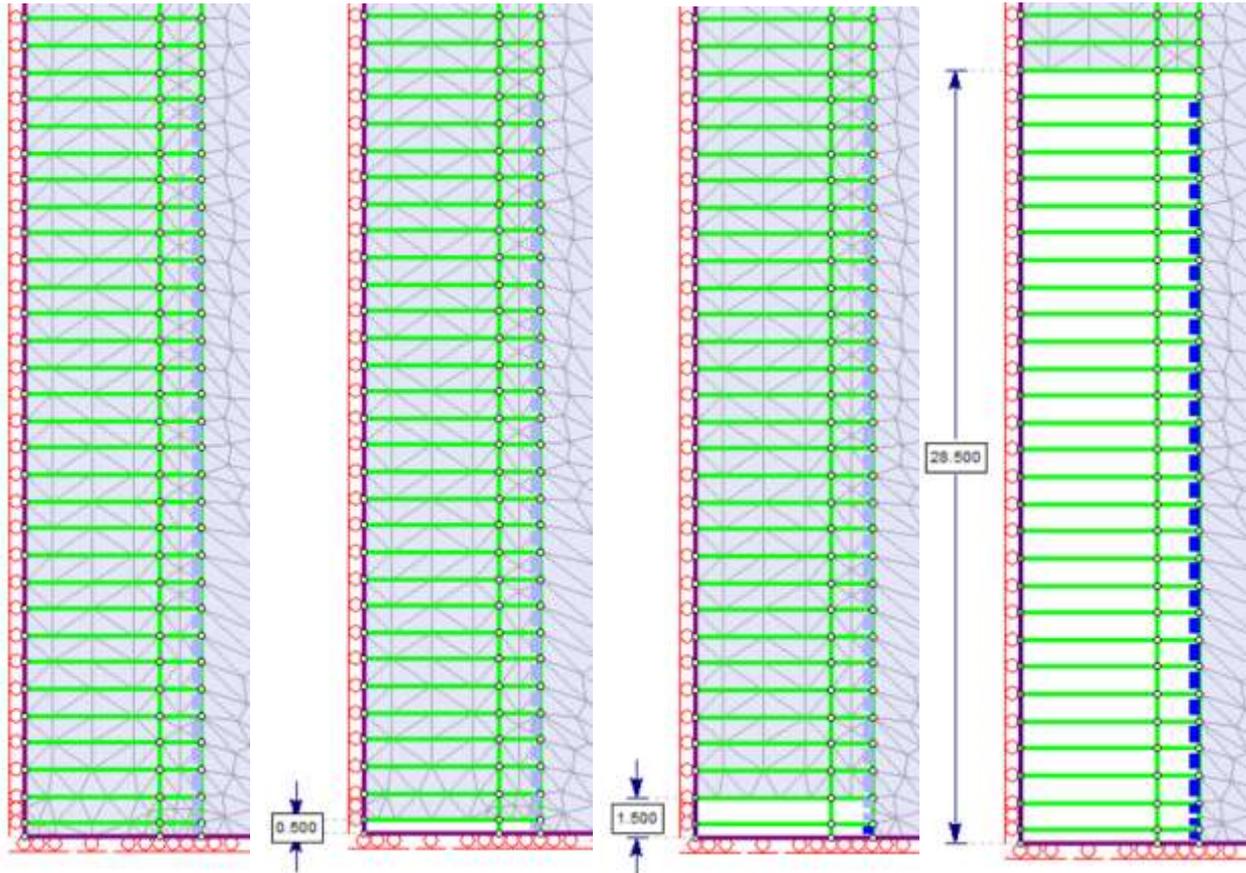
Composite 1

Name:  Color:  Number of Layers:

#	Liner Type	Installed	Removed
1	1 fase	Set in modeler	never
2	Definitivo	1 stage after 1st liner installed	never

Figura 4.1.3 Caratteristiche del "Composite" utilizzato su RS2

Una volta effettuata l'analisi è possibile visualizzare l'andamento degli spostamenti registrati sul contorno della galleria (*Figura 4.1.5*) e attraverso una *query* si realizza un grafico in cui tali spostamenti, presi in valore assoluto, vengono rappresentati in funzione della distanza dal fronte di scavo (*Figura 4.1.6*); si considera l'ultimo stage del modello in cui il fronte di scavo si trova ad una distanza di 28.5m rispetto al contorno del modello (*Figura 4.1.4*), il rivestimento di I fase si trova 0.5m prima di tale distanza (28m) e quello definitivo 1.5m prima (27m). Si sottolinea inoltre che nella *Figura 4.1.6* il fronte si trova in corrispondenza della coordinata  $x=36m$  del modello, dal momento che la *query* è stata realizzata a partire dalla parte di galleria ancora da scavare posta a una distanza di 36m dal fronte di scavo.



*Figura 4.1.4 Stages per la realizzazione del modello assialsimmetrico*

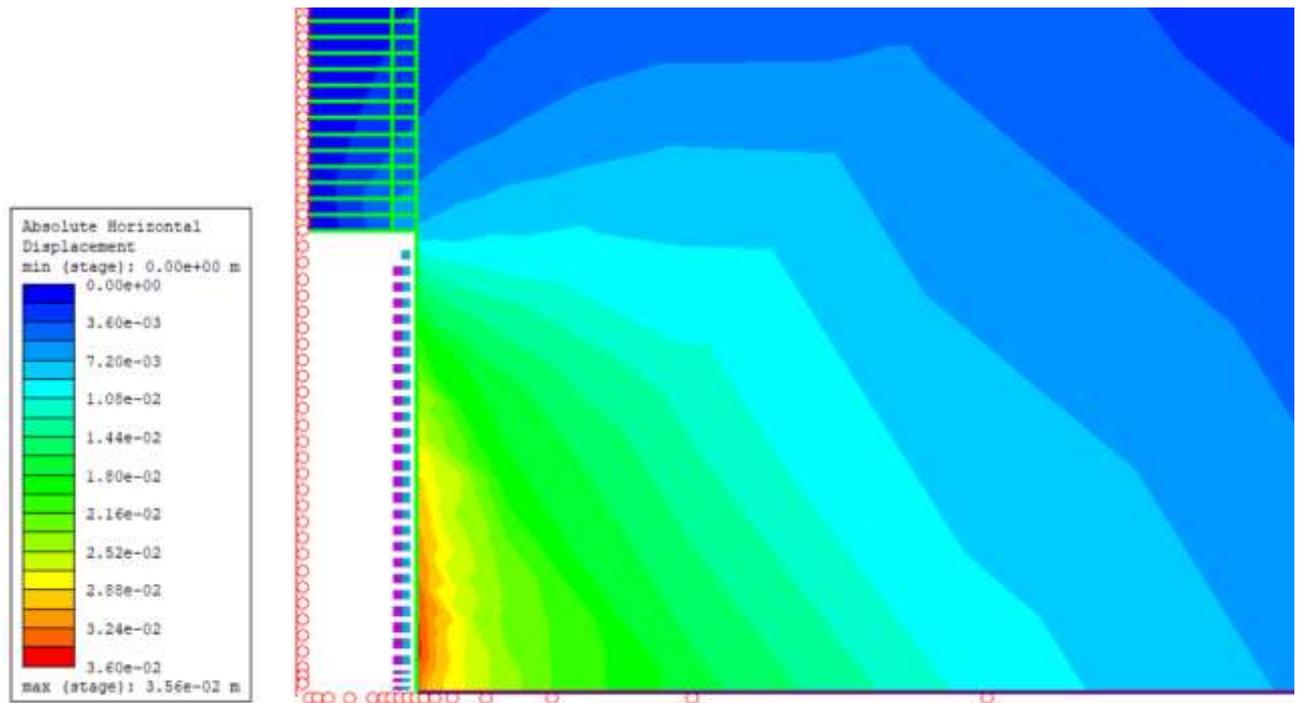


Figura 4.1.5 Andamento degli spostamenti registrati sul contorno dalla galleria

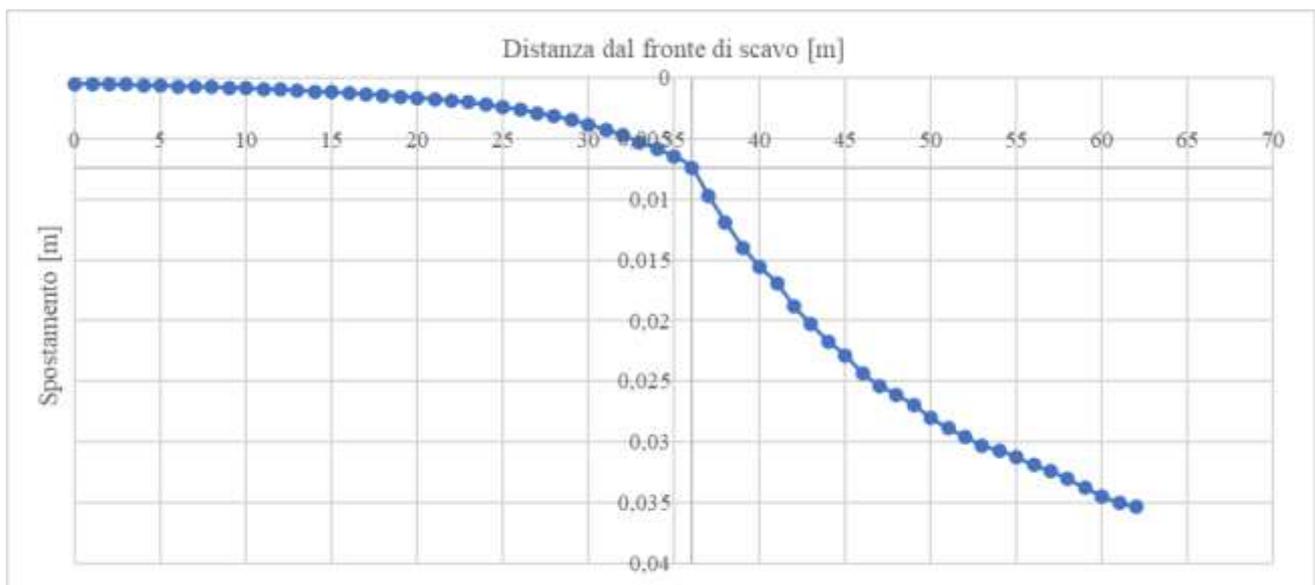


Figura 4.1.6 Grafico distanza dal fronte di scavo - spostamento

Gli spostamenti registrati di interesse risultano quelli in corrispondenza del fronte, del rivestimento di I fase e di quello definitivo (Tabella 4.1.1).

Tabella 4.1.1 Spostamenti registrati di interesse

	Y	Distanza rispetto al fronte [m]	Spostamento [m]
Fronte	28,5	0	7,37E-03
I Fase	28	0,5	9,75E-03
Definitivo	27	1,5	1,19E-02

Per la realizzazione della curva caratteristica della galleria e per definire a quale percentuale di scarico tensionale inserire il rivestimento di I fase e quello definitivo, è necessario realizzare un terzo modello con estensione pari a 10 D rispetto al centro della galleria sui quattro lati, tutto incernierato, in cui si considera la galleria come profonda e la si colloca al centro come una circonferenza avente diametro equivalente a quello ottenuto considerando l'area della sezione trasversale della galleria in esame. Si assume su tutto il modello, così come fatto per quello assialsimmetrico, uno stato di tensione costante, pari a quello calcolato alla profondità della galleria, e si applica una pressione interna alla galleria  $p_i$  che diminuisce in stages successivi con fattore da 1 fino a 0 con passo 0,1. Dai risultati è possibile costruire la curva caratteristica (*Figura 4.1.7*) plottando gli spostamenti sul contorno della galleria in funzione del rapporto  $\lambda = p_i/p_0$  decrescente (*Tabella 4.1.2*).

Tabella 4.1.2 Valori considerati per la costruzione della curva caratteristica della galleria

$\lambda$ [-]	Spostamento [m]
1	0,00E+00
0,9	3,32E-04
0,8	6,64E-04
0,7	9,96E-04
0,6	1,36E-03
0,5	1,82E-03
0,4	2,61E-03
0,3	3,63E-03
0,2	5,11E-03
0,1	7,66E-03
0	1,14E-02

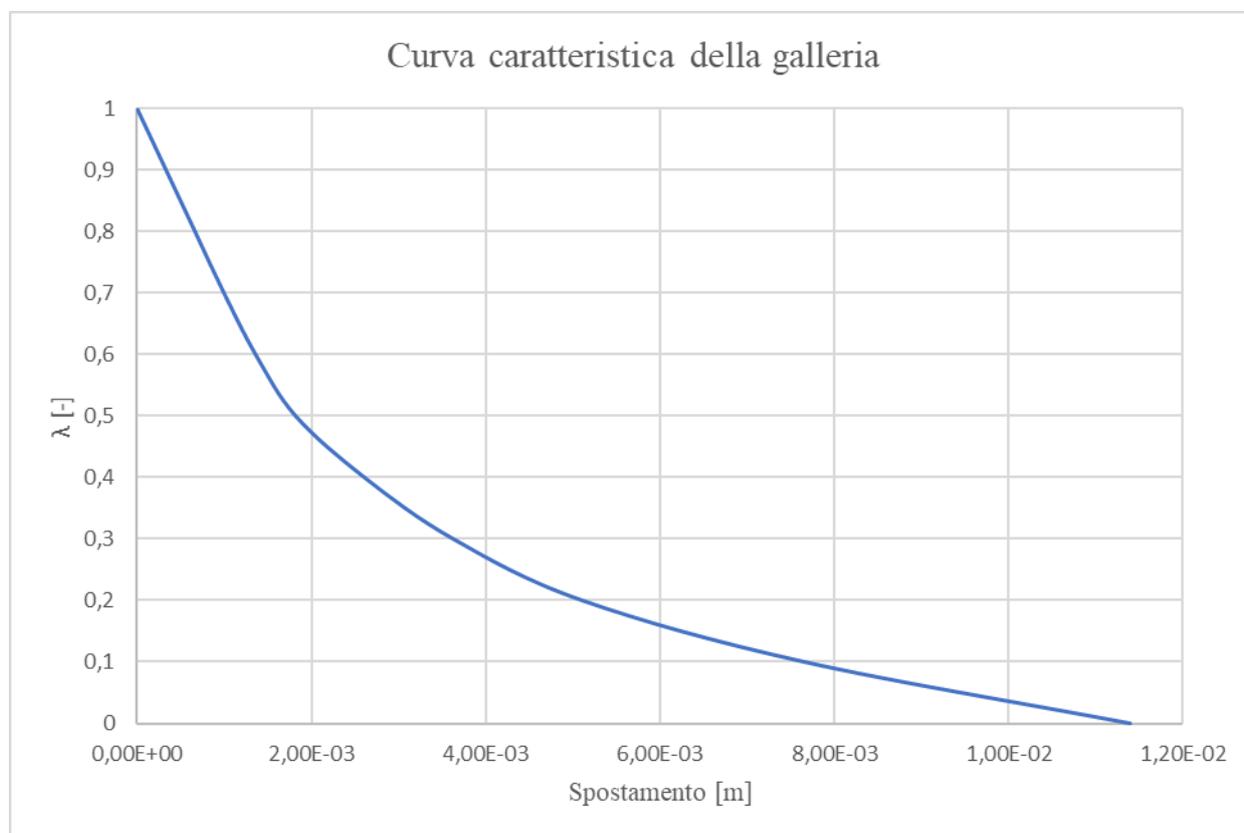
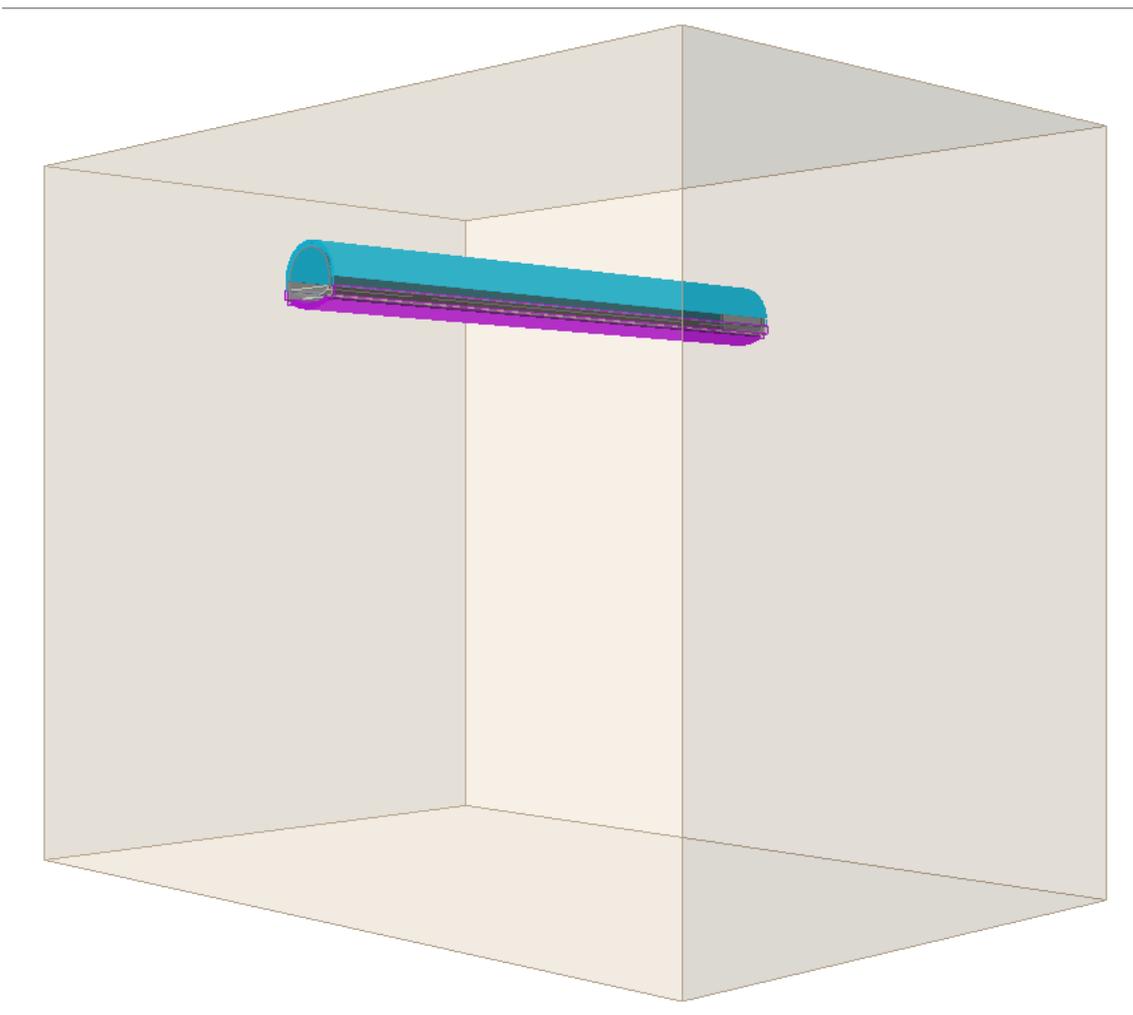


Figura 4.1.7 Curva caratteristica della galleria

Normalizzando rispetto ai valori massimi sia gli spostamenti registrati relativi al rivestimento di I fase e a quello definitivo presenti nella *Tabella 4.1.1*, sia quelli relativi alla costruzione nella curva caratteristica (*Tabella 4.1.2*), si stimano i valori di  $\lambda$  e dunque le percentuali di rilascio tensionale a cui associare l'installazione dei due rivestimenti. Si ottiene una percentuale di rilascio tensione pari al 40% da associare all'installazione del rivestimento di I fase e una pari al 30% da associare all'installazione del rivestimento definitivo. In particolare, per quest'ultimo si considera  $\lambda=0.32$  per l'installazione del rivestimento sull'arco rovescio e  $\lambda=0.30$  per l'installazione su calotta e piedritti, dal momento che questi rivestimenti non vengono installati contemporaneamente ma in fasi successive.

#### 4.2. Modellazione FEM 3D del problema analizzato

Nel passaggio dall'analisi 2D all'analisi 3D, si decide di semplificare alcuni aspetti del modello, vista la maggiore complessità e il maggiore onere computazionale richiesti in seguito all'inclusione della terza dimensione. In particolare, si realizza il modello 3D attraverso l'*estrusione* del modello 2D; si decide di considerare un tratto rappresentativo della galleria di lunghezza pari a 120m (*Figura 4.2.1*).



*Figura 4.2.1 Modello 3D per analisi parametrica*

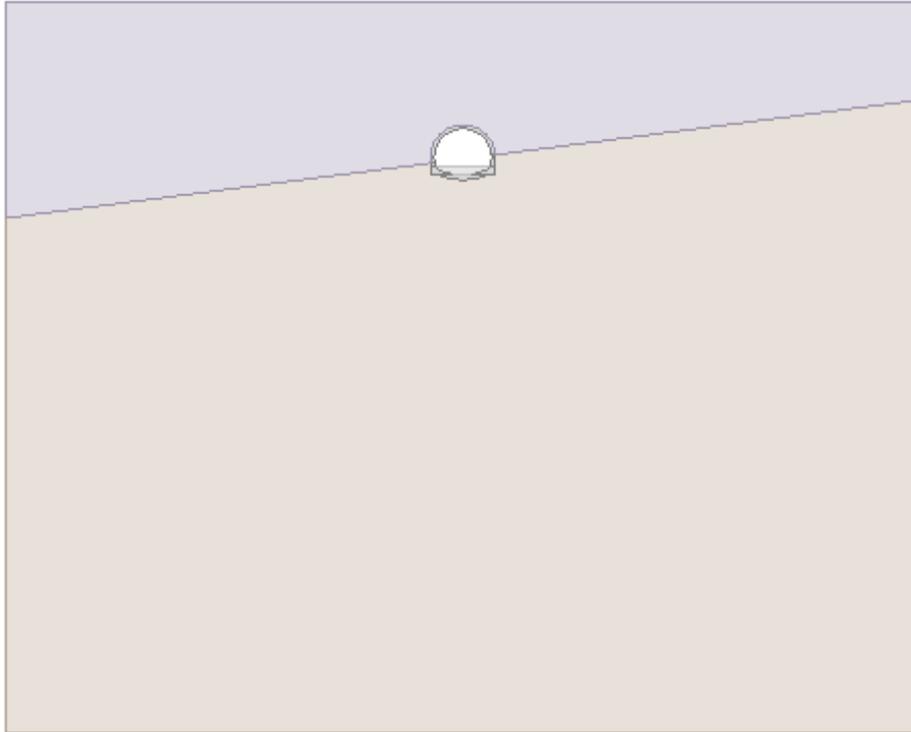
Le caratteristiche specifiche del rivestimento definitivo vengono sostituite con un elemento liner “Standard” e, dal momento che non si rappresentano le diverse fasi di scavo e non sono state registrate sofferenze sul rivestimento definitivo, si decide di considerare un peso specifico del terreno circostante pari al 5% di quello reale in modo tale da non incidere in maniera significativa sul rivestimento stesso. Anche la copertura della galleria viene variata e si considerano 20 m anziché 60 m. Queste modifiche non comportano problemi poiché in questo studio si è interessati a condurre un’analisi parametrica generale, non riferita alla specifica galleria; quella descritta precedentemente è stata presa in considerazione come base da cui partire per considerare parametri geometrici e geomeccanici plausibili e realistici. L’aspetto fondamentale nel condurre l’analisi parametrica è quello di considerare sempre le stesse caratteristiche della galleria, seppur variate rispetto al modello 2D iniziale, nelle diverse analisi 3D, in cui devono variare solamente le condizioni al contorno di carico e di stato tensionale.

#### **4.3. Analisi parametrica – Variazione dei parametri definiti al fine di analizzarne gli effetti sull’evoluzione dei difetti**

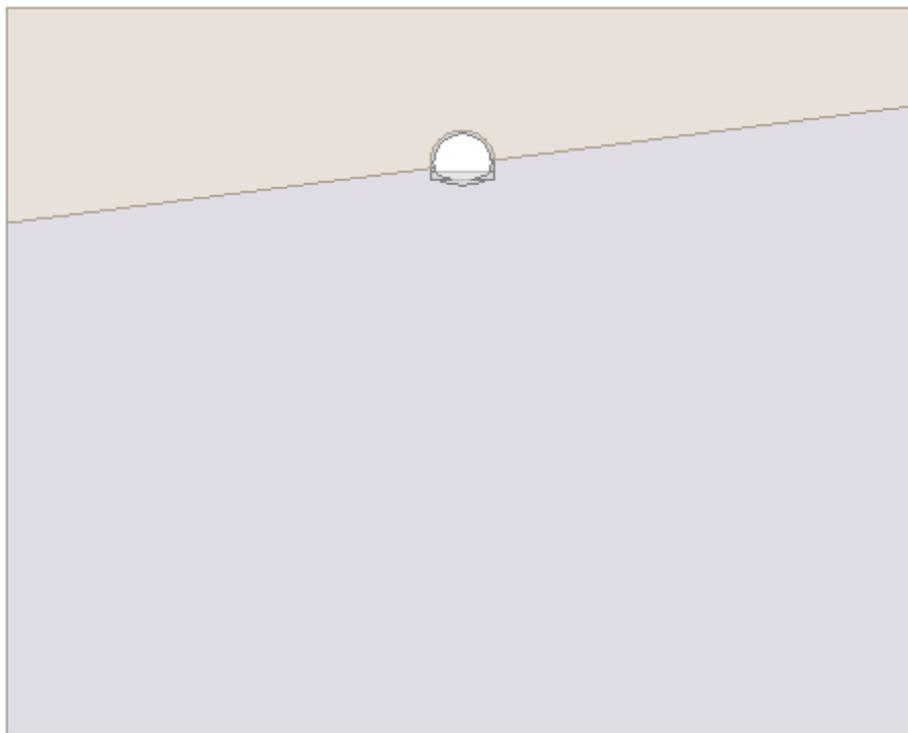
Come accennato precedentemente, i parametri che variano tra i vari modelli numerici 3D sono quelli che determinano condizioni di carico e di stato tensionale differenti. In particolare, per quanto riguarda i carichi di natura geostrutturale, si varia la sua distribuzione, uniforme o variabile, la posizione della galleria su cui questi agiscono, la sua intensità; riguardo alle altre condizioni di variazione tensionale, si fanno variare la stratigrafia e le caratteristiche meccaniche dei terreni che circondano la galleria, si considera la presenza di cavità, variabili in dimensioni e localizzazione sul contorno della galleria. Nella *Figura 4.3.1* si riportano le diverse configurazioni analizzate:

- a) Interfaccia suborizzontale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno superiore 2 ordini di grandezza inferiore a quello del terreno inferiore
- b) Interfaccia suborizzontale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno superiore 2 ordini di grandezza superiore a quello del terreno inferiore
- c) Interfaccia subverticale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno a sinistra 2 ordini di grandezza inferiore a quello del terreno a destra
- d) Interfaccia subverticale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno a sinistra 2 ordini di grandezza superiore a quello del terreno a destra
- e) Cavità in corrispondenza del piedritto destro, estesa a partire da un imbocco del tratto analizzato
- f) Cavità in corrispondenza del piedritto destro, estesa nella parte centrale del tratto analizzato
- g) Carico di 500 kPa agente radialmente alla galleria sulla metà di destra
- h) Carico di 500 kPa agente orizzontalmente alla galleria sulla metà di destra
- i) Carico di 500 kPa agente verticalmente sull’arco rovescio della galleria
- j) Carico di 500 kPa agente radialmente all’intera galleria
- k) Carico non uniforme distribuito in superficie con variazione trasversale allo sviluppo della galleria – da 200 kPa a sx a 500 kPa a dx
- l) Cavità in corrispondenza della parte sinistra della galleria che coinvolge circa metà sezione, estesa nella parte centrale del tratto analizzato

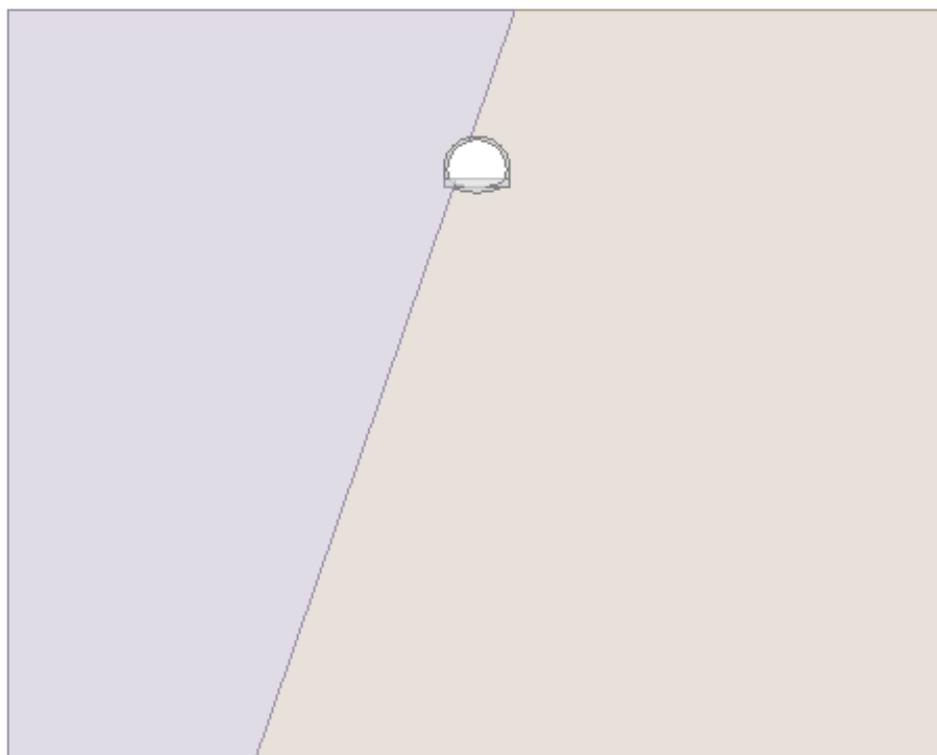
- m) Carico non uniforme distribuito in superficie con variazione longitudinale allo sviluppo della galleria – da 200 kPa davanti a 500 kPa dietro
- n) Carico non uniforme distribuito in superficie – 200 kPa davanti a sx; 600 kPa dietro a sx; 400kPa davanti a dx; 250kPa dietro a dx



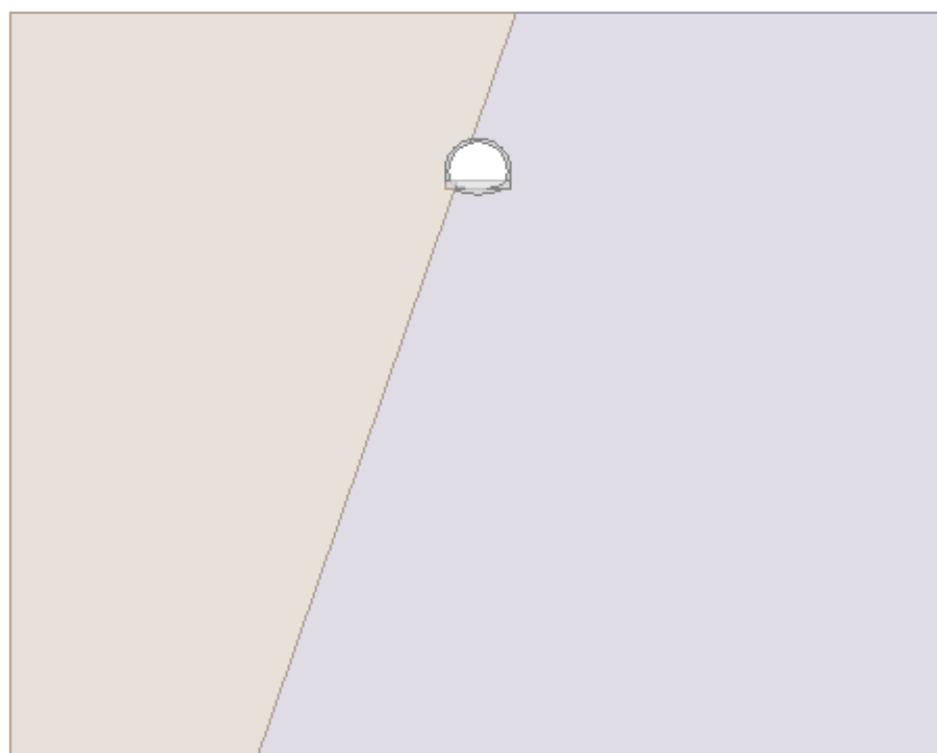
a)



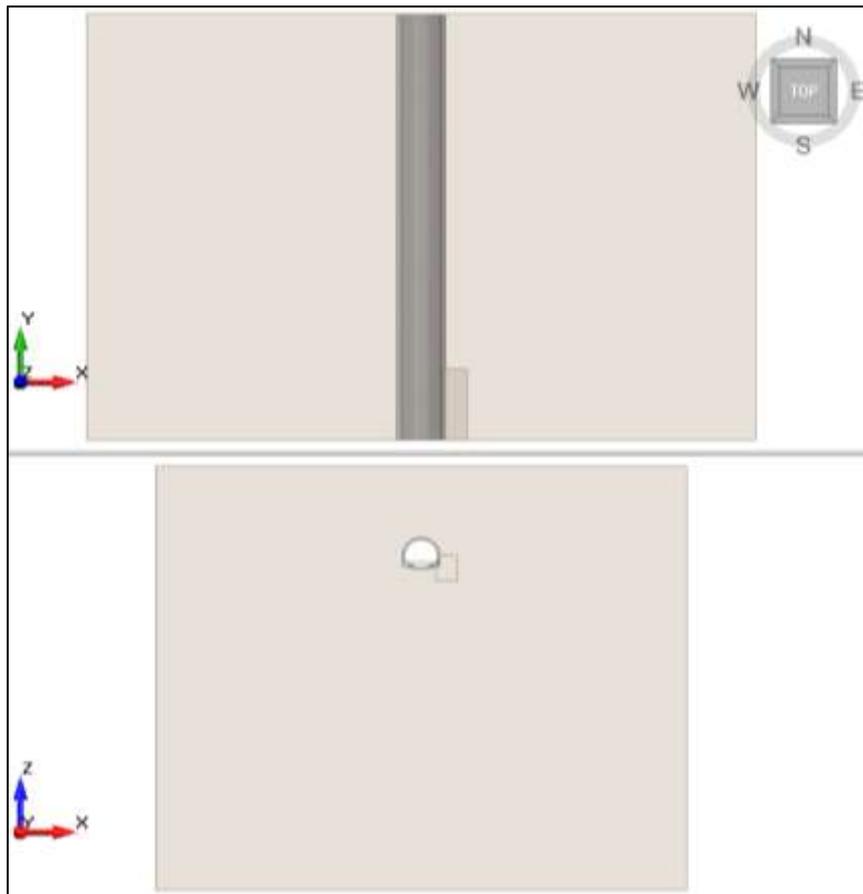
b)



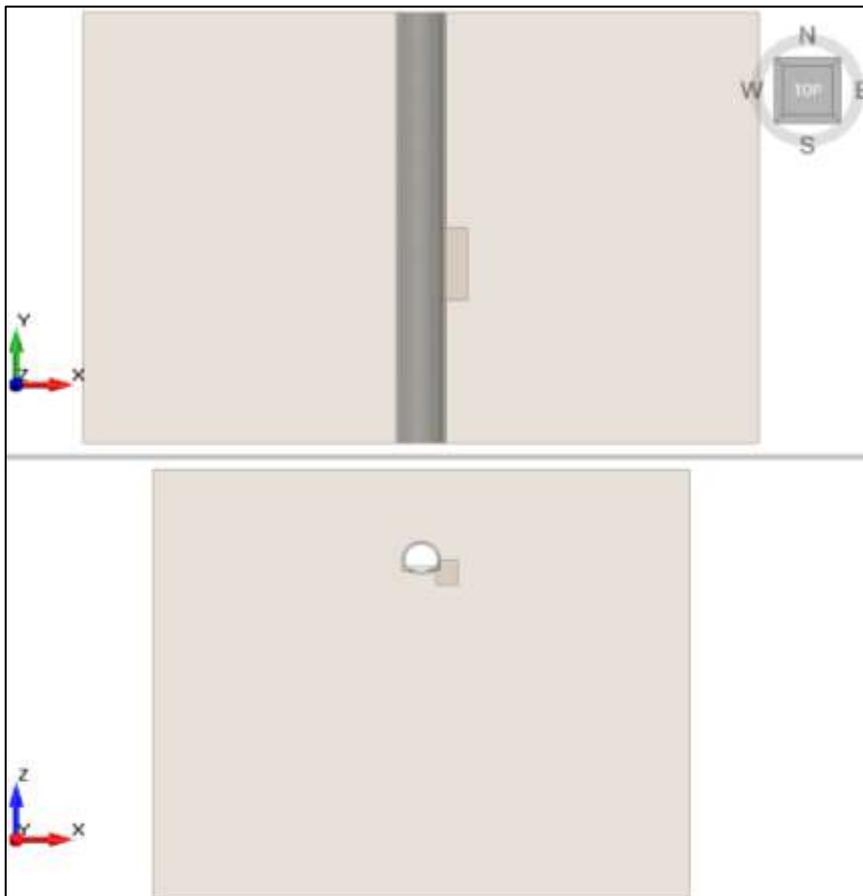
c)



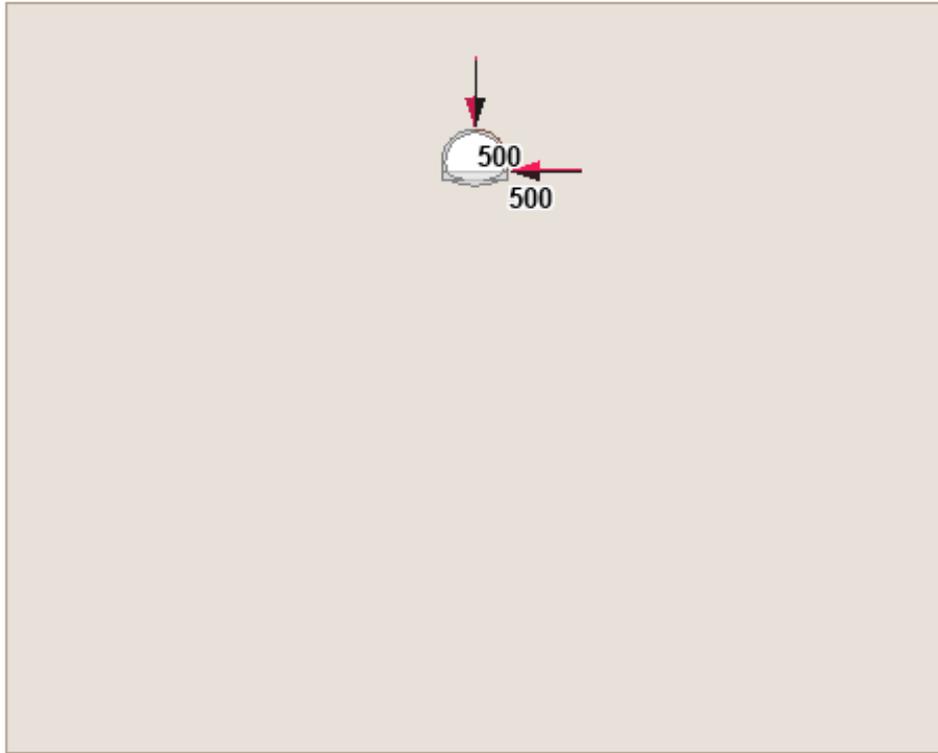
d)



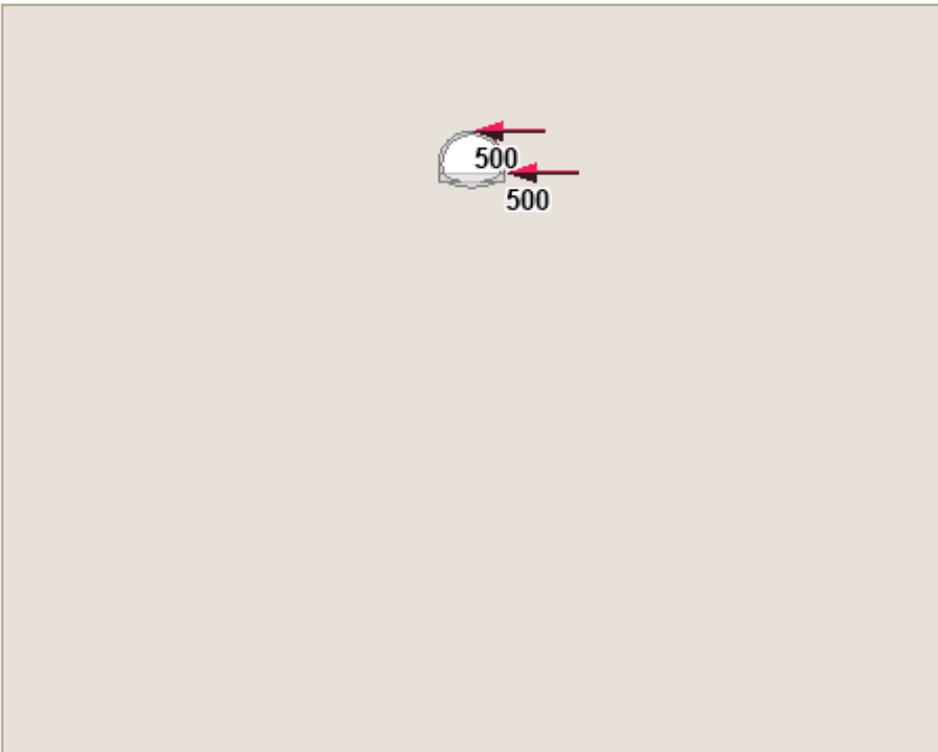
e)



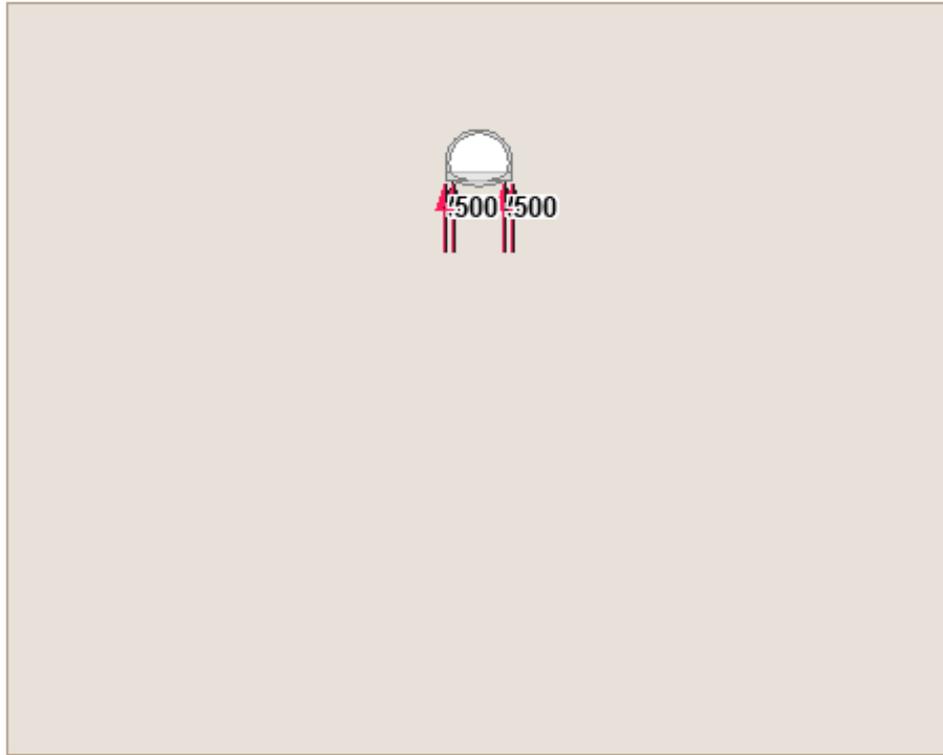
f)



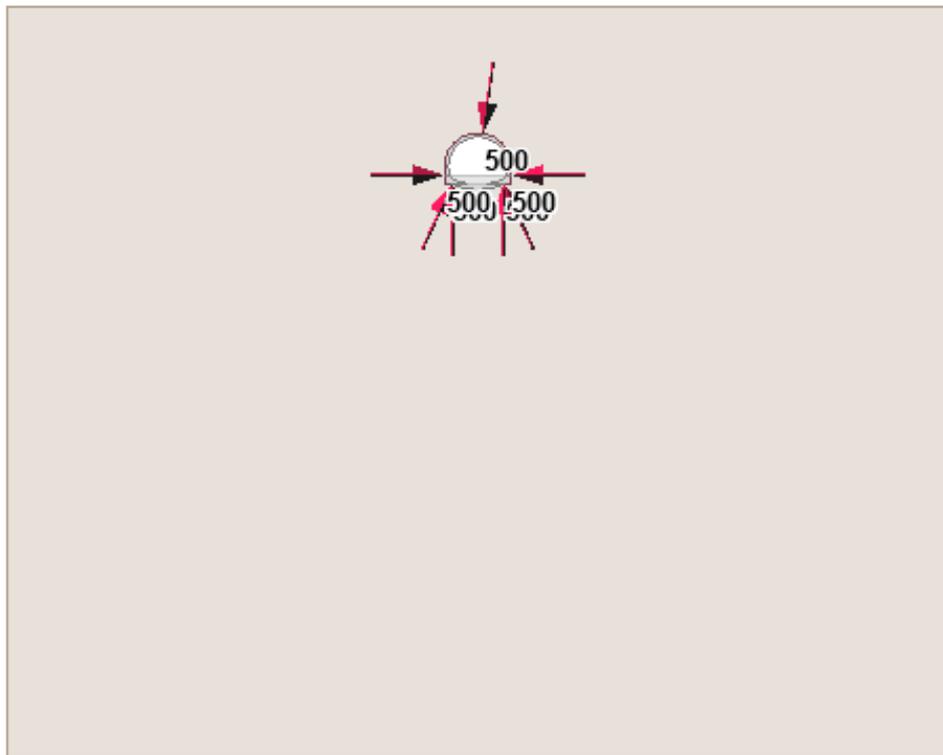
g)



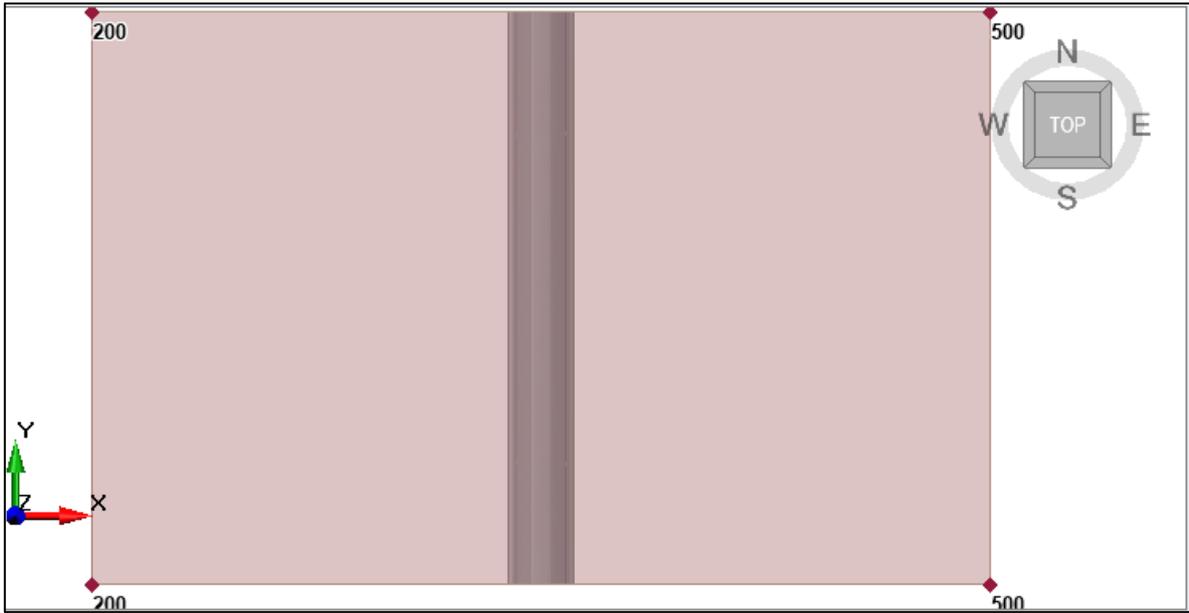
h)



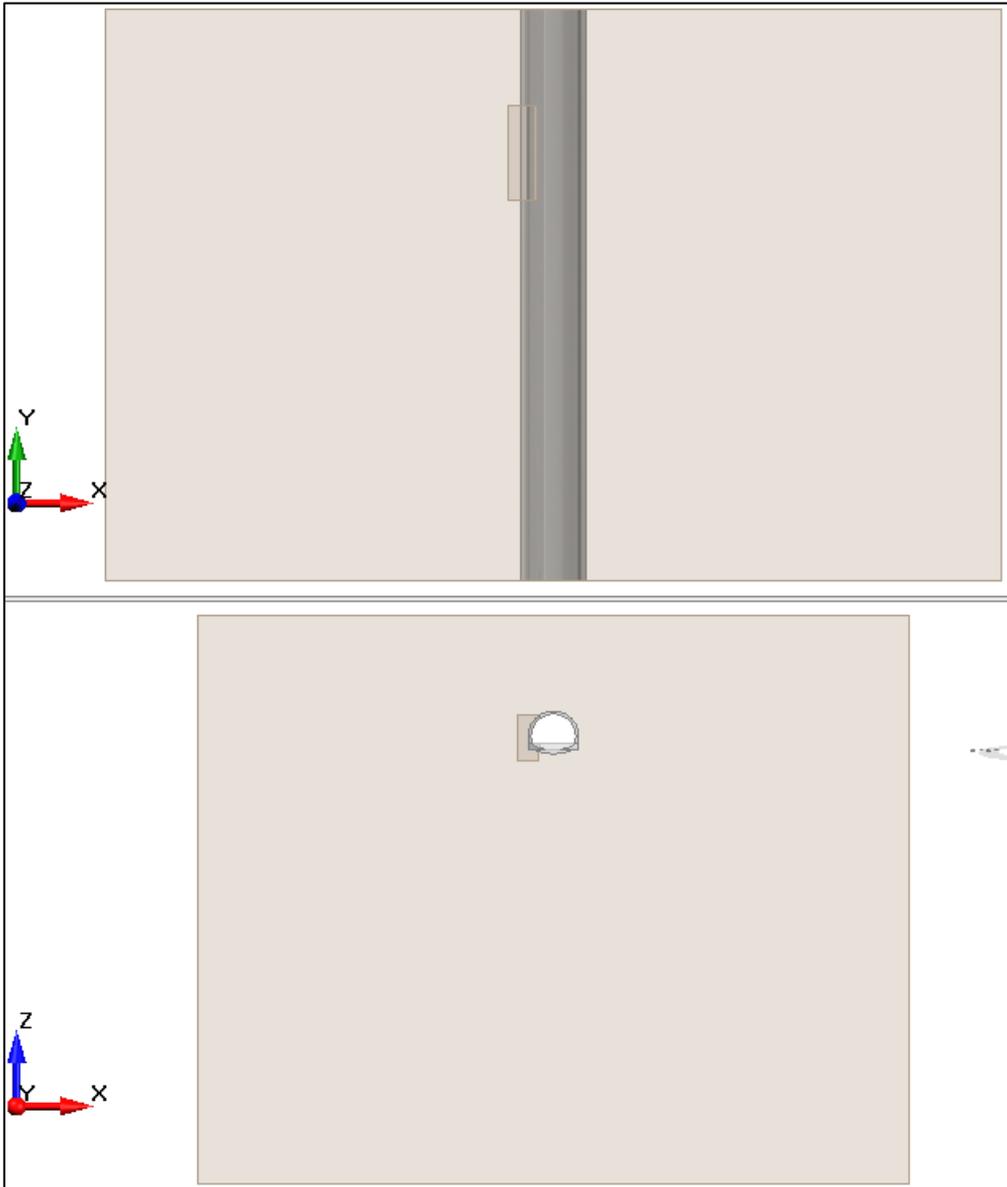
i)



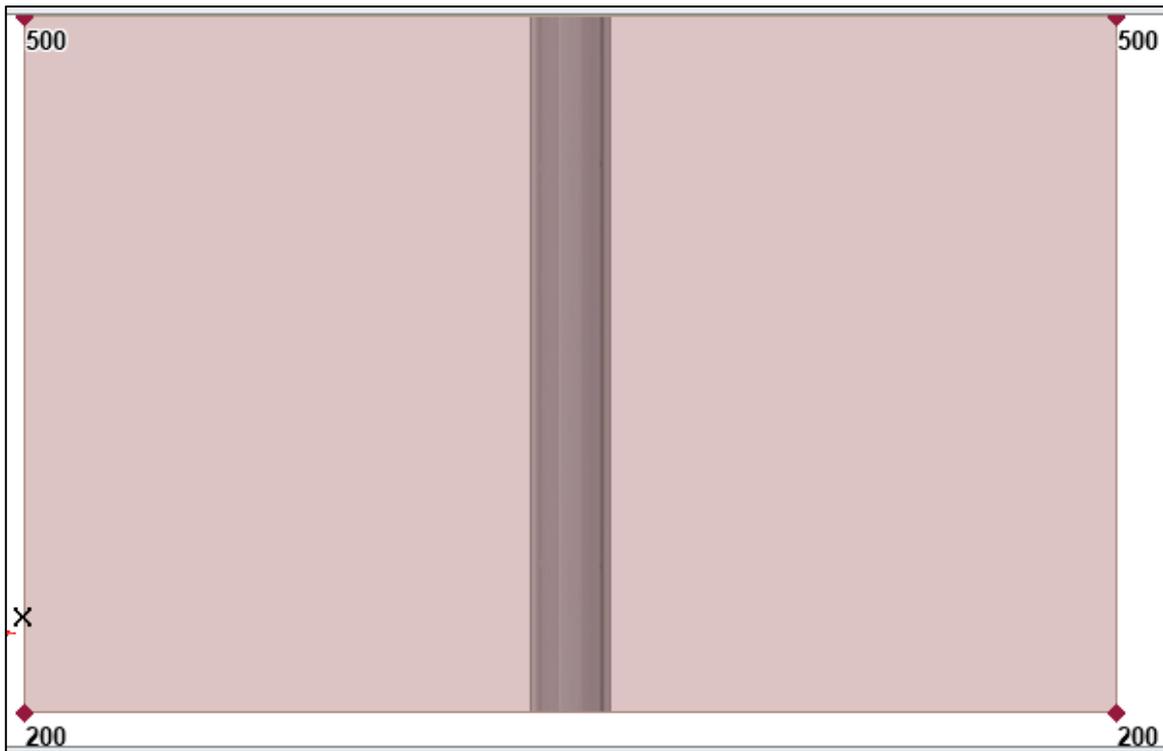
j)



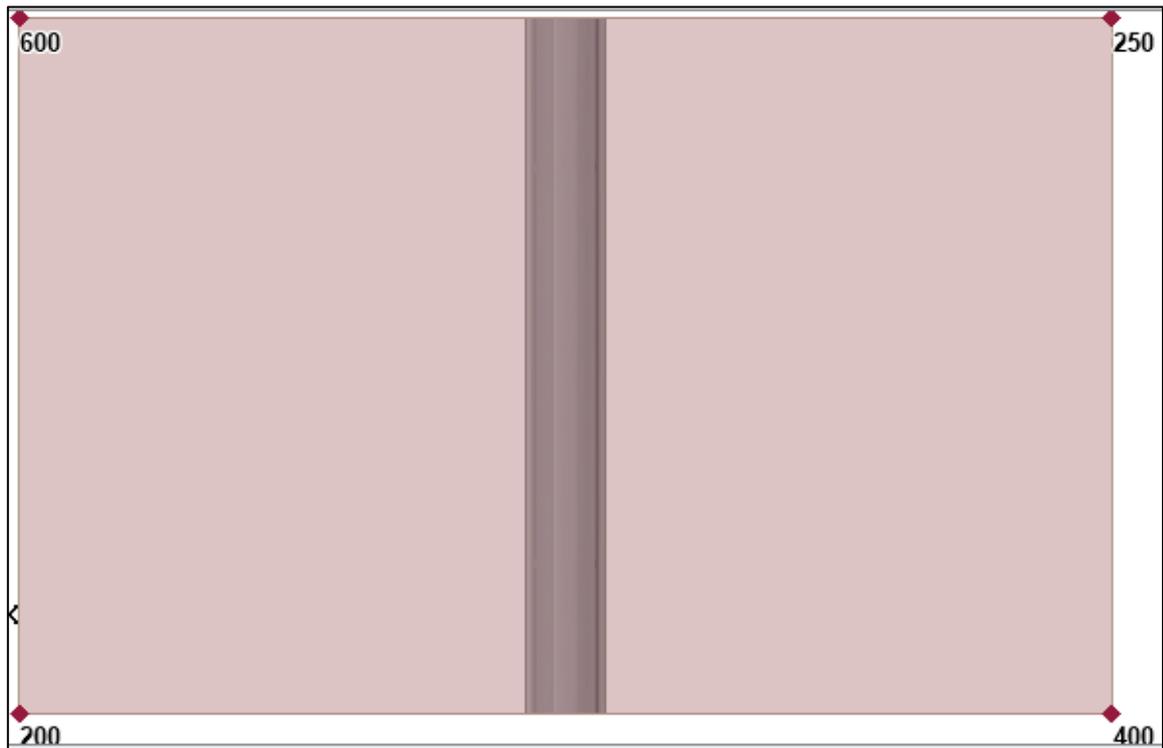
k)



l)



m)



n)

Figura 4.3.1 Configurazioni analisi parametrica

Per ogni modello si analizzano i risultati più significativi in termini di tensioni e deformazioni, si individuano le aree dove queste risultano maggiori in valore assoluto, si valuta la presenza o meno di una possibile rotazione della galleria attraverso la deformata fornita dal software.

In particolare, dal momento che si è interessati alla nascita di possibili fessure, ci si concentra sulle aree interessate da alti valori di trazione (valori negativi di tensione  $\sigma_3$ ), significativi se maggiori di 1 MPa circa; inoltre bisogna porre attenzione anche a valori particolarmente elevati di compressione (valori positivi di tensione  $\sigma_1$ ), rilevanti se superano 8-10 MPa, e all'entità delle deformazioni che si vengono a creare per effetto delle diverse condizioni a contorno.

Tali valori assunti rappresentano delle soglie orientative, superate le quali si ha possibilità che nascano delle fessure; in particolare, quella relativa alla compressione è basata sull'esperienza e risulta abbastanza cautelativa mentre quella relativa alla trazione è stimata a partire dalla formula [4.1.13] delle NTC2018 §4.1.2.2.4 [18], attraverso la quale si definisce lo stato limite di fessurazione del calcestruzzo. Per la precisione, trattandosi di un cls con classe C25/30, il valore ricavato da normativa risulta più elevato di 1MPa ma, considerando che negli anni in cui è stata costruita la galleria in esame il rigore e la precisione sul controllo del cls utilizzato era minore rispetto ad oggi, a favore di sicurezza si è deciso di considerare tale soglia.

Si è realizzata una tabella sintetica (Tabella 4.3.1) in cui si evidenziano i valori più significativi delle tensioni di trazione e compressione, al fine di definire quali sono gli scenari che maggiormente possono generare problematiche in galleria. Si sottolinea che nella Tabella 4.3.1 si sono riportati sia i valori massimi/minimi assoluti delle tensioni, presenti in un unico punto della galleria, sia i valori più alti/bassi presenti in una parte significativa di galleria, in modo tale da identificare la loro localizzazione e orientazione.

Tabella 4.3.1 Tabella sintetica analisi parametrica

	$\sigma_1$ [kPa]				$\sigma_3$ [kPa]				$\varepsilon_v$ [-]	
	min,ass	max,ass	min	max	min,ass	max,ass	min	max	assoluto	reale
Base	-57,02	972,32	-15,85	313,54	-327,50	163,56	-121,25	84,99	0,0061	9,60E-05
Configurazione a)	-173,82	841,41	-31,69	435,31	-984,25	110,85	-283,39	88,95	0,0086	1,20E-04
Configurazione b)	-243,19	1338,77	-53,35	547,79	-1238,82	187,86	-240,14	102,26	0,0085	9,80E-05
Configurazione c)	-97,21	781,59	-26,91	500,38	-566,37	143,15	-282,56	86,38	0,0096	1,70E-04
Configurazione d)	-150,67	1462,50	-53,88	623,65	-978,78	209,64	-360,80	90,80	0,0096	1,80E-04
Configurazione e)	-118,86	628,46	-14,23	344,48	-870,04	84,90	-144,28	46,70	0,0054	1,70E-05
Configurazione f)	-172,14	1886,30	-48,64	445,39	-901,63	229,62	-177,63	93,87	0,0079	4,90E-05
Configurazione g)	-620,45	4813,35	-185,75	2422,48	-5274,19	774,38	-1766,02	411,47	0,0068	1,80E-04
Configurazione h)	-452,37	4990,84	-234,65	2704,69	-3962,01	993,97	-2276,97	399,26	0,0057	1,90E-04
Configurazione i)	-829,32	6786,94	-220,02	3131,13	-7149,18	838,91	-1397,76	359,62	0,0056	2,00E-04
Configurazione j)	-685,13	5009,26	-115,70	2503,73	-5404,91	892,29	-241,21	388,51	0,0063	1,30E-04
Configurazione k)	-699,33	7368,14	-376,63	3495,75	-7128,10	611,16	-1555,83	301,59	0,0066	2,80E-04
Configurazione l)	-47,67	618,01	-21,04	378,37	-648,22	92,05	-189,25	77,24	0,0093	1,60E-04
Configurazione m)	-770,08	5906,62	-102,41	3235,94	-7383,06	530,03	-2160,42	371,77	0,0066	1,30E-04
Configurazione n)	-1015,50	8306,40	-456,19	4391,20	-8991,71	609,21	-2463,08	417,19	0,0066	1,30E-04

Come si evince nella Tabella 4.3.1, i valori più elevati di trazione vengono registrati nei casi in cui c'è la presenza di un carico applicato di una certa rilevanza nei pressi della galleria, mentre le condizioni legate alla stratigrafia variabile e alla presenza di cavità restituiscono valori di tensione al di sotto della soglia di 1 MPa. Per quanto riguarda la compressione, in tutti i casi analizzati, non si raggiungono valori molto elevati; solo nelle configurazioni i), k), n) ci si avvicina a 8 MPa, valore minimo da attenzionare. Ci si concentra, dunque, esclusivamente sulle zone in trazione.

Come accennato precedentemente, si è interessati anche alla localizzazione e all'orientazione delle zone in trazione sul contorno della galleria; a tal proposito si restringe il range dei valori di tensione visualizzati a quelli superiori, in valore assoluto, ad 1 MPa. Si sottolinea che i valori più elevati sono visualizzati in blu mentre quelli più bassi, e dunque più vicini ad 1 MPa, in rosso (*Figure 4.3.2 - 4.3.7*).

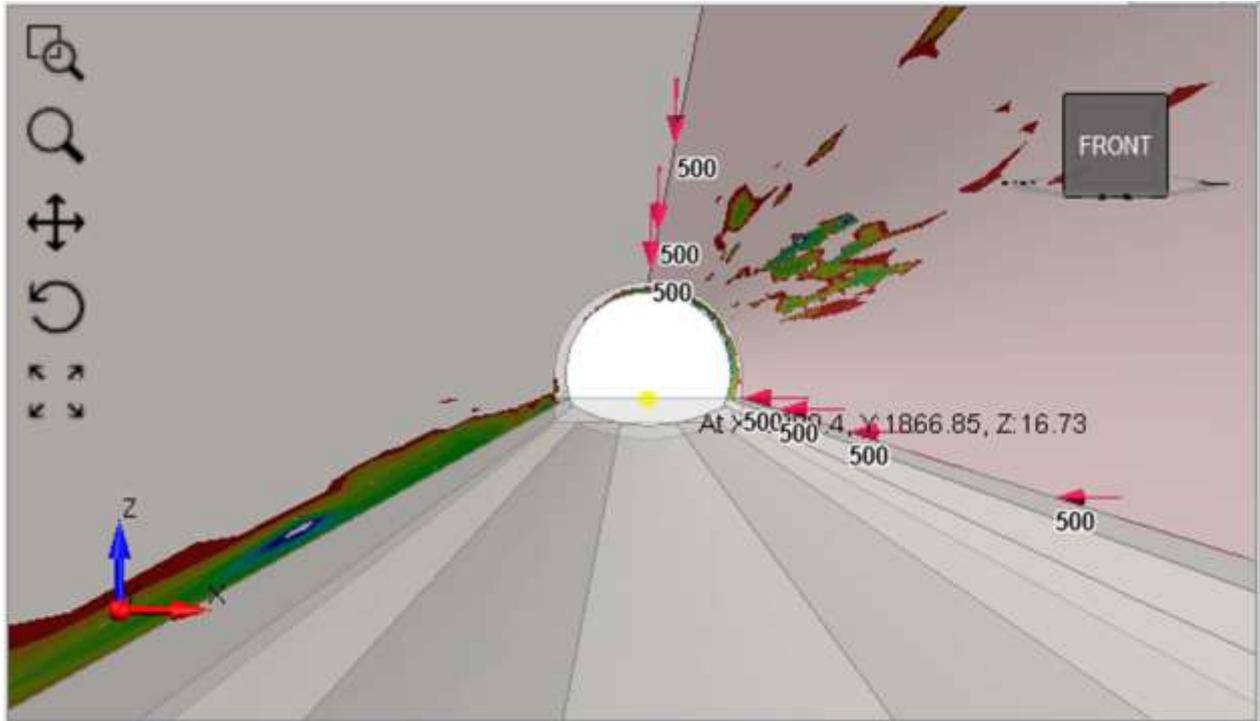


Figura 4.3.2 Tensioni di trazione configurazione g)

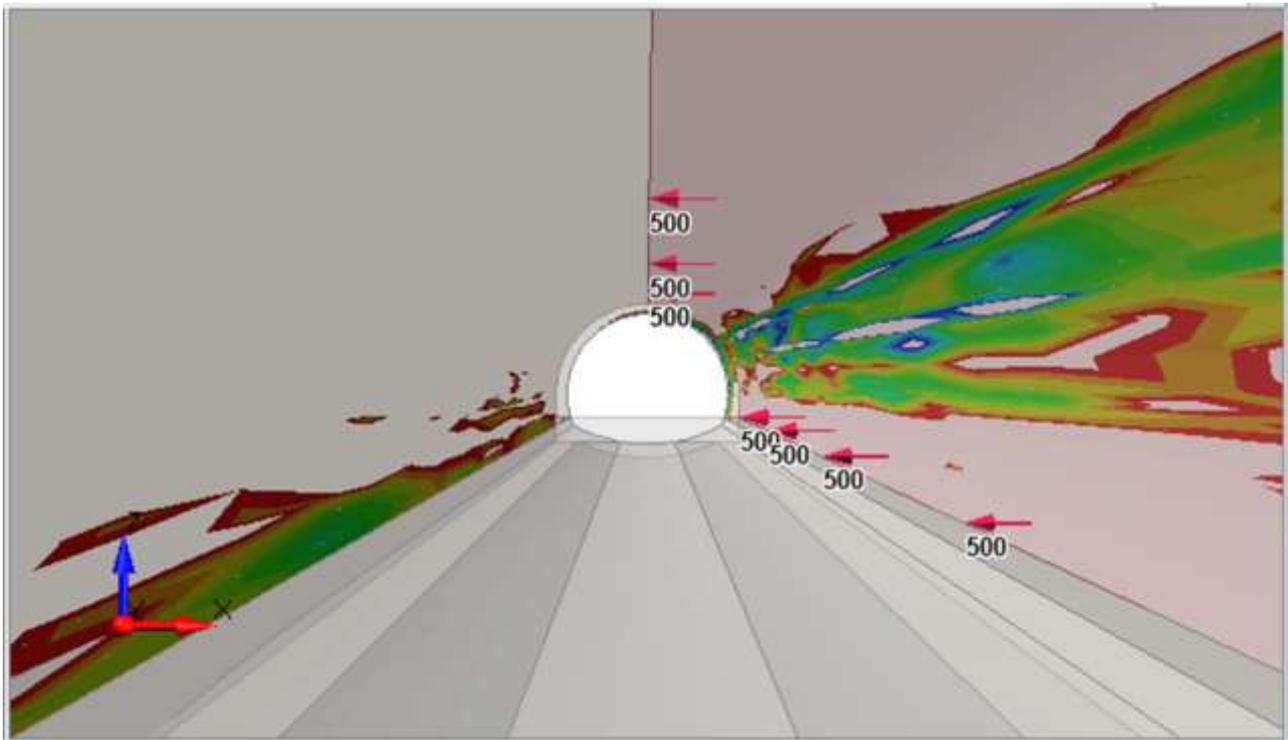


Figura 4.3.3 Tensioni di trazione configurazione h)

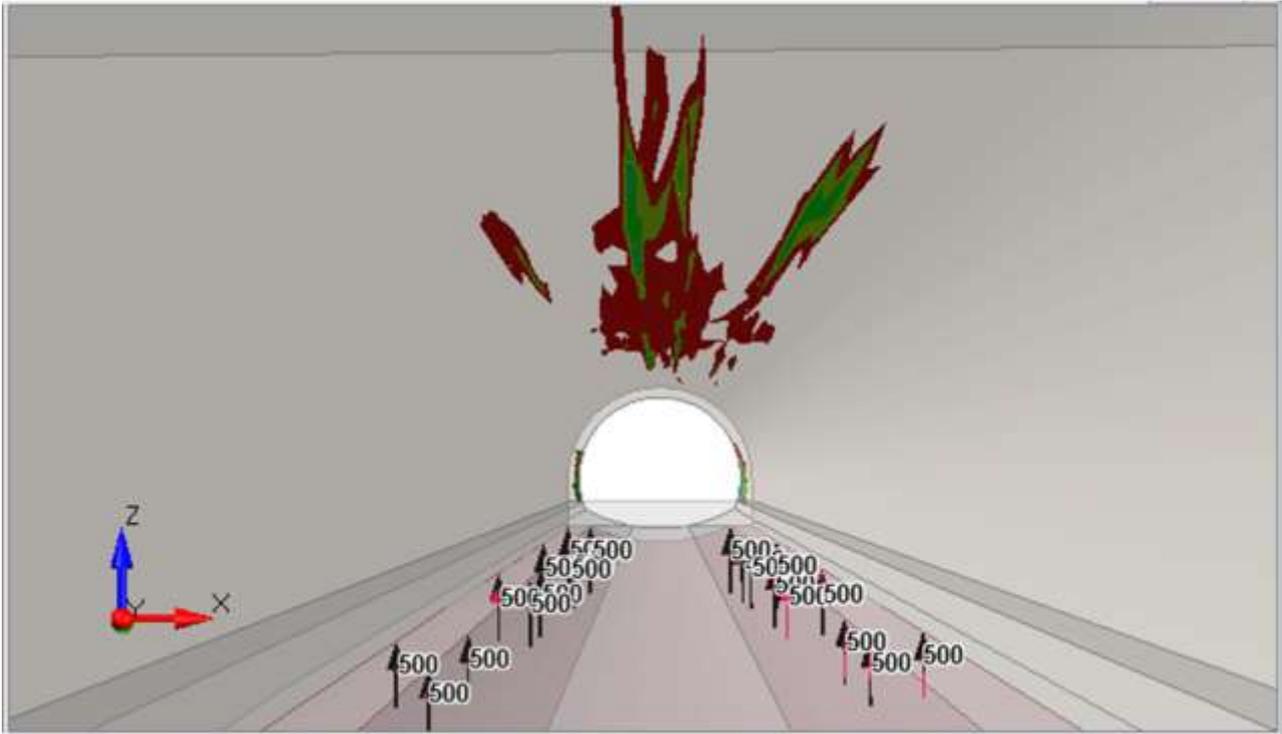


Figura 4.3.4 Tensioni di trazione configurazione i)

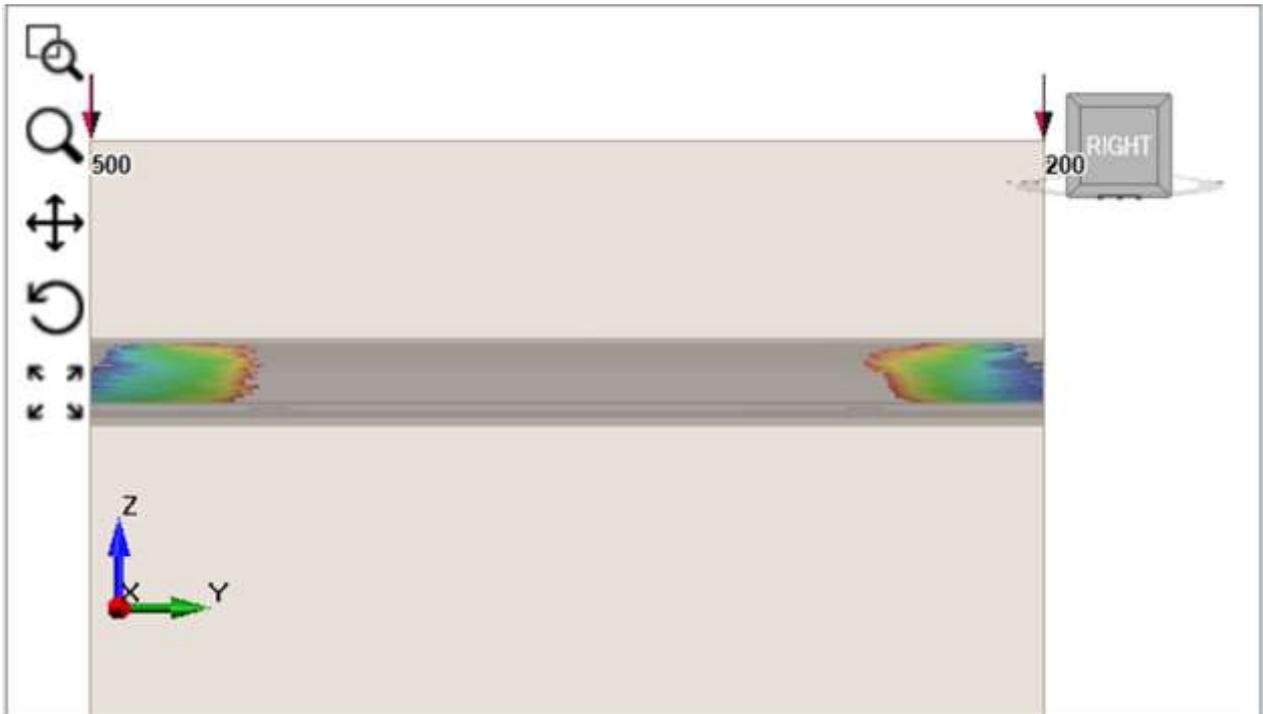


Figura 4.3.5 Tensioni di trazione configurazione k)



Figura 4.3.6 Tensioni di trazione configurazione m)

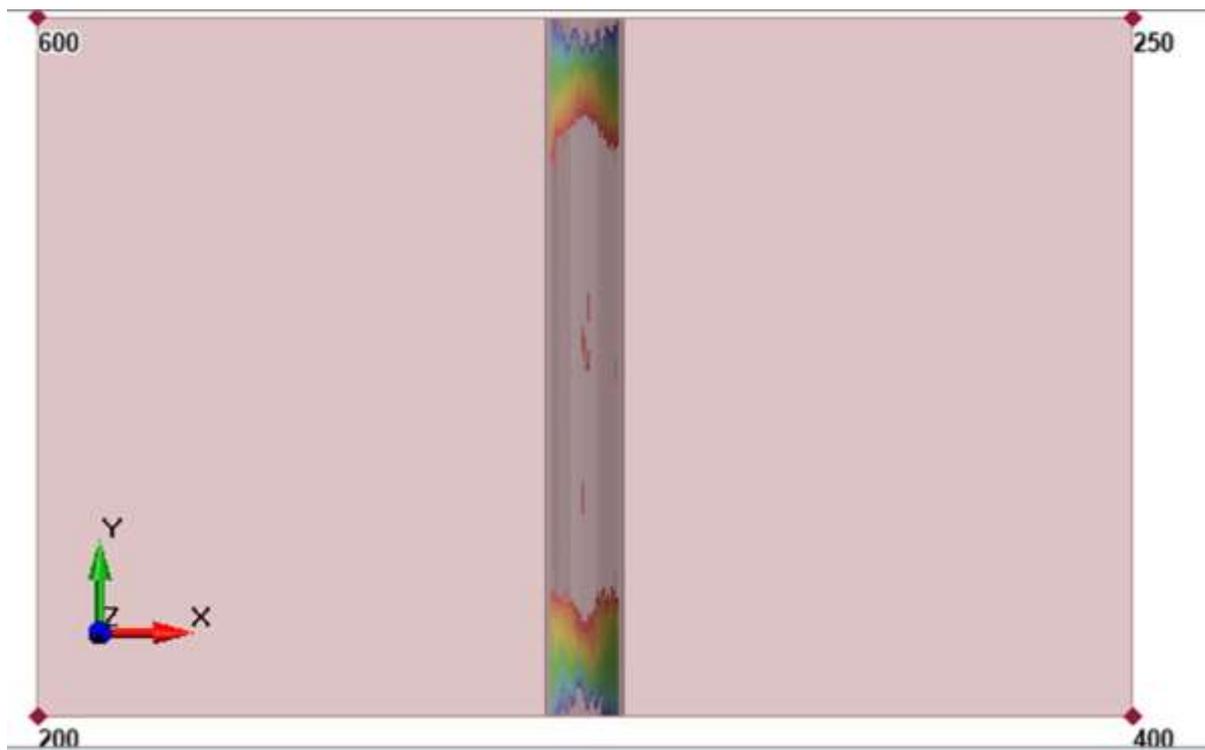


Figura 4.3.7 Tensioni di trazione configurazione n)

Si può notare come, al variare delle condizioni al contorno, il fenomeno della trazione interessa zone completamente diverse tra loro.

Nel caso delle configurazioni *g*), *h*), *i*) si è scelto di visualizzare tali zone ponendosi all'interno della galleria poiché queste interessano principalmente il tratto centrale dello sviluppo della galleria stessa e non tanto le zone di imbocco, le quali possono comunque essere soggetti a un disturbo poiché posti sul contorno del modello.

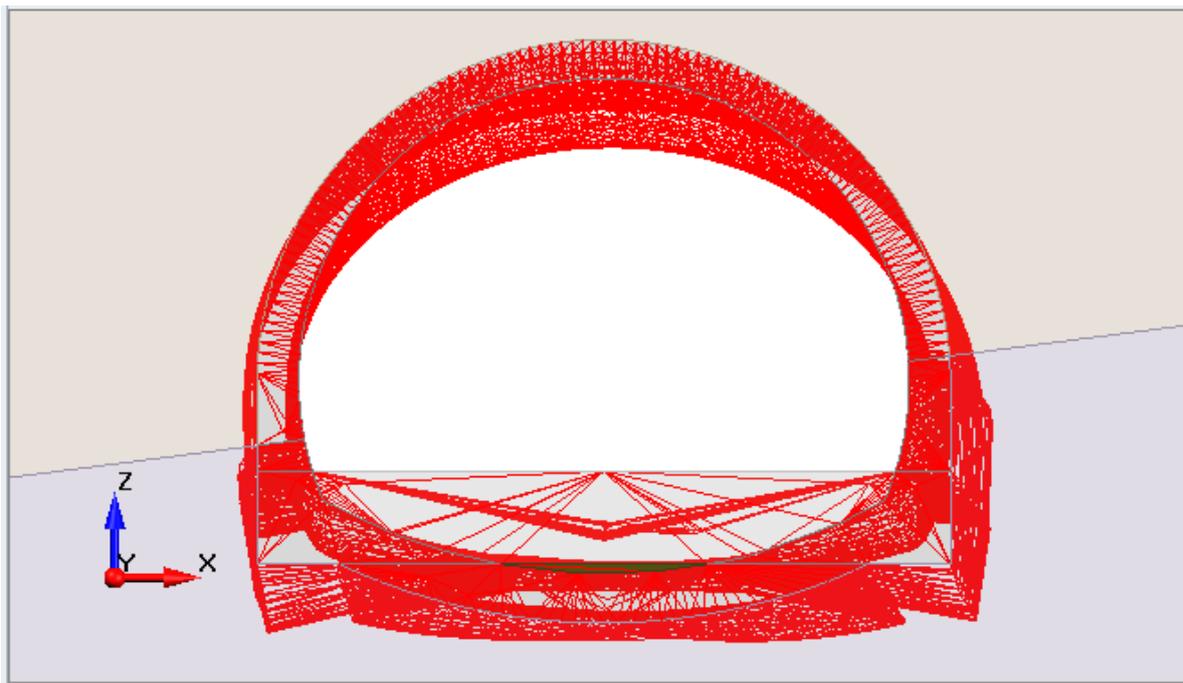
Nel caso di carico agente radialmente alla galleria le tensioni negative superiori ad 1 MPa interessano il piedritto sinistro e parte della calotta destra; tali zone si propagano per lo più in modo longitudinale alla galleria in esame.

Nel caso di carico agente orizzontalmente alla galleria, invece, le tensioni negative superiori ad 1 MPa interessano maggiormente la calotta destra e meno il piedritto sinistro; tali zone si propagano con una maggiore variabilità rispetto al caso precedente e si possono notare, in maniera evidente, sia zone ad estensione longitudinale alla galleria che zone ad estensione trasversale ad essa.

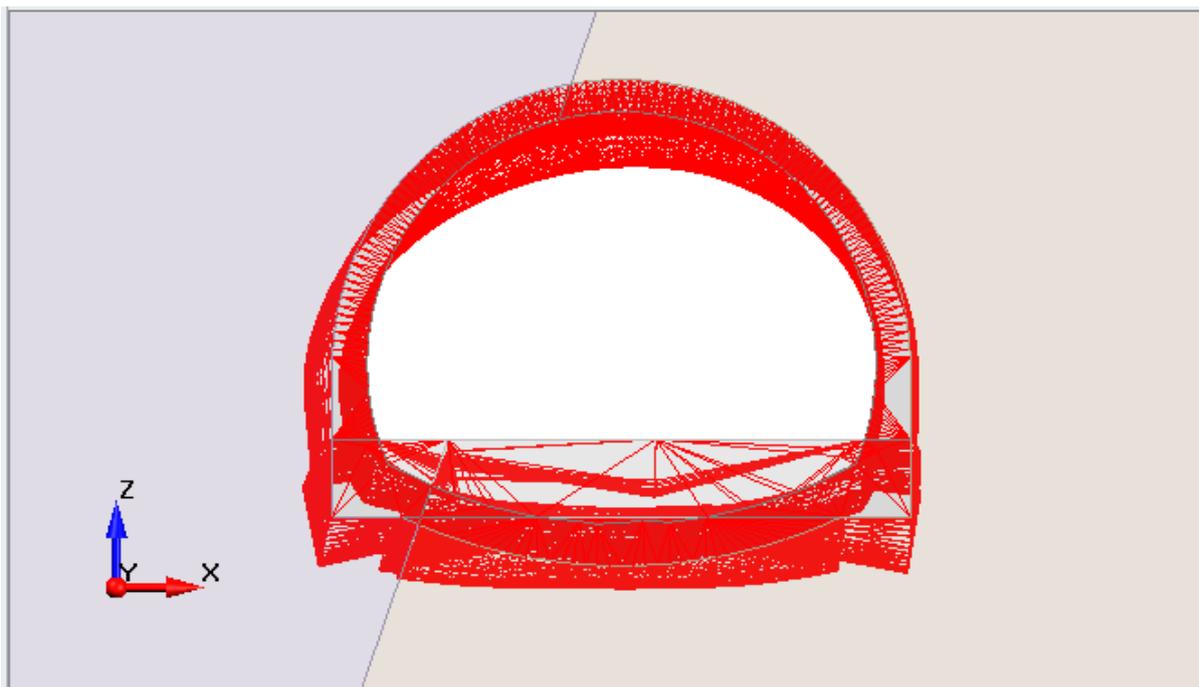
Nel caso di carico agente verticalmente sull'arco rovescio della galleria le tensioni negative superiori ad 1 MPa interessano esclusivamente la parte più alta della calotta; tali zone si estendono principalmente in modo longitudinale alla galleria.

Per le configurazioni *k*), *m*), *n*), invece, si è scelto di visualizzare le zone interessate dalla trazione mostrando una sezione longitudinale o la pianta della galleria, dal momento che queste sono situate sulle parti terminali del tratto analizzato; questo può essere spiegato dal fatto che il carico in superficie viene assegnato ai vertici del modello. Si può notare come sia interessata la calotta in maniera abbastanza uniforme, e come nelle configurazioni *k*) e *m*) la “zona blu” si estenda maggiormente sul lato soggetto al carico più elevato in superficie. In presenza di carico non uniforme in superficie nascono anche delle zone di trazione in calotta, pressoché longitudinali alla galleria.

Altro aspetto importante da analizzare è la possibilità di rotazione della galleria per effetto delle diverse condizioni al contorno; anche la tendenza alla rotazione può essere considerata come una possibile causa per la nascita di nuove fessure. Contrariamente a quanto visto precedentemente, le condizioni che portano a tale tipo di comportamento sono quelle contraddistinte della presenza di un'interfaccia che divide due tipologie diverse di terreno (configurazioni *b*), *c*), *d*)); anche nella configurazione *g*) si può notare una rotazione della sezione trasversale non indifferente (*Figure 4.3.8 – 4.3.12*).



*Figura 4.3.8 Rotazione configurazione b)*



*Figura 4.3.9 Rotazione configurazione c)*

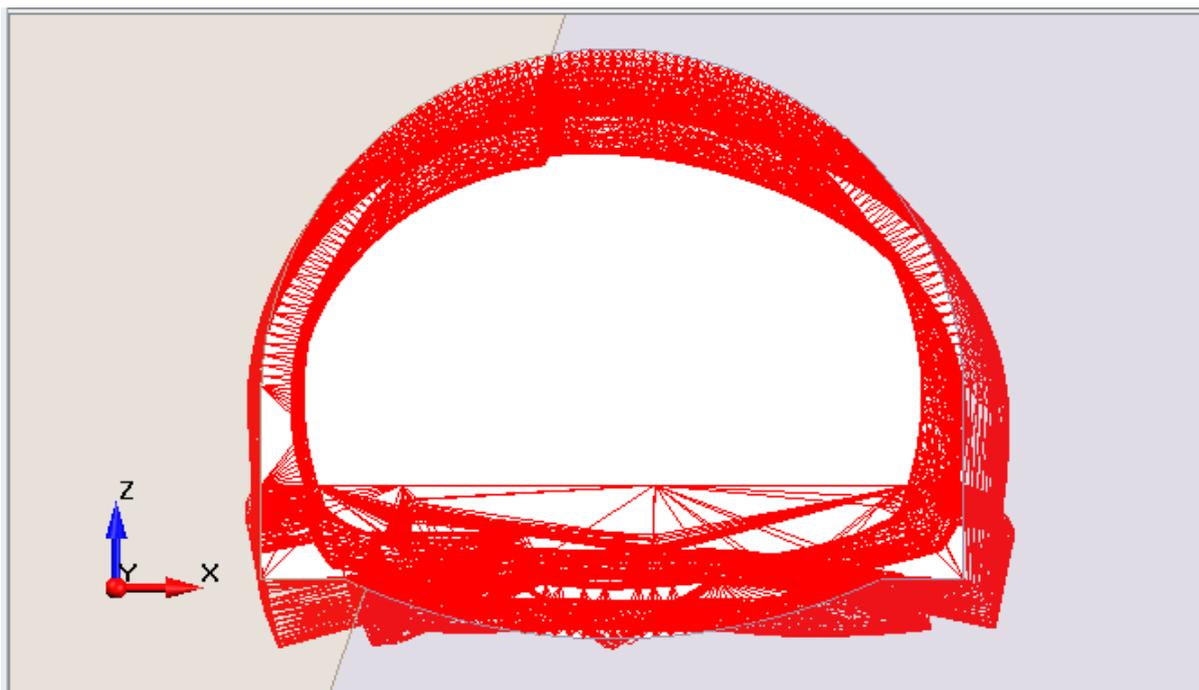


Figura 4.3.10 Rotazione configurazione d)

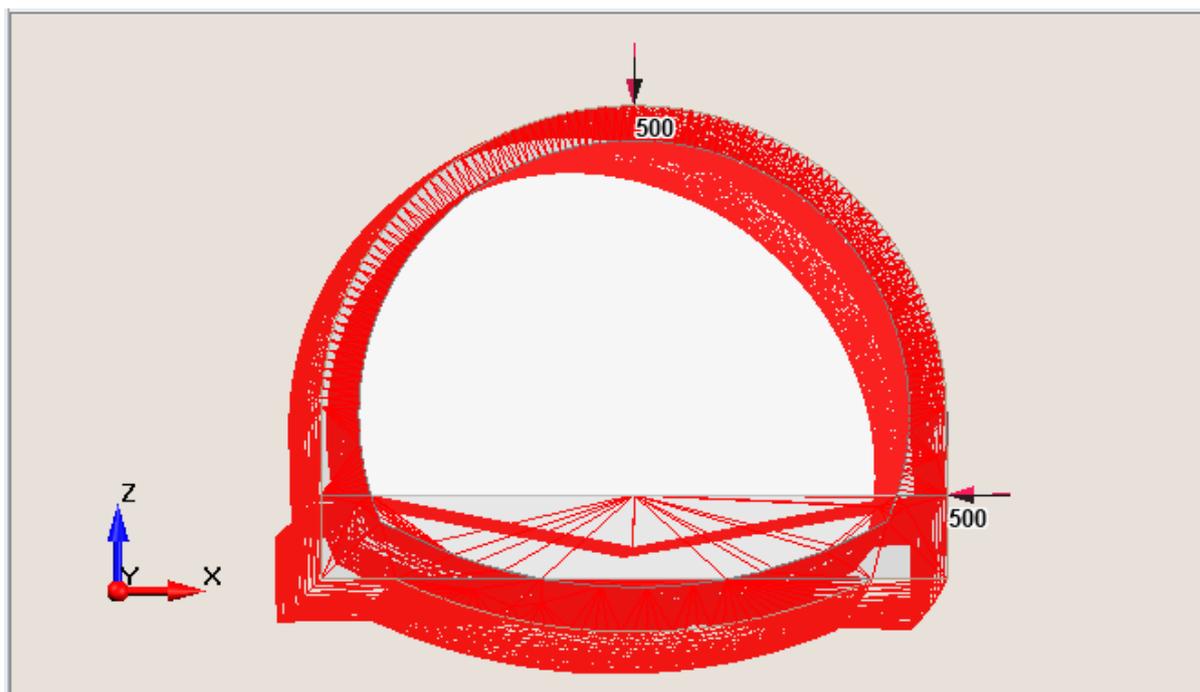


Figura 4.3.11 Rotazione configurazione g)

Risulta evidente come la rotazione interessi la porzione di terreno contraddistinta dal modulo di Young più basso: terreno di sotto nella *Figura 4.3.8*, terreno a sinistra nella *Figura 4.3.9*, terreno a destra nella *Figura 4.3.10*; nella *Figura 4.3.11* la rotazione è antioraria per via del verso del carico esterno agente esclusivamente su metà sezione.

Al contrario, nella configurazione *h*), vista l'orizzontalità del carico agente, si può notare una deformata che evidenzia una traslazione verso sinistra oltre che una rotazione meno accentuata rispetto ai casi precedenti. (Figura 4.3.12).

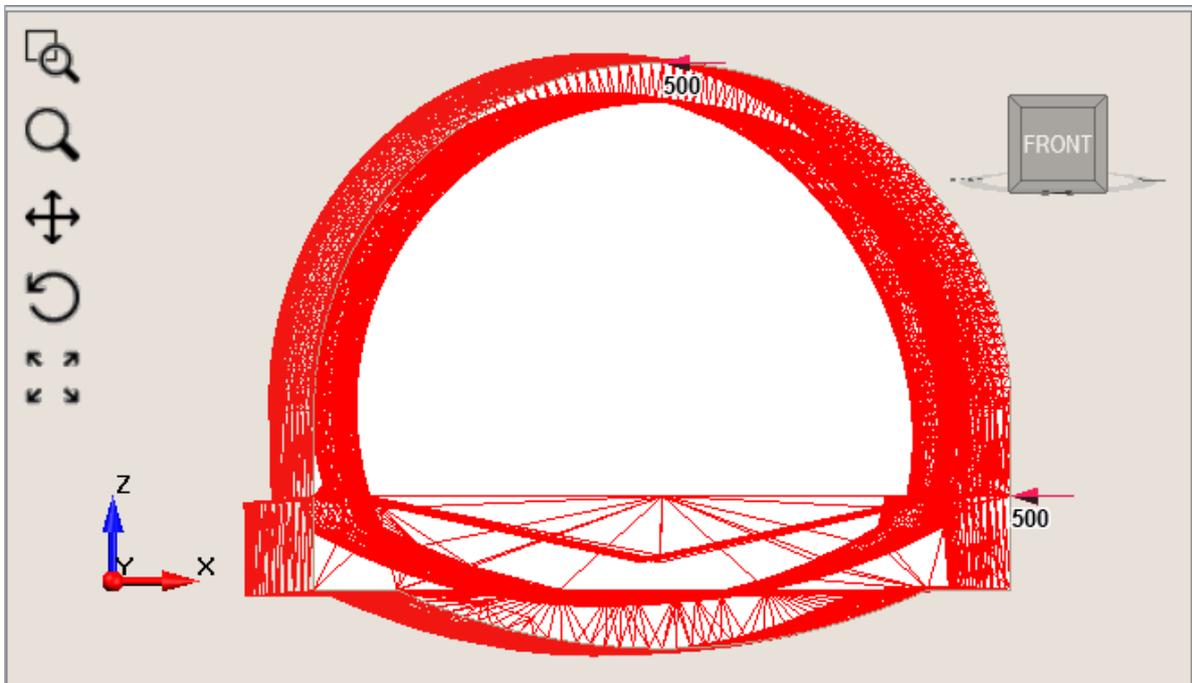


Figura 4.3.12 Rotazione configurazione *h*)

Una volta analizzata la localizzazione delle zone di trazione e la rotazione a cui è soggetta la galleria per azione delle condizioni a contorno scelte, si passa all'ultimo aspetto da indagare: l'orientazione delle fessure. Questo aspetto è il più complicato da ricercare e quello su cui si ha una maggiore incertezza. Se le zone di trazione e la rotazione della sezione vengono mostrate direttamente dai risultati del software *RS3*, questo non avviene per la direzione delle tensioni, e conseguentemente per quella delle fessure. Si è cercato dunque un modo per provare a risalire alle direzioni delle tensioni principali minori e si è deciso di procedere conducendo due analisi in parallelo: una atta ad indagare la possibile presenza di fessure in direzione longitudinale e l'altra atta ad indagare la possibile presenza di fessure in direzione trasversale allo sviluppo della galleria.

La prima è stata condotta indagando la  $\sigma_{YY}$ , essendo *Y* la direzione lungo cui si estende longitudinalmente la galleria. Se i valori di  $\sigma_{YY}$  sono prossimi a quelli di  $\sigma_3$  nelle stesse zone di trazione individuate, presumibilmente si creeranno fessure longitudinali allo sviluppo della galleria e dunque con un'orientazione orizzontale. Nella *Tabella 4.3.2* si riporta un confronto tra i valori minimi assoluti e i più bassi presenti in una parte significativa di galleria di  $\sigma_3$  e  $\sigma_{YY}$  per le varie configurazioni adottate.

Tabella 4.3.2 Confronto tra i valori di  $\sigma_3$  e  $\sigma_{YY}$  per le varie configurazioni adottate

	$\sigma_3$ [kPa]		$\sigma_{YY}$ [kPa]	
	min,ass	min	min,ass	min
Base	-327,50	-121,25	-57,10	-21,78
Configurazione a)	-984,25	-283,39	-173,99	-38,55
Configurazione b)	-1238,82	-240,14	-243,85	-37,11
Configurazione c)	-566,37	-282,56	-134,34	-33,53
Configurazione d)	-978,78	-360,80	-150,76	-45,19
Configurazione e)	-870,04	-144,28	-137,91	-12,94
Configurazione f)	-901,63	-177,63	-174,99	-16,74
Configurazione g)	-5274,19	-1766,02	-1840,11	-540,31
Configurazione h)	-3962,01	-2276,97	-2829,71	-530,13
Configurazione i)	-7149,18	-1397,76	-2734,78	-1064,16
Configurazione j)	-5404,91	-241,21	-911,79	27,32
Configurazione k)	-7128,10	-1555,83	-3962,67	-1140,12
Configurazione l)	-648,22	-189,25	-85,77	-23,22
Configurazione m)	-7383,06	-2160,42	-4450,49	-1265,07
Configurazione n)	-8991,71	-2463,08	-5030,10	-1315,42

Si sono evidenziate le configurazioni in cui i valori di  $\sigma_{YY}$  si avvicinano di più a quelli di  $\sigma_3$ . Seguendo questo ragionamento, in presenza delle condizioni a contorno che caratterizzano le configurazioni evidenziate, risulta molto probabile la nascita di fessure orizzontali, visto anche il valore superiore alla soglia di 1MPa della  $\sigma_{YY}$ . Tali configurazioni sono contraddistinte da condizioni che comportano non uniformità lungo lo sviluppo longitudinale della galleria.

La seconda analisi, quella atta ad indagare la possibile presenza di fessure in direzione trasversale allo sviluppo della galleria, invece, viene condotta realizzando delle sezioni trasversali nel modello 3D in corrispondenza delle zone in cui si rilevano le maggiori concentrazioni di trazione e passando ad un modello 2D sul software *RS2*, in cui si verifica se le zone interessate sul contorno della galleria siano uguali a quelle visualizzate su *RS3*. Se questo avviene, le tensioni di trazione porteranno presumibilmente alla creazione di fessure trasversali allo sviluppo della galleria e dunque con un'orientazione verticale. Nelle *Figure 4.3.13 – 4.3.18* si riportano le zone di trazione individuate nei modelli 2D per le condizioni di carico considerate come le più gravose, corrispondenti a quelle mostrate nelle *Figure 4.3.2 – 4.3.7*.



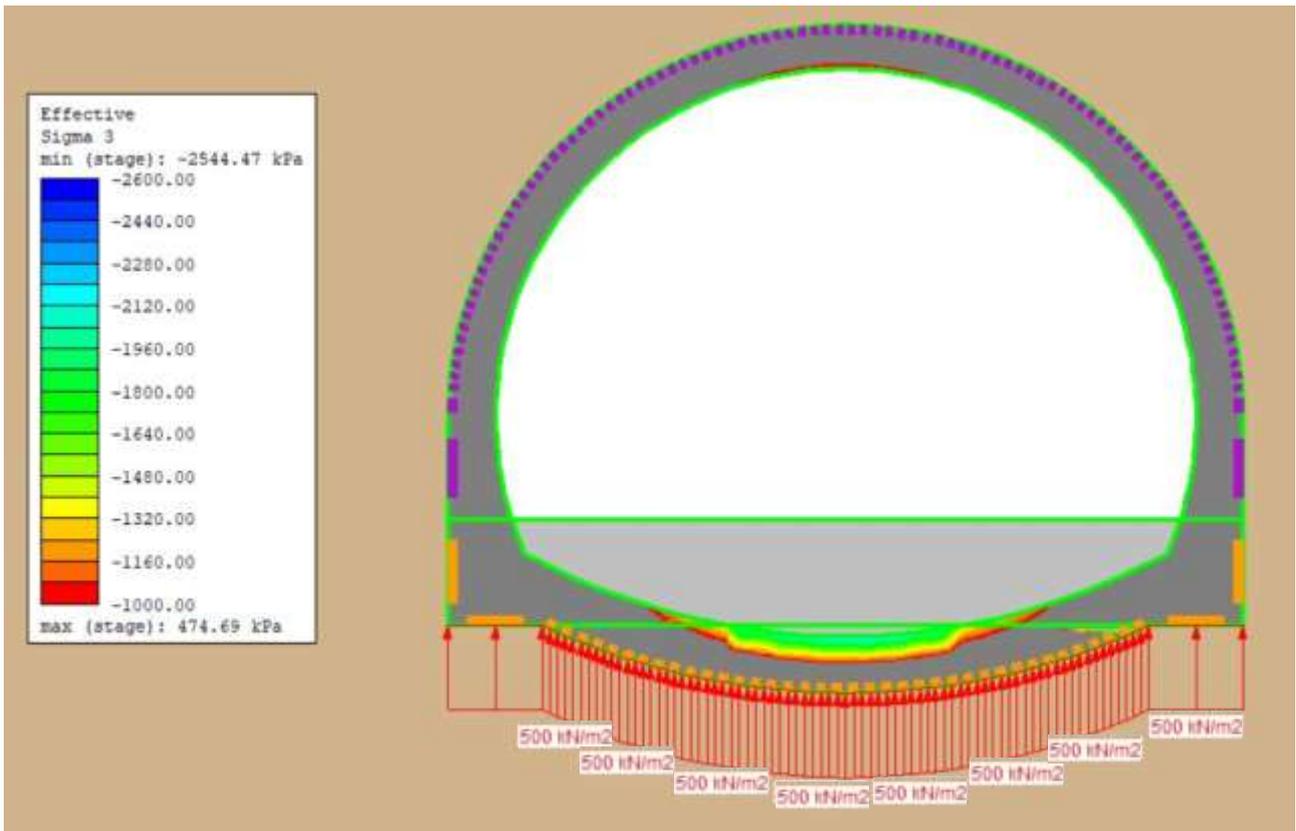


Figura 4.3.15 Tensioni di trazione configurazione i) (2D)

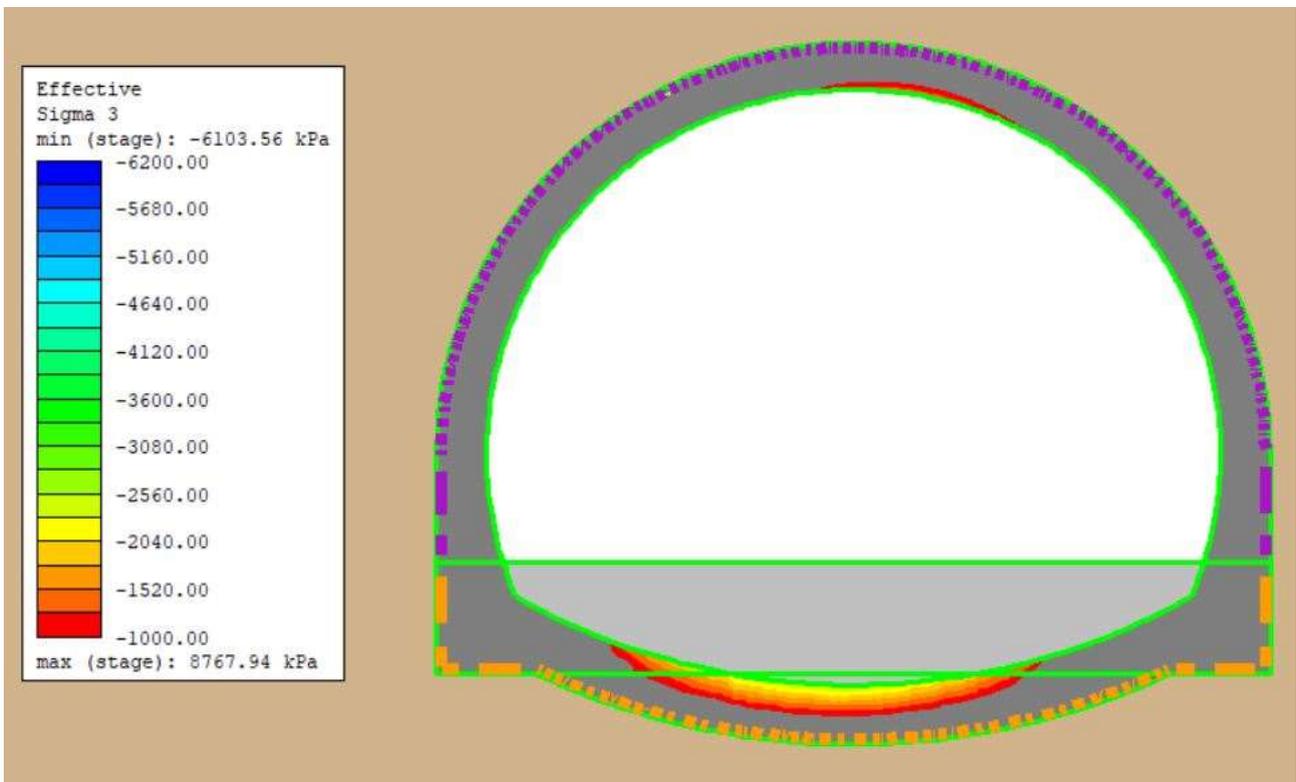


Figura 4.3.16 Tensioni di trazione configurazione k) (2D)

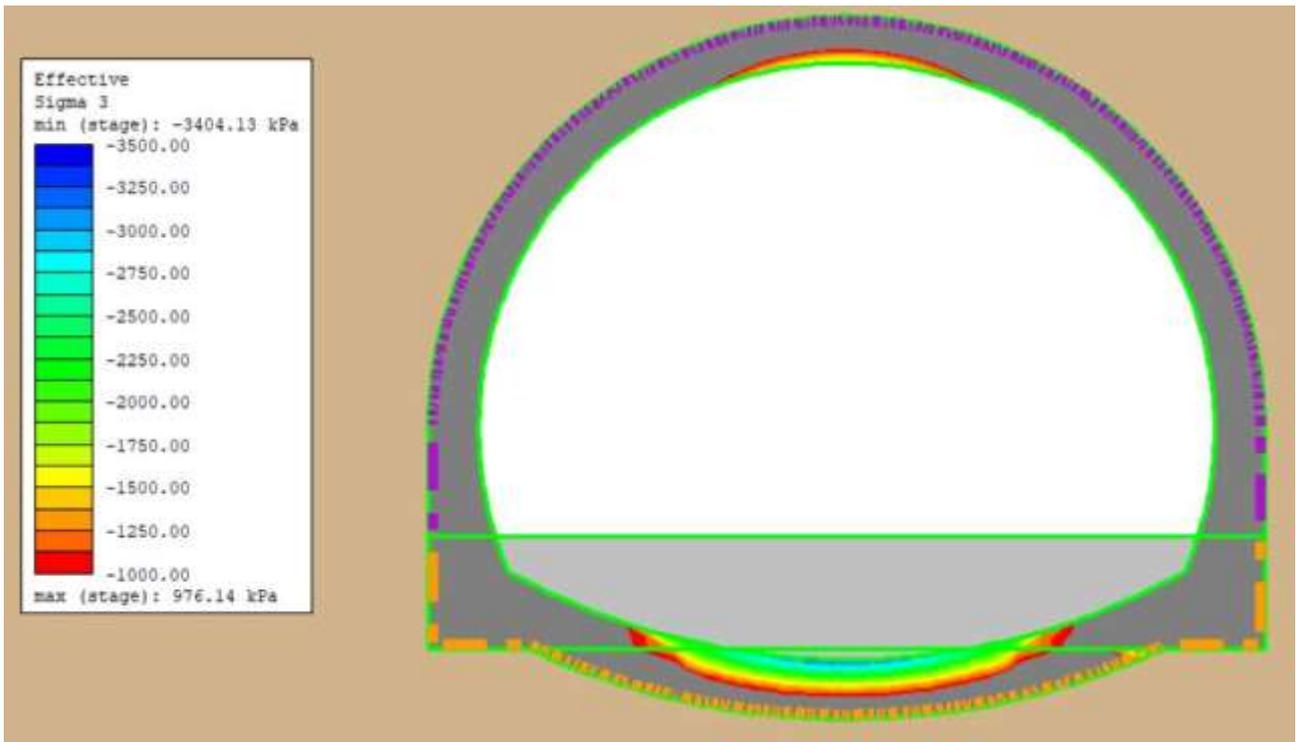


Figura 4.3.17 Tensioni di trazione configurazione m) (2D)

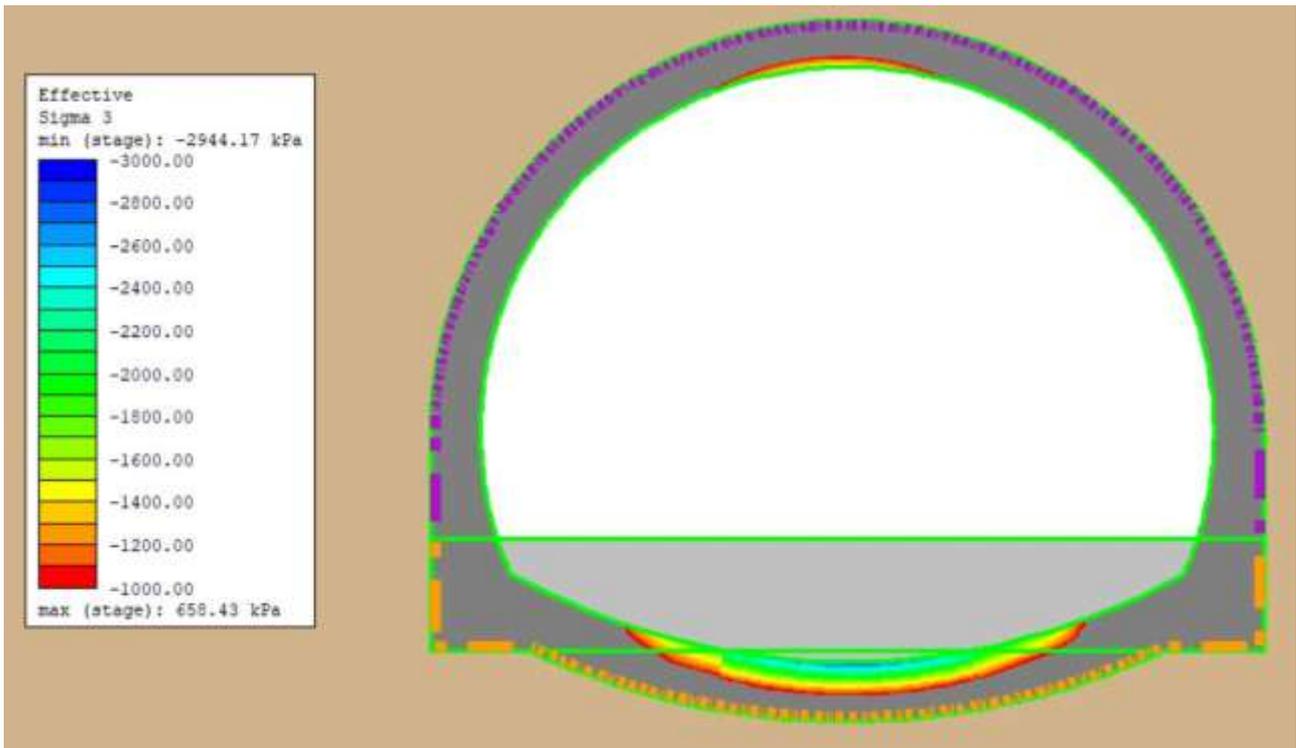


Figura 4.3.18 Tensioni di trazione configurazione n) (2D)

Si può notare come per le configurazioni *g*), *h*), *i*) (*Figure 4.3.13 – 4.3.15*) le zone interessate dalla trazione risultino uguali a quelle individuate dai modelli 3D (*Figure 4.3.2 – 4.3.4*), motivo per cui si può affermare che le fessure che nascono possono essere trasversali allo sviluppo della galleria e dunque contraddistinte da un'orientazione verticale. Per le configurazioni *k*), *m*), *n*) (*Figure 4.3.16 – 4.3.18*), invece, si individuano solo alcune zone in trazione in calotta dall'analisi 2D mentre nel modello 3D queste interessano sia i piedritti che la calotta della galleria nella parte in prossimità degli imbocchi, dove è stata realizzata la sezione trasversale (*Figure 4.3.5 – 4.3.7*). Dalle considerazioni precedenti si presume dunque che in calotta possano nascere fessure trasversali mentre sui piedritti fessure di altra natura, per cui orizzontali o diagonali.

Si sono riportati i risultati relativi alle sole configurazioni che generano valori di trazioni superiori a 1MPa. In *Allegato 1* si riportano le zone di trazione che si individuano nei modelli 3D per le altre configurazioni, in *Allegato 2* quelle individuate nei modelli 2D. È importante considerare e studiare anche queste altre configurazioni dal momento che variando le proprietà geomeccaniche dei terreni o l'inclinazione dell'interfaccia nelle configurazioni *a*), *b*), *c*), *d*), e le proprietà geomeccaniche dei terreni o la posizione/estensione della cavità nelle configurazioni *e*), *f*), *l*), si potrebbero sviluppare situazioni più gravose che comportano la nascita di fessure.

L'analisi parametrica presentata ha permesso di individuare le possibili cause che possono generare la nascita di fessure in galleria e di associare ad ognuna di esse la localizzazione, l'entità e l'orientazione delle fessure che possono generarsi. Si sottolinea nuovamente che questa parte dello studio non è legata ad una galleria reale ben precisa, ma è stata condotta in base a condizioni a contorno del tutto generali e arbitrarie.

Come descritto nel *Capitolo 4.2*, tale analisi è stata condotta avendo ipotizzato un peso specifico del terreno circostante pari al 5% di quello reale in modo tale da non incidere in maniera significativa sul rivestimento, dal momento che questo risulta pressoché scarico dai dati di monitoraggio acquisiti. Questa assunzione è basata sull'esperienza ed è usata in campo pratico quando si vogliono svolgere analisi 3D non rappresentando tutte le fasi di costruzione della galleria; nel caso di analisi 2D è molto più semplice e immediato andare a rappresentare le fasi costruttive e di conseguenza tale semplificazione è meno comune. Si decide comunque di indagare l'influenza di tale assunzione sui risultati ottenuti. A tal proposito, per alcune configurazioni si decide di creare nuovi modelli imponendo uno stato di sollecitazione sul rivestimento pari al 10% e al 20% del carico litostatico. Le zone interessate dalla trazione non cambiano, ciò che cambia è l'entità delle tensioni di trazione registrate sul contorno della galleria. I valori delle tensioni di trazione massimi registrati sono riportati analiticamente in [kPa] nella *Tabella 4.3.3* e graficamente nella *Figura 4.3.19*, in cui si può notare come vengono influenzati dallo stato di sollecitazione sul rivestimento che viene assunto.

Tabella 4.3.3 Influenza dello stato di sollecitazione sul rivestimento sulle tensioni di trazione

	Stato di sollecitazione sul rivestimento [%]		
	5	10	20
Configurazione f)	177,63	270,94	515,22
Configurazione g)	1766,02	1665,37	1670,36
Configurazione h)	2276,97	1946,76	2219,35

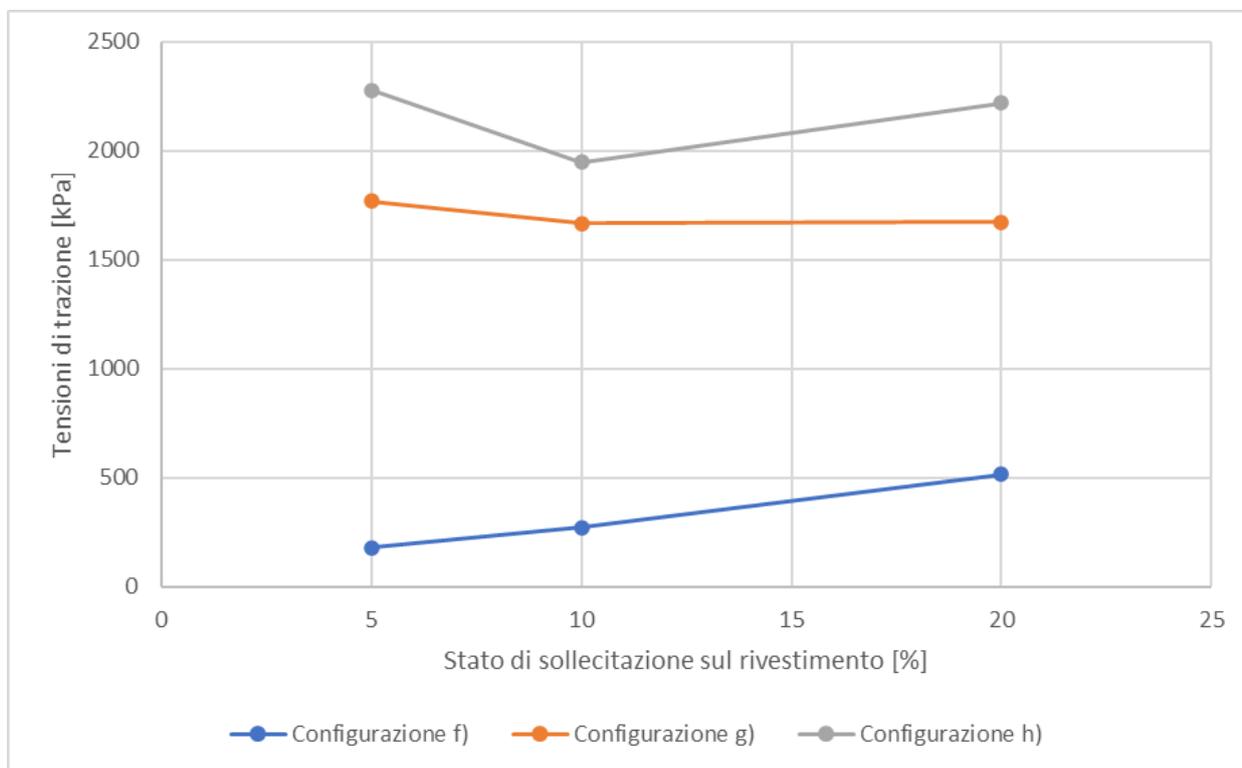


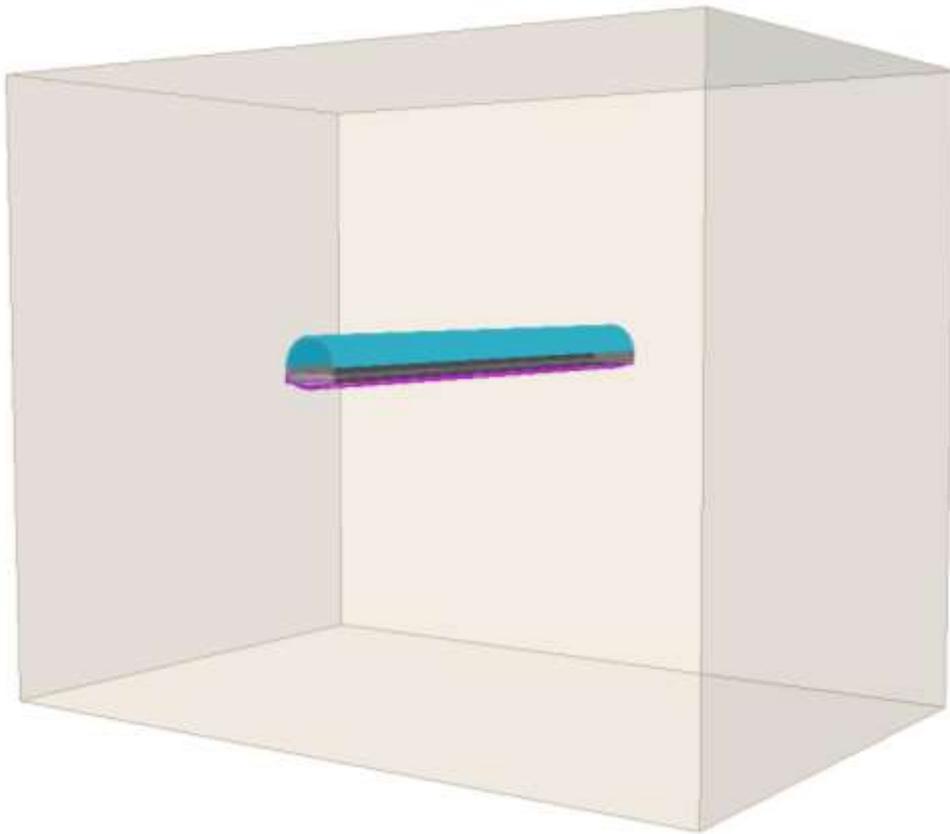
Figura 4.3.19 Influenza dello stato di sollecitazione sul rivestimento sulle tensioni di trazione

Dalla *Figura 4.3.19* si può notare come non si arriva ad una conclusione univoca e generale; lo stato di sollecitazione sul rivestimento che viene assunto influenza le tensioni di trazione in modo diverso a seconda del caso analizzato, e dunque dalle condizioni al contorno presenti. In particolare, nel caso della presenza di una cavità in corrispondenza del piedritto destro nella parte centrale del tratto analizzato (Configurazione *f*) si ha un incremento significativo delle tensioni di trazione all'aumentare del carico a cui è soggetto il rivestimento, mentre negli altri due casi, in cui si ha la presenza di un carico agente radialmente (Configurazione *g*) o orizzontalmente (Configurazione *h*) su metà galleria, l'influenza non è così rilevante e le tensioni di trazione massime si mantengono pressoché costanti ai valori ottenuti ipotizzando uno stato di sollecitazione sul rivestimento uguale al 5% del carico litostatico.

#### 4.4. Analisi parametrica – Applicazione dei risultati alla galleria esistente introdotta

Lo step successivo consiste in un processo che completa l'analisi parametrica svolta; in particolare, una volta individuati possibili cause ed effetti correlati, si considera nuovamente la galleria situata nel nord Italia introdotta all'inizio del *Capitolo 4* e, noti i dati di monitoraggio riguardanti le reali condizioni di fessurazione riscontrate in sito, si punta ad individuarne le possibili cause, validando così il modello proposto.

A tal proposito si posiziona la galleria alla profondità reale di 60m dal piano campagna, si settano nuovamente le reali proprietà dei rivestimenti definitivi presenti in calotta e in arco rovescio mentre si continuano a trascurare le fasi di scavo dal momento che si è interessati alla fessurazione della galleria in fase di esercizio e non alle fessure che potrebbero nascere immediatamente durante lo scavo per errori in fase di costruzione e messa in opera. Sia la rappresentazione del reale profilo della sezione trasversale del pendio al di sopra della galleria sia l'inclinazione con cui viene realizzata la galleria stessa vengono ritenuti aspetti poco rilevanti nella costruzione del modello e dunque trascurati; sia il piano campagna che la galleria vengono considerati orizzontali come mostrato nella *Figura 4.4.1*.

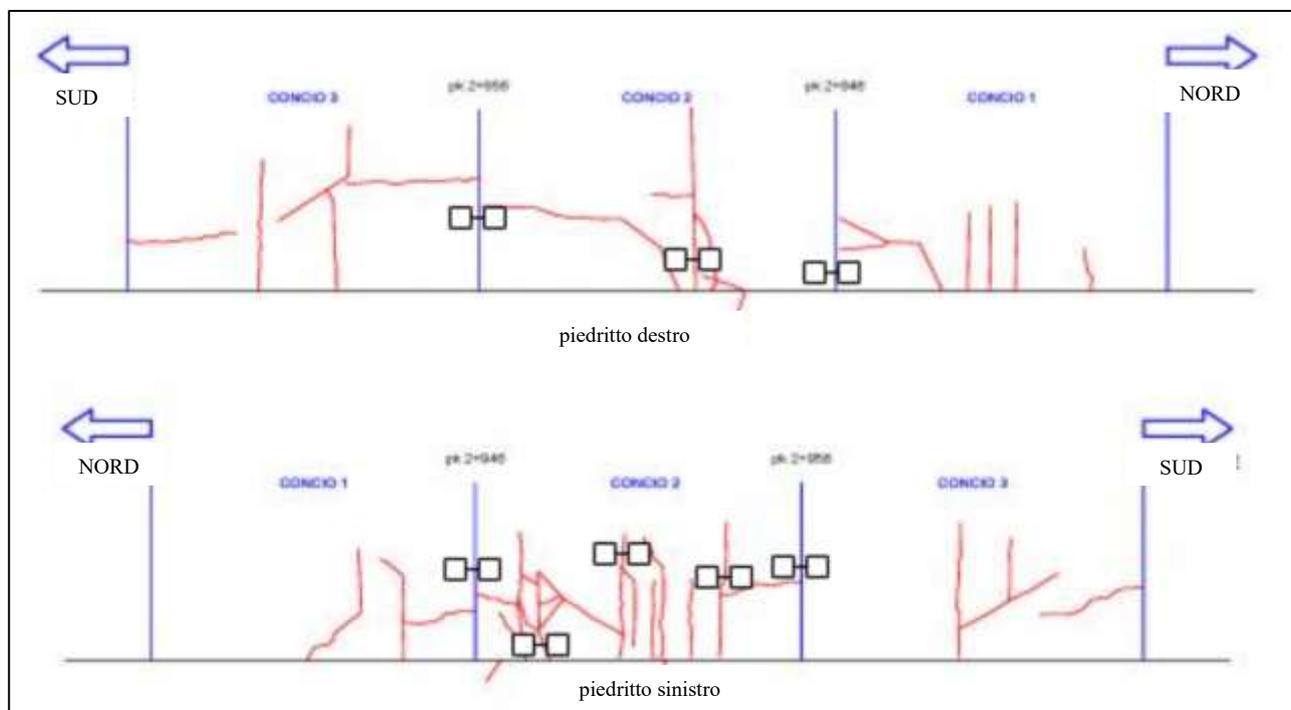


*Figura 4.4.1 Modello 3D rappresentativo del caso reale analizzato*

Dal momento che, dall'analisi parametrica si è osservato che i valori di tensione di trazione più elevati sono riconducibili alle situazioni in cui agiscono carichi di natura geostrutturale, e considerato che la presenza di interfacce, di cavità e di terreni con proprietà diverse da quelle considerate non sono condizioni caratteristiche del sito in esame, ci si focalizza sulle prime configurazioni, contraddistinte dai carichi, abbandonando le altre che possono portare a variazioni dello stato tensionale.

Si procede realizzando nuovi modelli in cui si varia l'entità e l'inclinazione del carico agente, applicandolo su metà galleria o su tutto il suo perimetro, supponendo che questo agisca dal basso verso l'alto o dall'alto verso il basso. Si ricerca una configurazione in cui "[...] Le fessure riscontrate si sviluppano prevalentemente sul paramento sx della galleria percorrendola in direzione Nord [...] Sul lato sx si individuano prevalentemente fessure verticali che partono dal piano di camminamento e proseguono verso la calotta. La loro ampiezza è massima in corrispondenza del piedritto, andando successivamente a diminuire salendo. È presente anche una fessura (con apertura ampia) trasversale al piano di camminamento nella zona compresa tra due fessure verticali che si sviluppano sui piedritti. Situazione leggermente diversa per il lato dx dove oltre ad alcune fessure verticali (del tutto simili a quelle riscontrate sul paramento sx) si individuano anche fessure orizzontali [...] Sulla calotta, guardando dal piano stradale, non si individuano fessure." [20]

La rappresentazione visiva del quadro fessurativo realmente monitorato viene fornita nella *Figura 4.4.2*.



*Figura 4.4.2 Quadro fessurativo monitorato della galleria in esame [20]*

Le diverse configurazioni di carico considerate sono riportate nella *Figura 4.4.3* ed elencate di seguito; si sottolinea che le configurazioni in cui il carico è diretto dal basso verso l'alto producono, come già appurato nella configurazione *i)* dell'analisi parametrica, alte tensioni di trazione principalmente in calotta, per cui vengono escluse in virtù della descrizione delle fessure ricercate.

- o) Carico di compressione pari a 500 kPa agente orizzontalmente
- p) Carico di compressione pari a 500 kPa agente con un angolo di 45° rispetto all'orizzontale
- q) Carico di compressione pari a 500 kPa agente con un angolo di 70° rispetto all'orizzontale
- r) Carico di compressione pari a 500 kPa agente con un angolo di 20° rispetto all'orizzontale
- s) Carico di compressione pari a 500 kPa da dx e 300 kPa da sx agente orizzontalmente
- t) Carico di compressione pari a 300 kPa da dx e 500 kPa da sx agente orizzontalmente

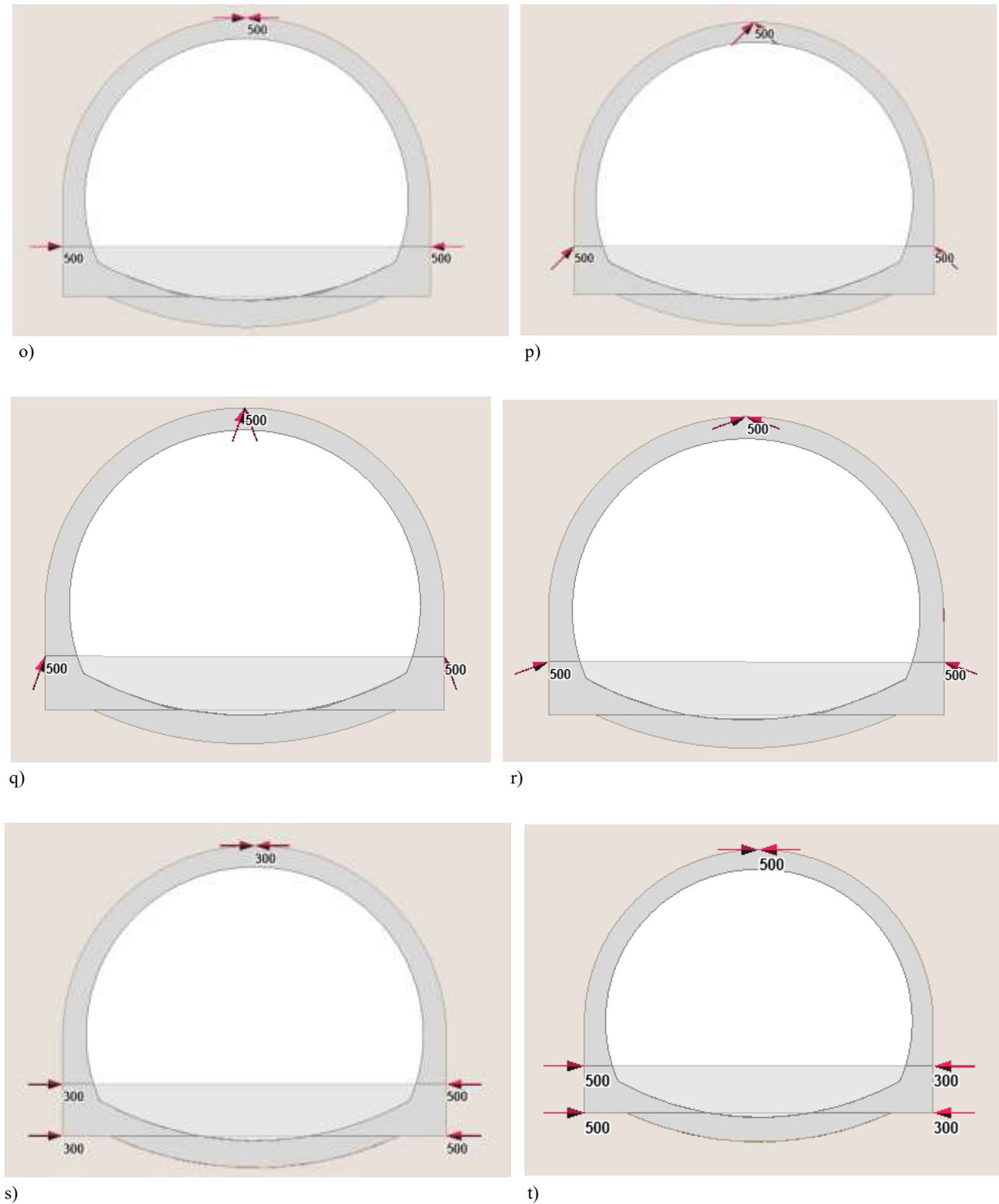


Figura 4.4.3 Configurazioni analisi caso reale

Al contrario, le seguenti configurazioni non producono risultati interessanti e da attenzionare per il caso in esame dal momento che portano ad alte tensioni di trazione principalmente in calotta (Figura 4.4.4).

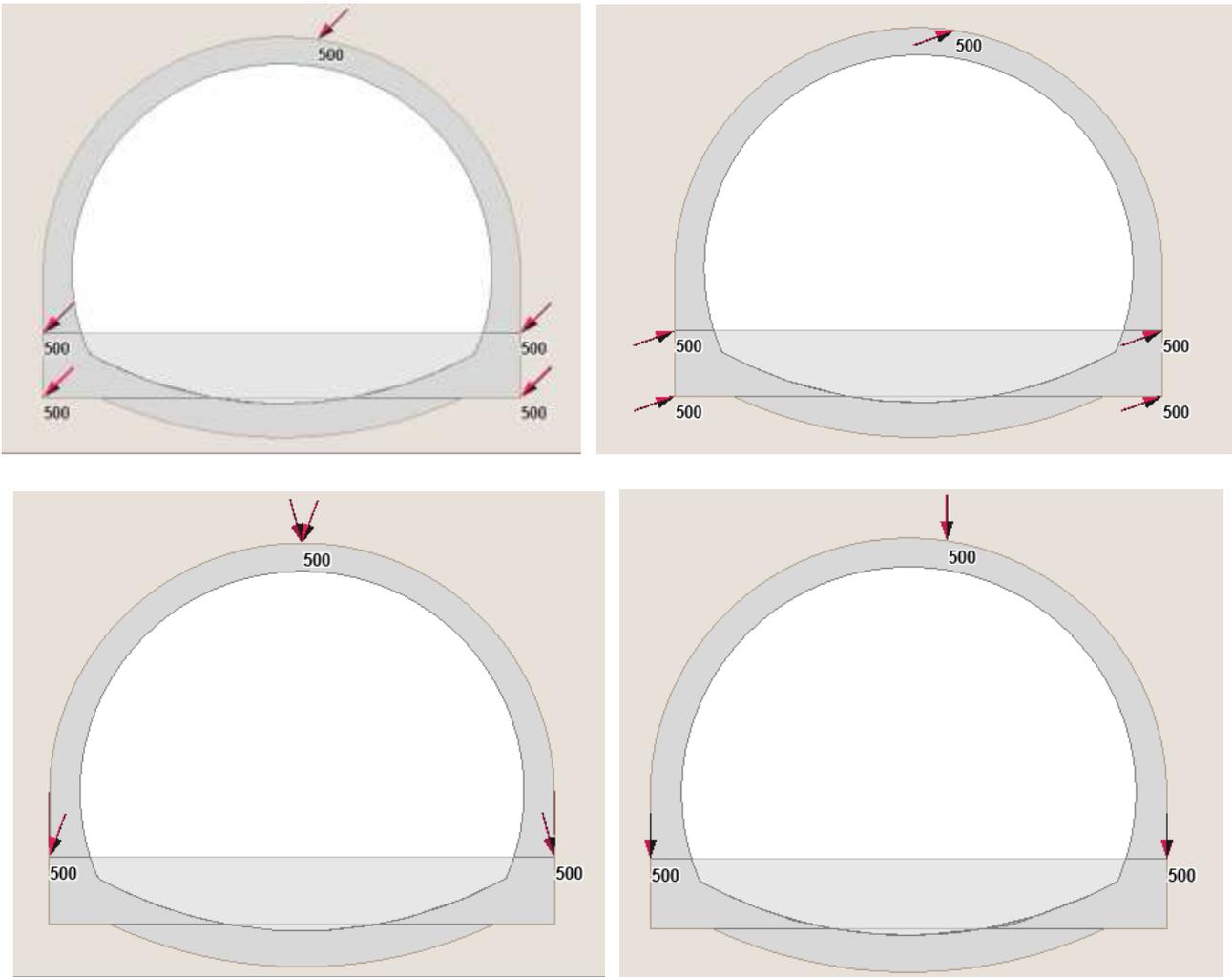


Figura 4.4.4 Configurazioni analisi caso reale non interessanti

Per le configurazioni ritenute congrue a rappresentare il caso reale, si riporta la localizzazione e l'orientazione delle zone in trazione sul contorno della galleria, ponendosi al suo interno. Come nel caso dell'analisi parametrica, si restringe il range dei valori di tensione visualizzati a quelli superiori, in valore assoluto, ad 1 MPa e che permettano di individuare le zone maggiormente influenzate in maniera chiara e precisa. Anche in questo caso i valori più elevati sono visualizzati in blu mentre quelli più bassi, e dunque più vicini ad 1 MPa, in rosso (Figure 4.4.5 – 4.4.10).

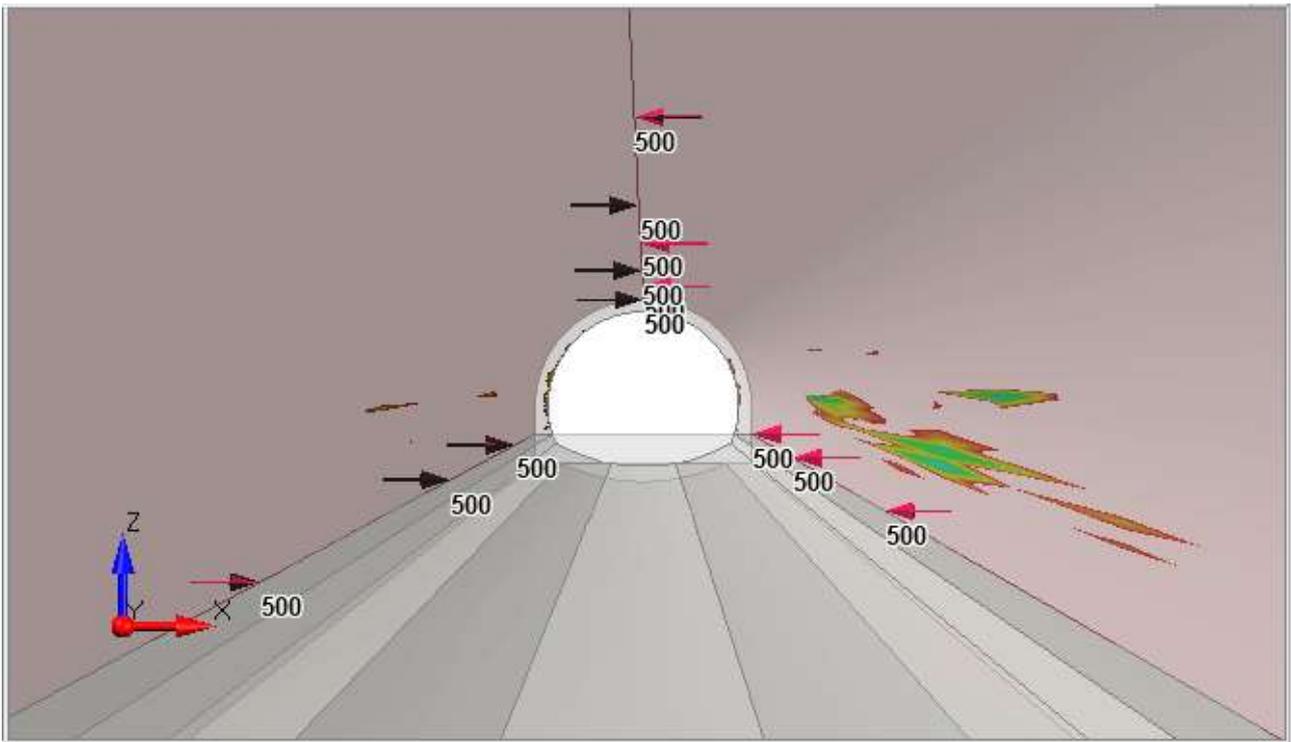


Figura 4.4.5 Tensioni di trazione configurazione o)

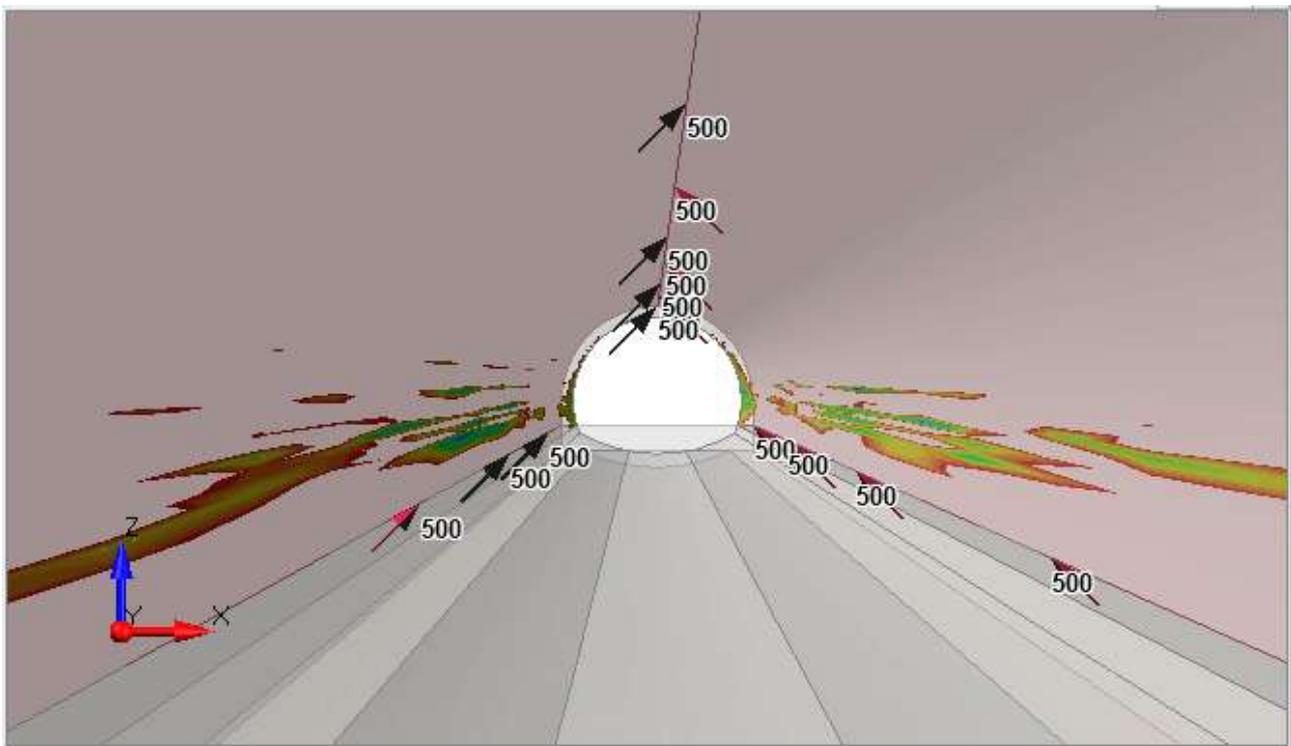


Figura 4.4.6 Tensioni di trazione configurazione p)

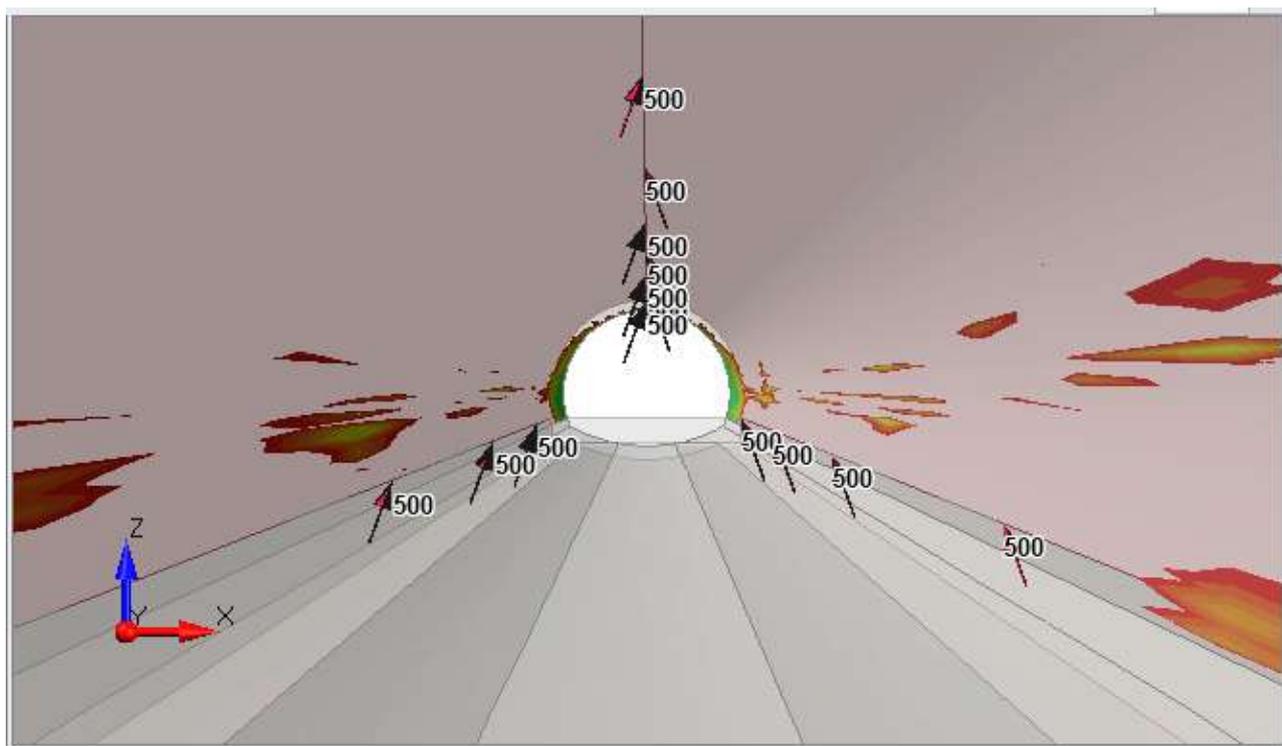


Figura 4.4.7 Tensioni di trazione configurazione q)

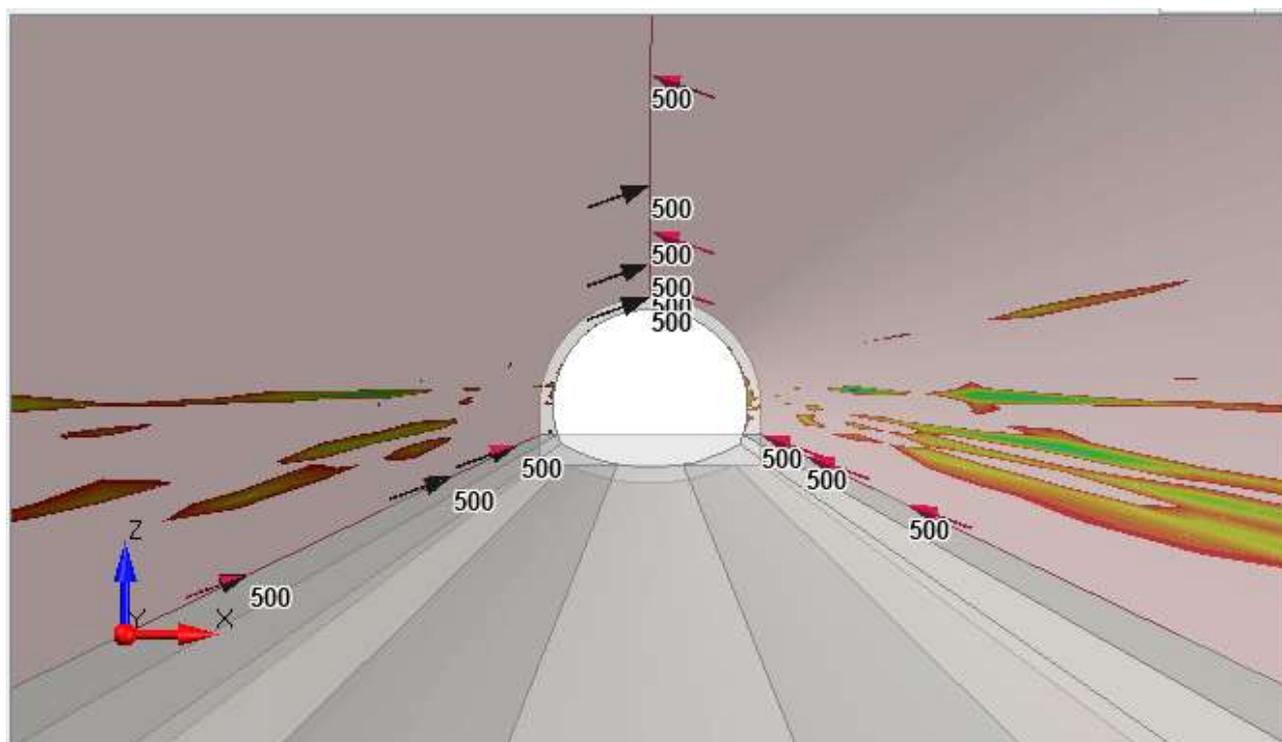


Figura 4.4.8 Tensioni di trazione configurazione r)

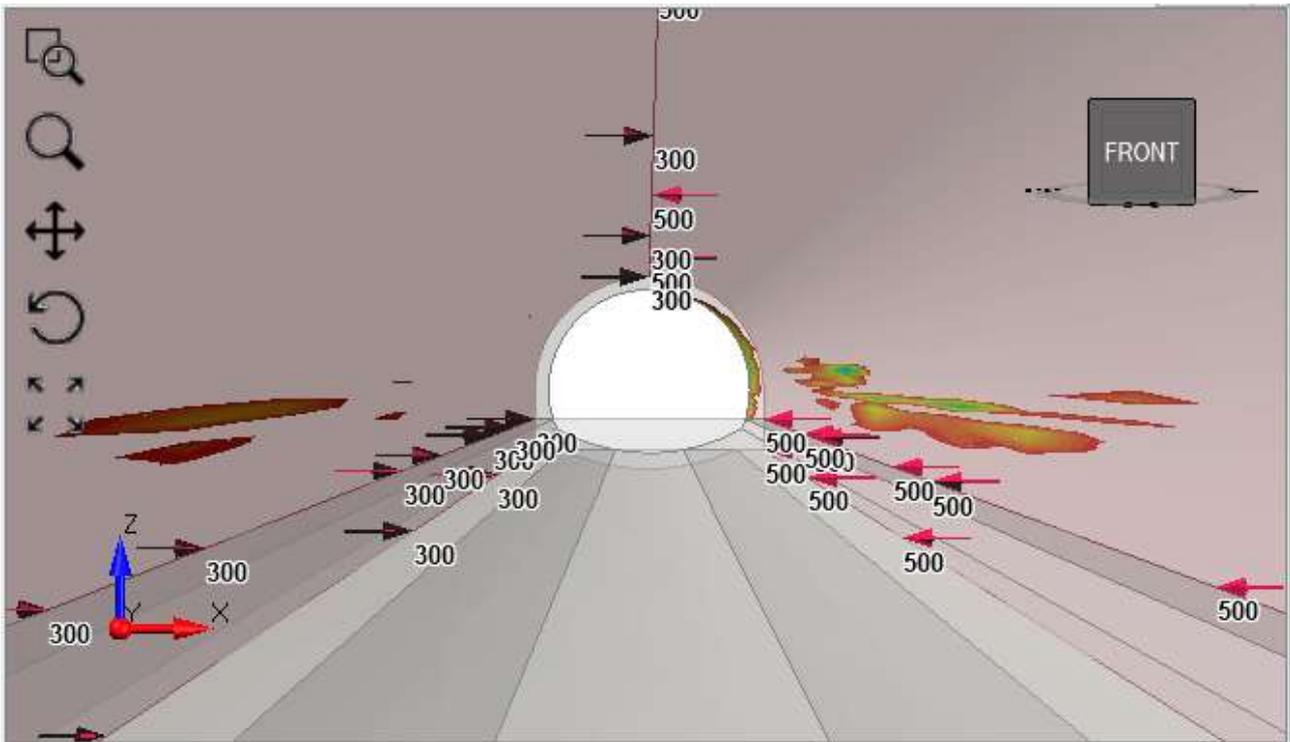


Figura 4.4.9 Tensioni di trazione configurazione s)

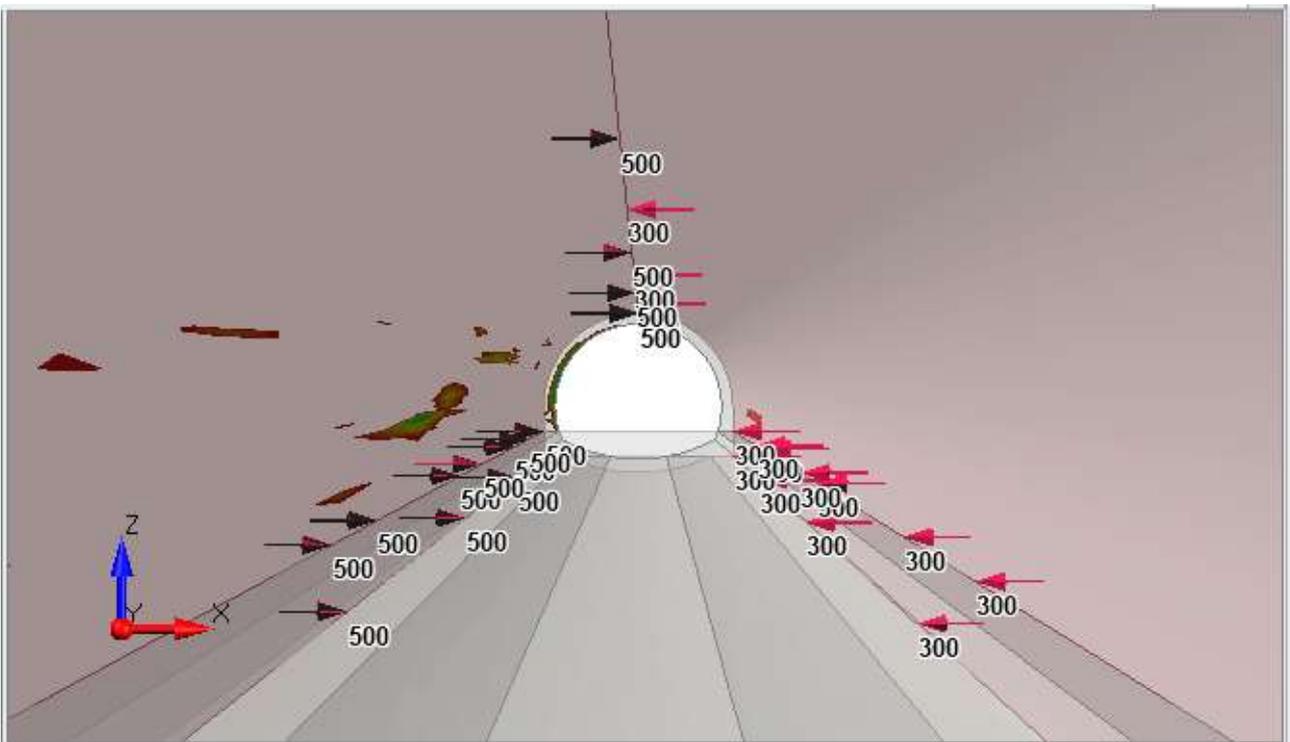


Figura 4.4.10 Tensioni di trazione configurazione t)

Come si evince dai risultati mostrati nelle *Figure 4.4.5 – 4.4.10*, se il carico agente è costante lungo tutto il perimetro della galleria (configurazioni *o*), *p*), *q*), *r*)) si creano zone di trazione sia sul piedritto sx che su quello dx, di entità e orientazione differente, a prescindere dall'inclinazione del carico. Nel caso in cui su metà galleria agisca un carico superiore rispetto all'altra metà (configurazioni *s*) e *t*)), il lato influenzato dalle più alte tensioni di trazione è quello soggetto al carico più elevato; nei casi specifici il lato dx nella configurazione *s*) e il lato sinistro nella configurazione *t*).

Si procede nell'individuazione delle orientazioni delle fessure attraverso le due analisi in parallelo utilizzate nell'analisi parametrica; si comincia da quella che indaga la possibile formazione di fessure longitudinali e si ricercano nel software i valori di  $\sigma_3$  e  $\sigma_{YY}$  per confrontarli. Nella *Tabella 4.4.1* si riporta il confronto tra i valori minimi assoluti e i più bassi presenti in una parte significativa di galleria per le varie configurazioni adottate.

*Tabella 4.4.1 Confronto tra i valori di  $\sigma_3$  e  $\sigma_{YY}$  per le varie configurazioni adottate*

	$\sigma_3$ [kPa]		$\sigma_{YY}$ [kPa]	
	min,ass	min	min,ass	min
Configurazione o)	-3114,72	-1359,49	-538,59	-220,90
Configurazione p)	-4314,33	-3071,32	-1958,60	-410,36
Configurazione q)	-5934,43	-3084,24	-3456,02	-511,27
Configurazione r)	-3727,72	-1777,92	-853,77	-395,41
Configurazione s)	-5425,52	-2307,48	-1219,64	-328,13
Configurazione t)	-4474,38	-1304,07	-2905,37	-234,65

Successivamente si procede con la seconda analisi che indaga la possibile formazione di fessure trasversali attraverso la realizzazione di una sezione trasversale nel modello 3D in corrispondenza delle zone in cui si rilevano le maggiori concentrazioni di trazione e la verifica che le zone interessate sul contorno della galleria siano uguali nei modelli 2D e 3D. In base alla descrizione delle fessure che si stanno ricercando, prevalentemente verticali e localizzate sui piedritti, e ai risultati mostrati nelle *Figure 4.4.5 -4.4.10* che mostrano le zone interessate dalla trazione nei diversi modelli realizzati, la configurazione che fornisce la localizzazione più precisa e su cui ci si concentra è la configurazione *r*), quella caratterizzata da un carico di compressione pari a 500 kPa agente con un angolo di 20° rispetto all'orizzontale. Realizzata una sezione trasversale, nella *Figura 4.4.11* si riportano le zone in trazione rilevate nel modello 2D.

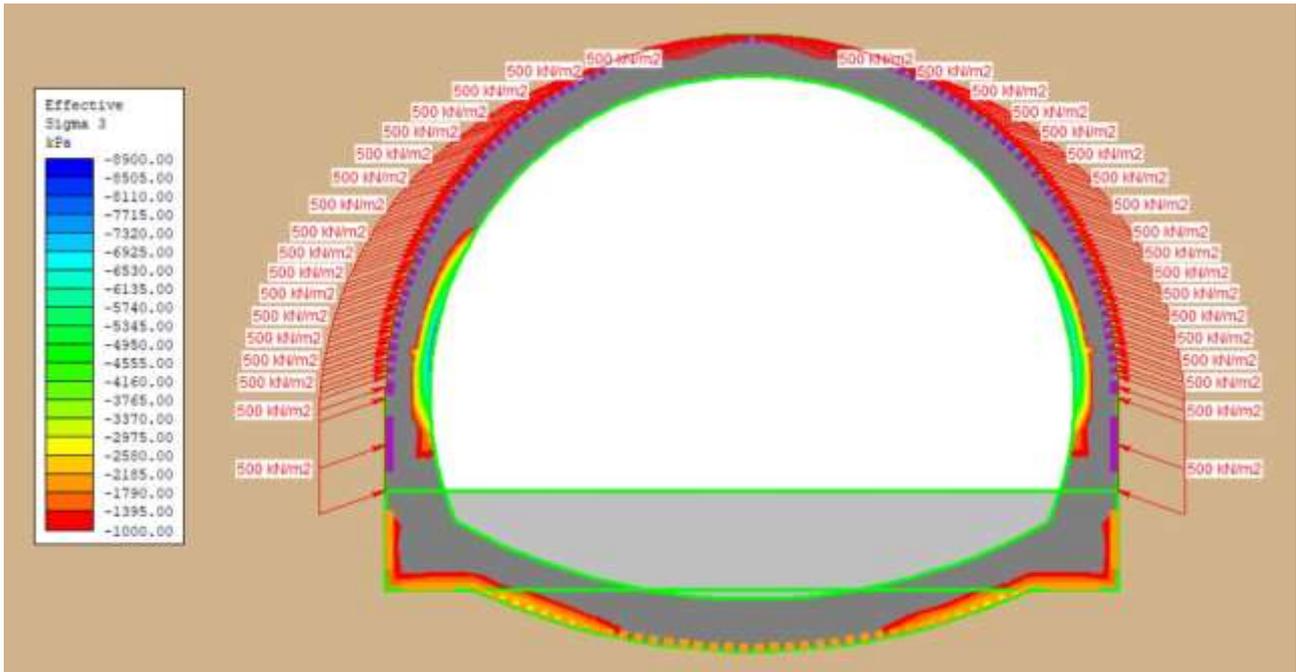


Figura 4.4.11 Tensioni di trazione configurazione r) (2D)

Si può notare come le zone interessate dalla trazione risultino uguali a quelle individuate nel modello 3D (Figura 4.4.8), motivo per cui si può affermare che le fessure che nascono sui piedritti sono trasversali allo sviluppo della galleria e dunque contraddistinte da un'orientazione verticale. Per quanto riguarda le poche fessure orizzontali riscontrate in sito, queste potrebbero essere dovute a variazioni di carichi geostrutturali lungo lo sviluppo longitudinale della galleria o presenza di cavità localizzate, aspetti che comunque comportano una non uniformità lungo la direzione di sviluppo. Si escludono invece carichi non uniformi distribuiti in superficie perché spesso questi comportano zone in trazione anche in calotta.

In virtù di queste considerazioni si può ipotizzare che nel tratto di galleria analizzata agiscano dei carichi leggermente più elevati sul lato sx della galleria percorrendola in direzione Nord, dal momento che risulta quello in cui viene riscontrata la presenza di più fessure verticali, che questi carichi abbiano una direzione rivolta dal basso verso l'alto, ma comunque non molto distante dall'orizzontale, e che possano esserci delle non uniformità in termini di carichi e/o vincoli lungo lo sviluppo longitudinale della galleria.

## 5. Conclusioni

Il presente elaborato di tesi riporta uno studio condotto allo scopo di contribuire all'individuazione delle cause che possono generare uno stato di fessurazione del rivestimento di una galleria, osservabile durante un'ispezione di controllo. A tal fine si conducono analisi numeriche agli elementi finiti di tipo parametrico, realizzando modelli 2D e 3D attraverso l'utilizzo dei softwares *RS2* e *RS3* prodotti da *Rocscience*, variando le condizioni di stato tensionale e di carico nell'intorno di una galleria e cercando di associare a ciascuna configurazione una localizzazione e un'orientazione delle fessure che possono nascere. Si decide di prendere come riferimento una galleria esistente, situata nel nord Italia, i cui lavori di adeguamento sono stati commissionati alla Società di Ingegneria *AK Ingegneria Geotecnica Srl*, in modo tale da avere una geometria, un contesto geologico, dei parametri meccanici, delle proprietà del rivestimento, degli stati di sollecitazione realistici.

Una prima analisi parametrica viene condotta sulla base di condizioni al contorno che rappresentano condizioni di sollecitazione che possono verificarsi usualmente in galleria e prescindono dalle caratteristiche della singola galleria. Per ognuna delle configurazioni analizzate vengono individuate le aree interessate da fessure, viene fornito un quadro fessurativo che descrive la più probabile orientazione di tali fessure, orizzontale, verticale o diagonale, vengono proposti alcuni possibili interventi atti al ripristino del rivestimento e/o all'impermeabilizzazione della galleria per i diversi quadri fessurativi individuati (*Allegato 3*). Si sottolinea che i risultati sono ottenuti per le specifiche condizioni al contorno analizzate e che andrebbero integrati con un numero significativo di altri scenari, al fine di acquisire una maggiore generalità. In base ai risultati ottenuti si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- In presenza di carichi di natura geostrutturale agenti su una metà di galleria, le zone maggiormente influenzate dalla trazione risultano la calotta sul lato caricato e il piedritto opposto al carico agente, con fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria e dunque orientate verticalmente.
- In presenza di carichi di natura geostrutturale agenti sull'arco rovescio della galleria, la zona maggiormente influenzata dalla trazione risulta la calotta, con fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria.
- In presenza di carichi non uniformi distribuiti in superficie, in calotta si sviluppano fessure con orientazione trasversale mentre sui piedritti fessure con orientazione longitudinale, dunque orizzontali, soprattutto nel caso in cui la variazione del carico sia nella direzione di sviluppo longitudinale della galleria.
- In presenza di un'interfaccia che attraversa la sezione trasversale della galleria che separa due terreni diversi, uno con modulo di Young superiore di 2 ordini di grandezza rispetto all'altro, le zone maggiormente influenzate dalla trazione risultano la calotta e quelle di intersezione con l'interfaccia, in corrispondenza delle quali si ha la variazione di terreno, con orientazione trasversale allo sviluppo della galleria.
- In presenza di una cavità nei pressi della galleria che si sviluppa localmente in direzione longitudinale, le zone maggiormente influenzate dalla trazione risultano quelle in prossimità della cavità e la calotta, con orientazione longitudinale allo sviluppo della galleria.

- Si sviluppano fessure longitudinali all'asse della galleria, dunque orizzontali, nel caso in cui siano presenti condizioni che comportano non uniformità lungo il suo sviluppo longitudinale; in caso contrario le fessure sono prevalentemente verticali.
- Anche la rotazione della sezione trasversale può portare alla nascita di fessure e questa risulta più accentuata nelle configurazioni contraddistinte dalla presenza di un'interfaccia che divide due tipologie diverse di terreno o di un carico agente esclusivamente su metà galleria.
- Gli interventi da attuare per il ripristino del rivestimento sono il blindaggio e l'alesaggio nel caso di fessurazione diffusa, il consolidamento al contorno nel caso della presenza di cavità o di materiale scadente sul contorno della galleria, la bullonatura/tirantatura nel caso di convergenze importanti, l'installazione di reti inox/ reti in carbonio o la sigillatura con malte cementizie nel caso di fessure locali, l'installazione di membrane in PVC per l'impermeabilizzazione e il drenaggio della galleria.

I risultati ottenuti sono poi validati mediante una seconda analisi specifica della galleria scelta come caso studio, in cui, noti i dati di monitoraggio riguardanti le reali condizioni di fessurazione riscontrate in sito, si punta ad individuarne le possibili cause. Un'altra considerazione che può essere fatta in virtù di questa seconda analisi è la seguente:

- In presenza di carichi di natura geostrutturale costanti lungo tutto il perimetro della galleria, si creano zone di trazione sia sul piedritto sx che su quello dx, di entità e orientazione differente, a prescindere dall'inclinazione del carico. In presenza di un carico di entità superiore su metà galleria rispetto all'altra metà, invece, il lato influenzato dalle più alte tensioni di trazione è quello soggetto al carico più elevato.

Dai dati di monitoraggio riguardanti le reali condizioni di fessurazione riscontrate in sito e dalla nota tecnica di un sopralluogo effettuato in galleria si ricerca una configurazione in cui: “[...] *Le fessure riscontrate si sviluppano prevalentemente sul paramento sx della galleria percorrendola in direzione Nord [...] Sul lato sx si individuano prevalentemente fessure verticali che partono dal piano di camminamento e proseguono verso la calotta. La loro ampiezza è massima in corrispondenza del piedritto, andando successivamente a diminuire salendo. È presente anche una fessura (con apertura ampia) trasversale al piano di camminamento nella zona compresa tra due fessure verticali che si sviluppano sui piedritti. Situazione leggermente diversa per il lato dx dove oltre ad alcune fessure verticali (del tutto simili a quelle riscontrate sul paramento sx) si individuano anche fessure orizzontali [...] Sulla calotta, guardando dal piano stradale, non si individuano fessure.*” [20]

In virtù di tutte le considerazioni effettuate precedentemente e conducendo altre analisi specifiche del caso in esame, si può ipotizzare che nel tratto di galleria analizzata agiscano dei carichi leggermente più elevati sul lato sx della galleria percorrendola in direzione Nord, dal momento che risulta quello in cui viene riscontrata la presenza di più fessure verticali, che questi carichi abbiano una direzione rivolta dal basso verso l'alto, ma comunque non molto distante dall'orizzontale, e che possano esserci delle non uniformità in termini di carichi e/o vincoli lungo lo sviluppo longitudinale della galleria.

In virtù dell'osservazione sottolineata precedentemente, ovvero che i risultati sono ottenuti per le specifiche condizioni al contorno analizzate e che andrebbero generalizzati quanto più possibile, i possibili sviluppi futuri di questo lavoro di ricerca potrebbero riguardare l'integrazione di questi risultati attraverso la realizzazione di un numero significativo di altri modelli che indagano altre configurazioni di carico e di variazione di stato tensionale. Si potrebbero variare anche i parametri geomeccanici e la stratigrafia del modello, mantenendo fisse invece le caratteristiche geometriche della galleria e le proprietà meccaniche del rivestimento. Come fatto per lo studio in esame si potrebbe poi integrare l'analisi partendo dai reali quadri fessurativi di una moltitudine di gallerie esistenti e verificando che esista una corrispondenza tra quanto ipotizzato e quanto riscontrato realmente in sito. Si punta dunque al completamento di uno schema attraverso il quale si possa associare in maniera attendibile una particolare tipologia di fessura osservata in sito a delle specifiche condizioni al contorno e viceversa. Un altro aspetto fondamentale da indagare è quello che riguarda la valutazione dell'efficienza dei possibili interventi proposti per le varie configurazioni. Questo studio rappresenta solo il primo step nello studio di un tema particolarmente importante per il futuro, quello di comprendere il complesso meccanismo della genesi delle fessure nei rivestimenti definitivi delle gallerie.



## Bibliografia

- [1] Centre d'Études des Tunnels (2015), *Road tunnel civil engineering inspection guide – Book 1: from disorder to analysis, from analysis to rating*, Bron, France
- [2] Centre d'Études des Tunnels (2015), *Road tunnel civil engineering inspection guide – Book 2: Catalogue of deteriorations*, Bron, France
- [3] U.S.Department of Transportation – Federal Highway Administration (2015), *Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation (TOMIE) Manual*, Washington DC, U.S.A.
- [4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Direzione generale per la vigilanza sulle concessionarie autostradali (2020), *Manuale Ispezione Gallerie*, Roma, Italy
- [5] J.A. Richards (1998), *Inspection, Maintenance and Repair of Tunnels: International Lessons and Practice*, Elsevier Science Ltd, Johannesburg, South Africa
- [6] F. Barpi, D. Peila (2012), *Influence of the Tunnel Shape on Shotcrete Lining Stresses*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Torino, Italy
- [7] V. Francani, C. Rampolla (2013), *Appunti di geologia applicata: Le gallerie*, Cap. 5, Milano, Italy
- [8] L. Scesi, M. Papini, P. Gattinoni (2003), *Geologia applicata: Applicazione ai progetti di ingegneria civile*, Vol. 2, Milano, Italy
- [9] M. Barbero, *Course of Analysis and design of geotechnical structures and earthworks*, A.A. 2019/2020, Torino, Italy
- [10] M. Barla, *Course of Numerical methods in geotechnical engineering*, A.A. 2020/2021, Torino, Italy
- [11] M. Barla (2010), *Elementi di Meccanica e Ingegneria delle Rocce*, Celid, Torino, Italy
- [12] R. K. Goel, B. Singh, J. Zhao (2012), *Underground infrastructures: planning, design, and construction*, Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.
- [13] V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab, S. Xu (2007), *Mechanized Tunneling in Urban Areas: design methodology and construction control*, Taylor&Francis, London, U.K.
- [14] M. Tanzini (2006), *Gallerie: aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, Italy
- [15] P. Lunardi (2000), *The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils*, T&T International ADECO-RS Approach, Milano, Italy
- [16] ANAS S.p.A. (Gruppo FS Italiane) (2018), *I quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture*, Vol. IX, Italy
- [17] U.S.Department of Transportation – Federal Highway Administration (2019), *Reference Guide for Load Rating of Tunnel Structures*, Washington DC, U.S.A.
- [18] *Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018)*. D.M. Infrastrutture e Trasporti 17 gennaio 2018
- [19] *Circolare esplicativa n.7 del Febbraio 2019*

[20] Materiale confidenziale fornito da *AK Ingegneria Geotecnica Srl*

[21] *UNI EN 1504-5:2005*

## Sitografia

[S1] <http://www.dimms.eu>

[S2] <https://www.socotec.it>

[S3] <https://www.stradeeautostrade.it>

[S4] <https://www.ecobeton.it>

[S5] <https://www.roscience.com/help/rs2>

[S6] <https://www.roscience.com/help/rs3>

[S7] <https://www.epiroc.com>

[S8] <http://scfsrl.net>

[S9] <https://www.teknoring.com>

[S10] <https://www.harpogroup.it>



# Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, desidero menzionare tutte le persone che hanno contribuito al raggiungimento di questo importante traguardo, la Laurea Magistrale in Ingegneria Civile al Politecnico di Torino.

Innanzitutto, ringrazio il mio relatore Monica Barbero per la sua disponibilità e professionalità, per aver creduto in me e nelle mie potenzialità e per avermi introdotto in una realtà professionale come AK Ingegneria Geotecnica S.r.l., società in cui ho svolto il tirocinio curriculare, prima, e la tesi aziendale, a seguire.

Ringrazio i miei correlatori Fabrizio Barpi e Lorenzo Milan, sempre pronti e disponibili a darmi i giusti suggerimenti in ogni fase della realizzazione dell'elaborato.

Un ringraziamento particolare va al mio correlatore esterno Georgios Kalamaras per avermi offerto il suo appoggio durante questo periodo, per aver messo a mia disposizione la sua esperienza e le sue conoscenze in ambito ingegneristico, per aver creduto in me fino all'ultimo giorno di lavoro.

Grazie ai miei amici e colleghi di Palermo e di Torino per aver contribuito a rendere più semplice e piacevole il mio percorso di studi, per essere stati presenti durante questi anni.

Grazie alla mia ragazza per essermi stata vicino in questo percorso, per tutti i momenti condivisi, di confronto e di supporto, di studio e di spensieratezza, grazie per tutto il tempo trascorso insieme.

Grazie ai miei familiari per l'enorme fiducia e stima che hanno sempre mostrato nei miei confronti, per il loro sostegno, per esserci sempre.

Un ringraziamento immenso va ai miei genitori, è grazie a loro che ho potuto intraprendere questo percorso di studi e portarlo a termine, non riuscirò mai a ringraziarli abbastanza per tutto ciò che hanno sempre fatto per me. Grazie a mio fratello per la stima, il sostegno e i consigli "a distanza", l'essere a Torino oggi è un po' anche merito suo.

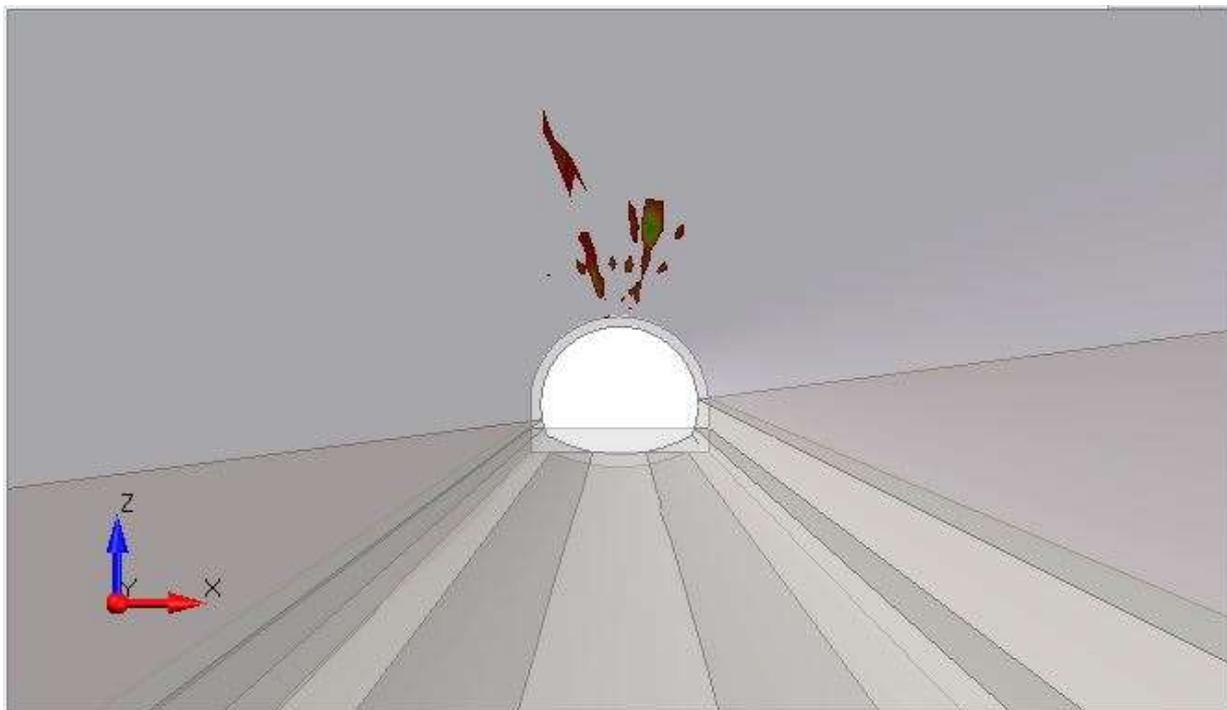
Un ultimo riconoscimento va a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi hanno permesso di arrivare fin qui, al mio credere sempre che "se lo vuoi, tutto è possibile".

Lorenzo Lo Giudice

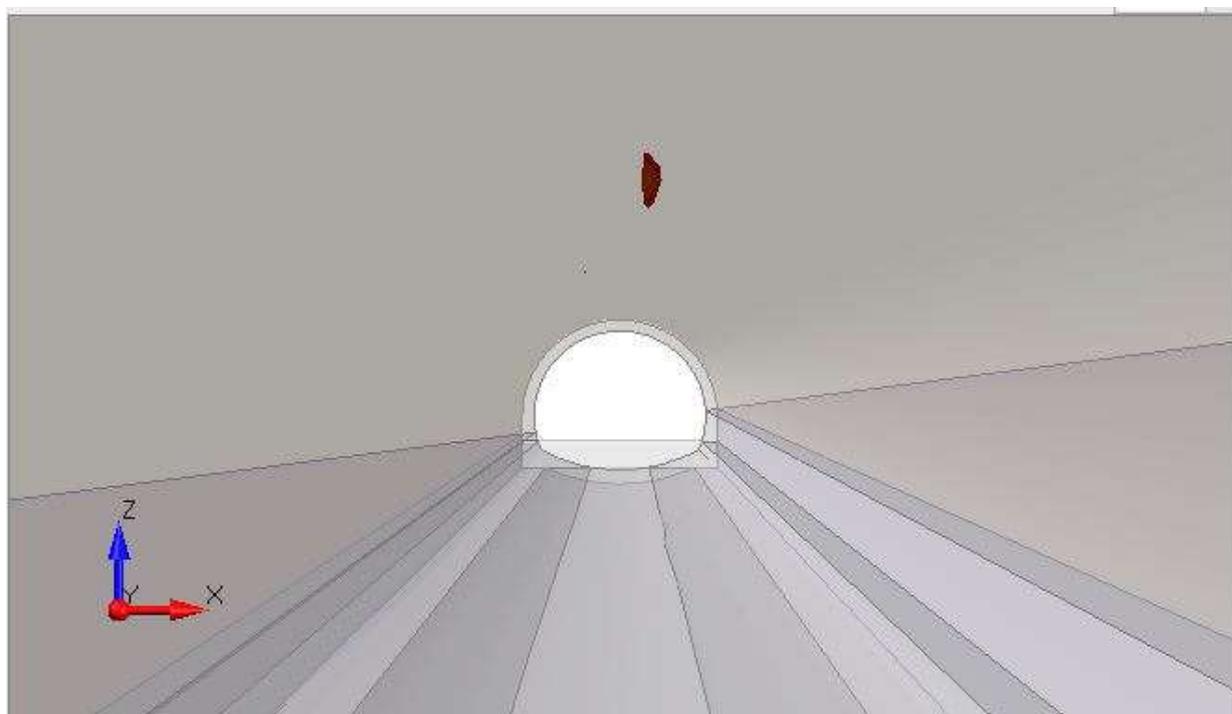


# Allegati

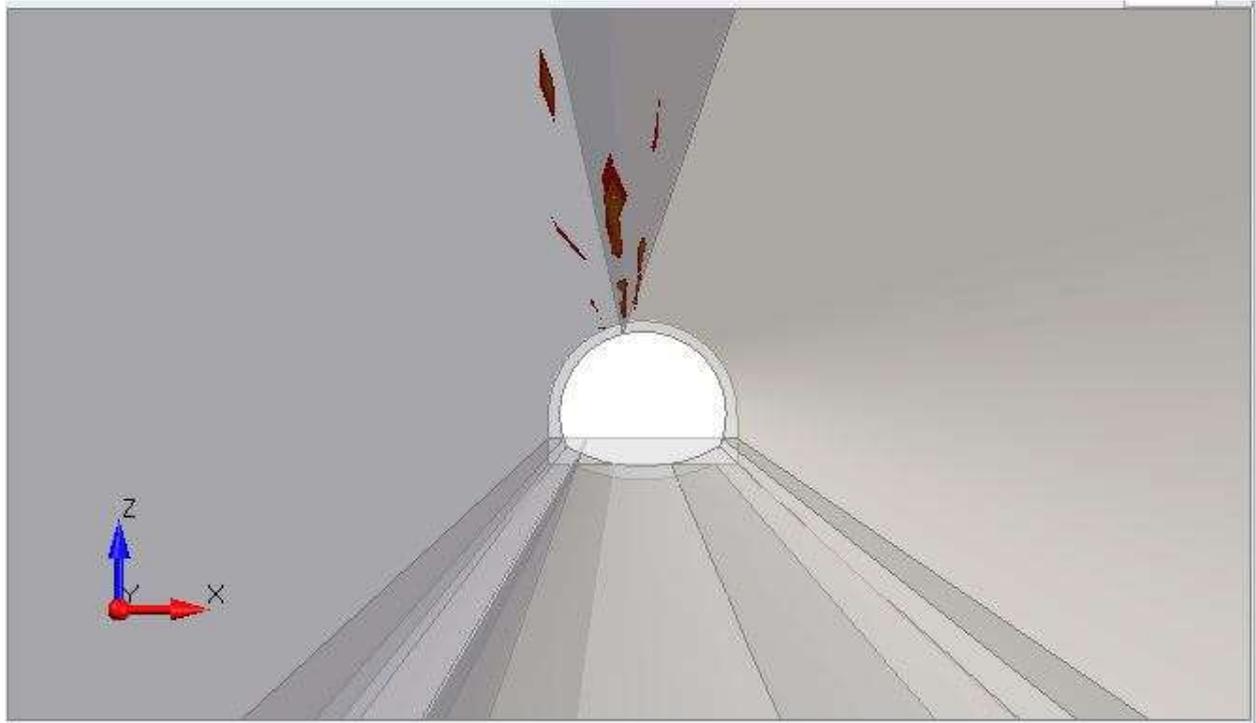
## Allegato I Zone di trazione modelli 3D



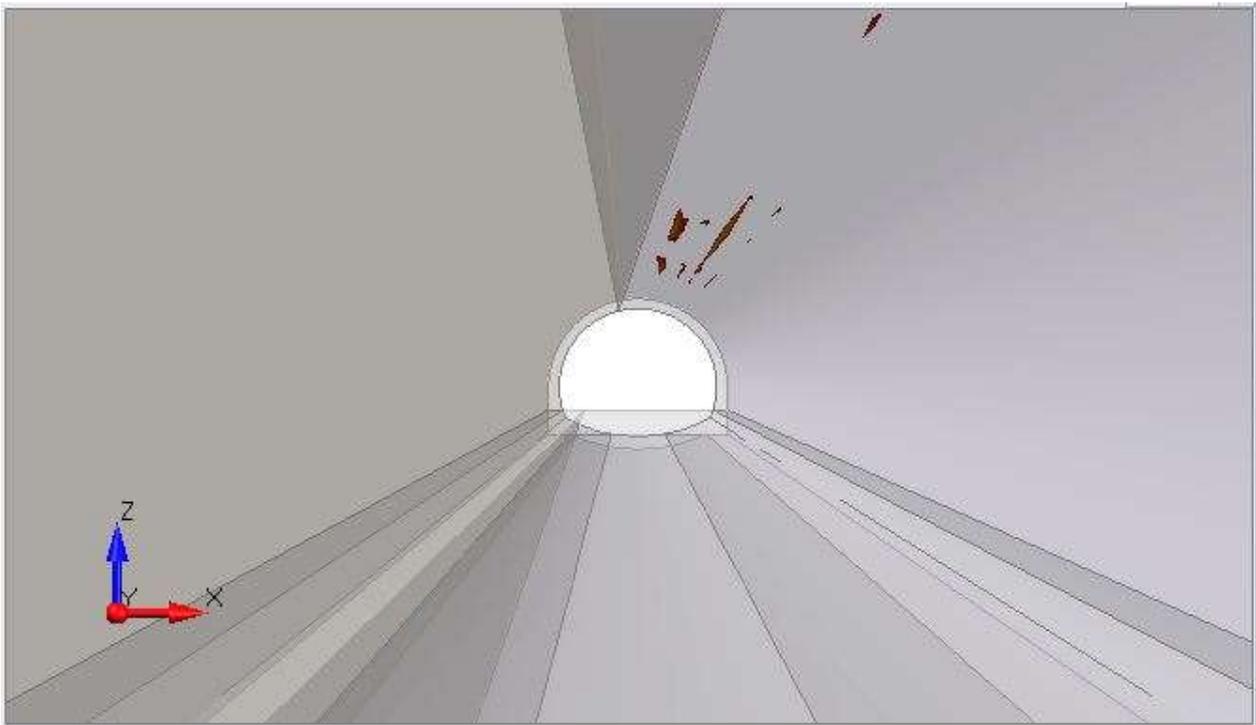
*Tensioni di trazione configurazione a)*



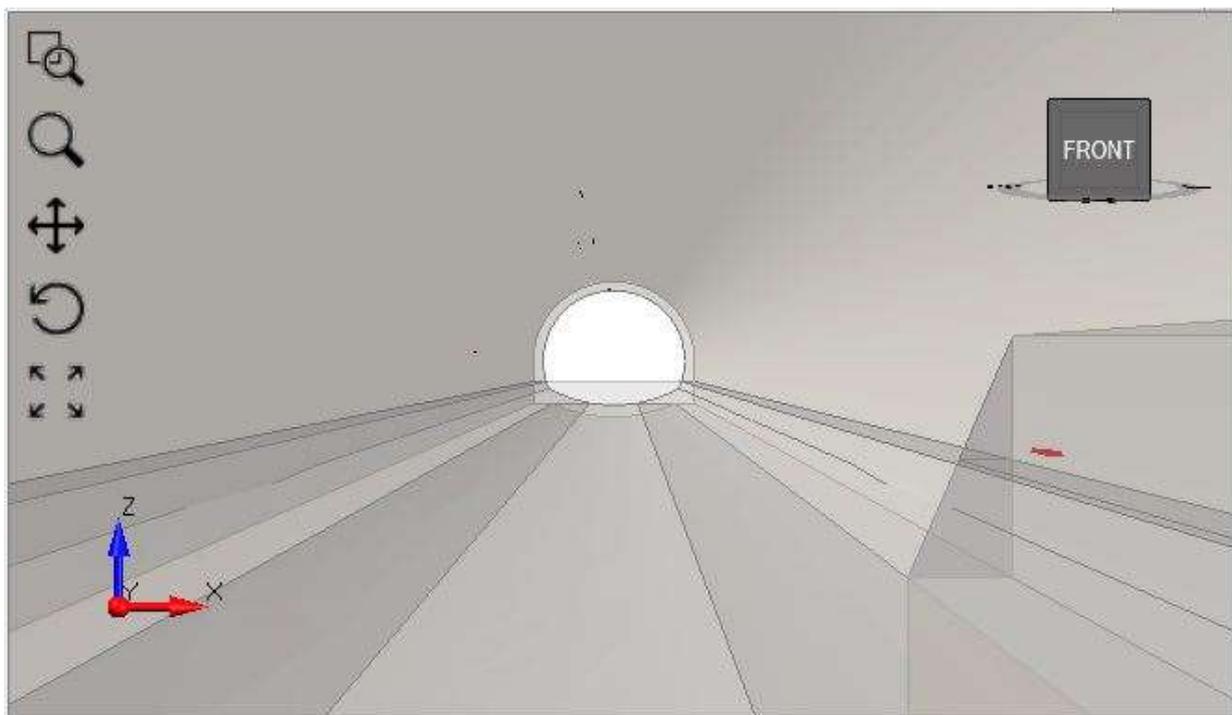
*Tensioni di trazione configurazione b)*



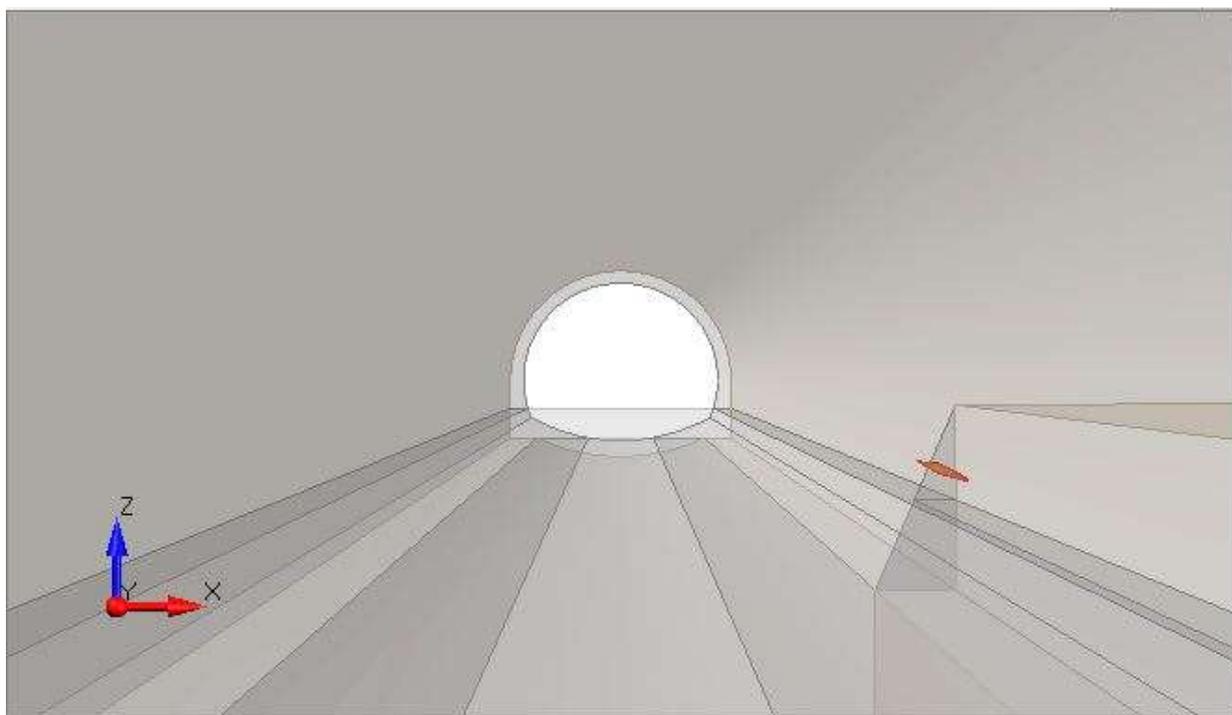
*Tensioni di trazione configurazione c)*



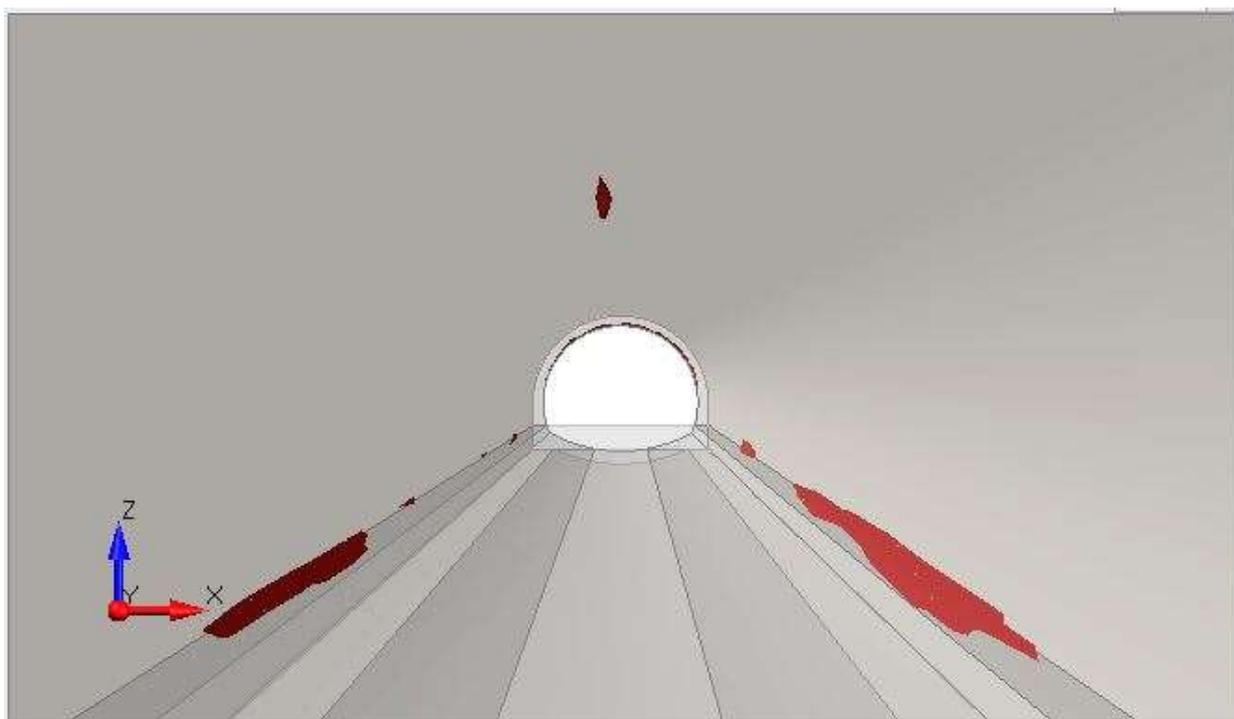
*Tensioni di trazione configurazione d)*



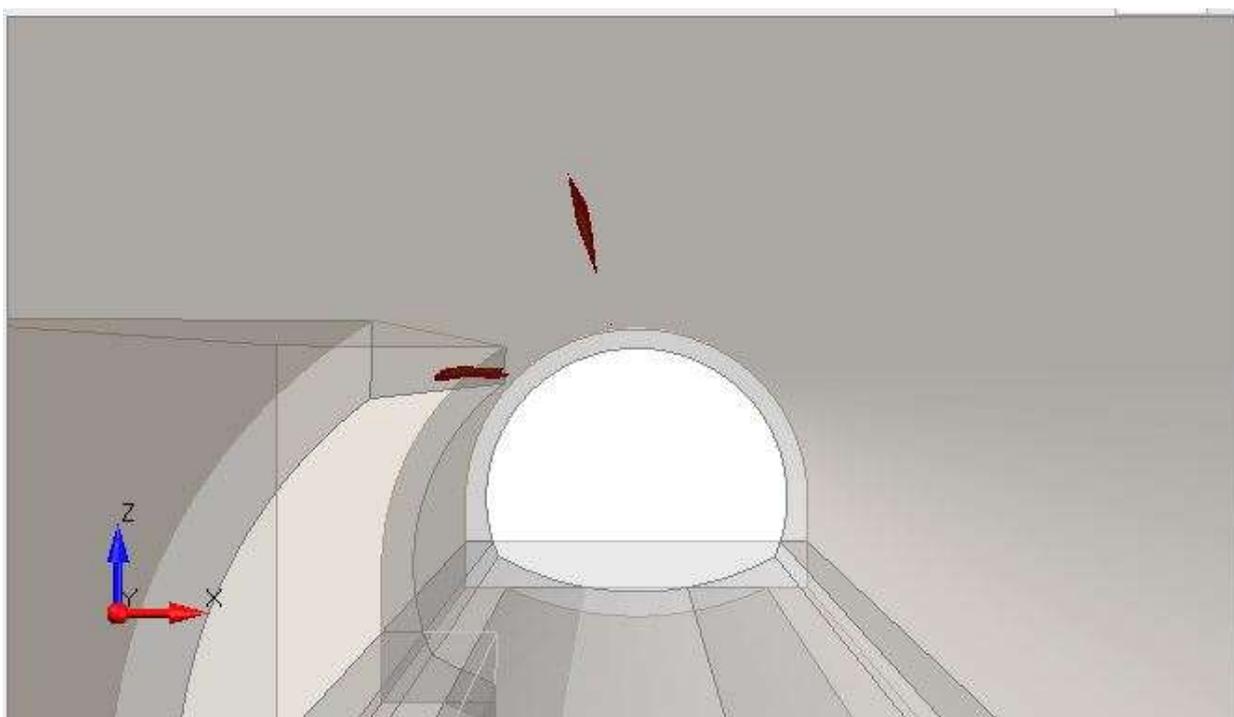
*Tensioni di trazione configurazione e)*



*Tensioni di trazione configurazione f)*

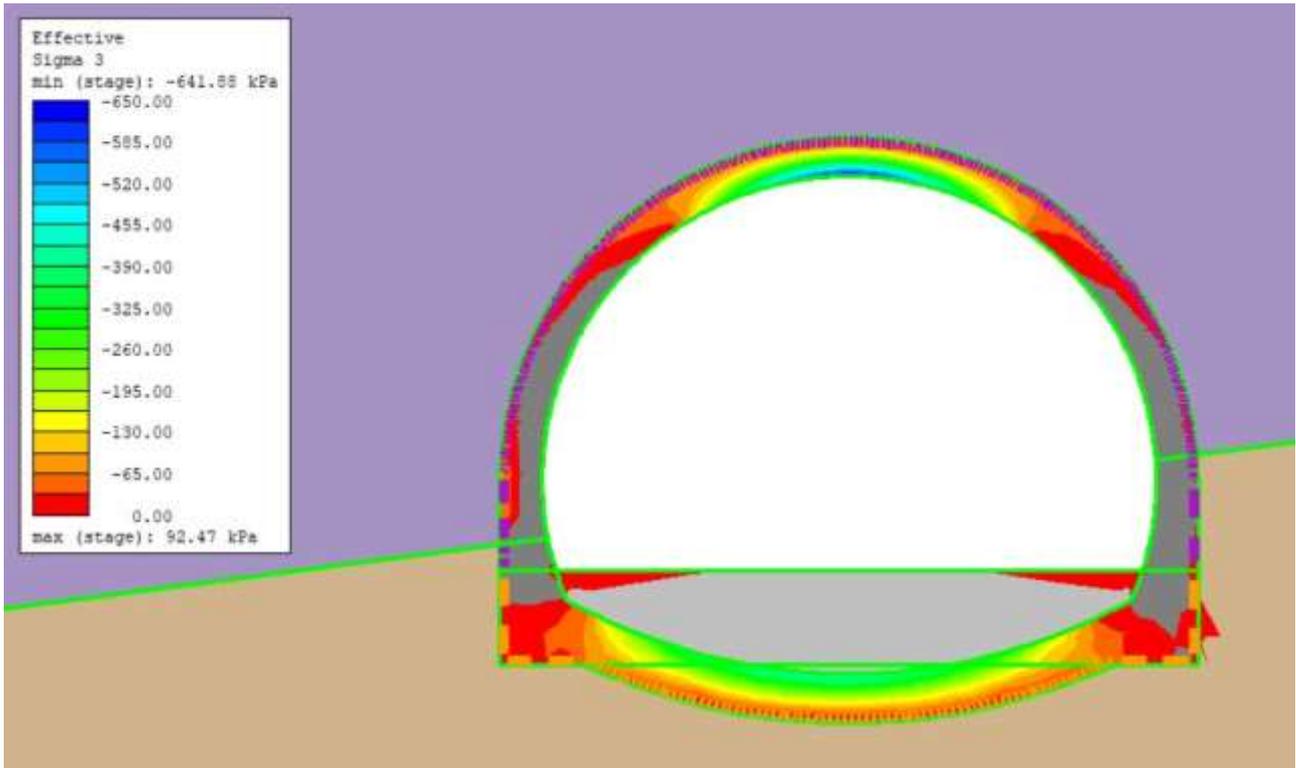


*Tensioni di trazione configurazione j)*

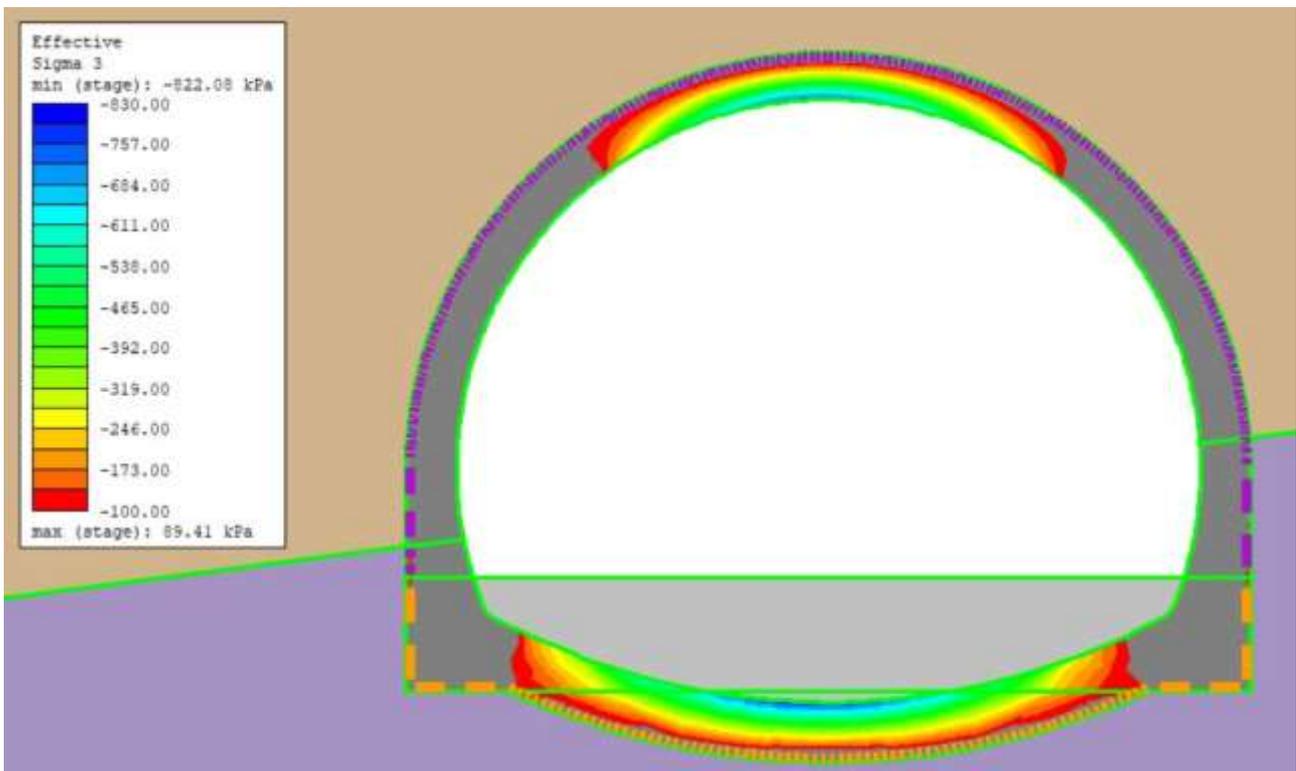


*Tensioni di trazione configurazione l)*

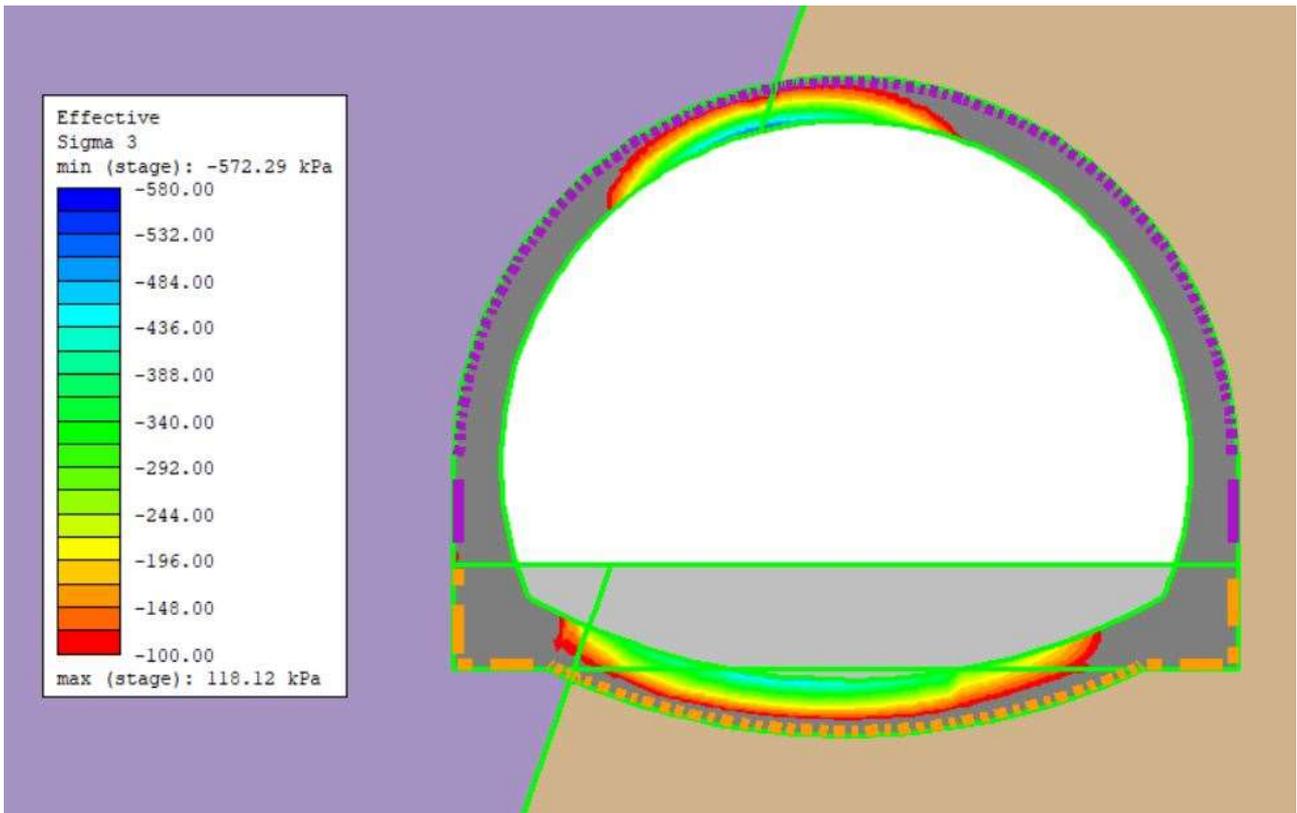
Allegato 2 Zone di trazione modelli 2D



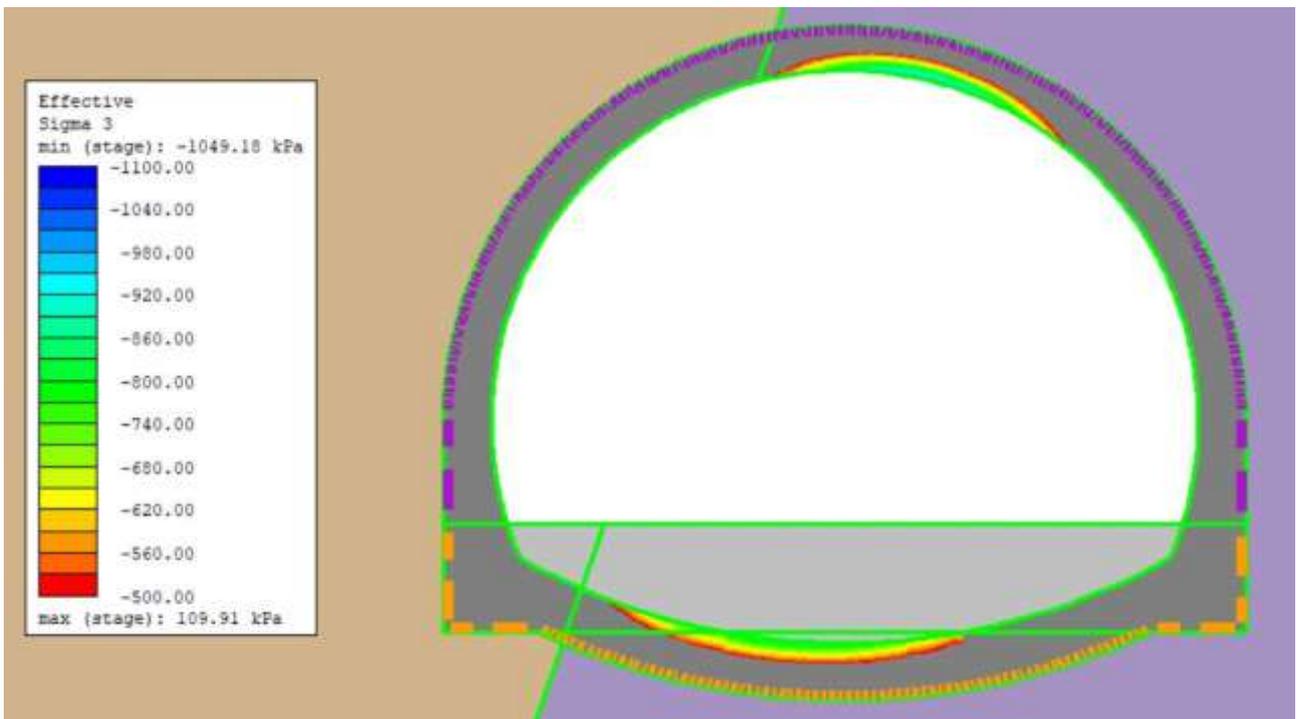
Tensioni di trazione configurazione a) (2D)



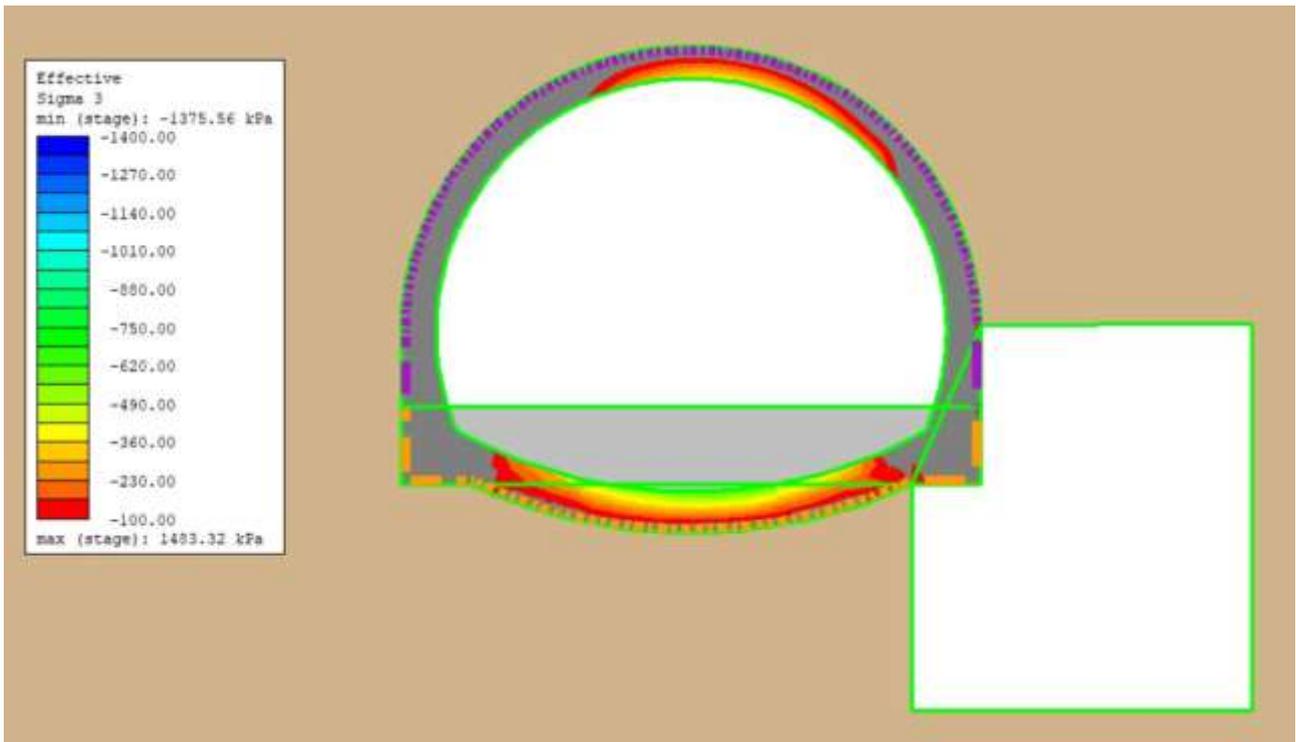
Tensioni di trazione configurazione b) (2D)



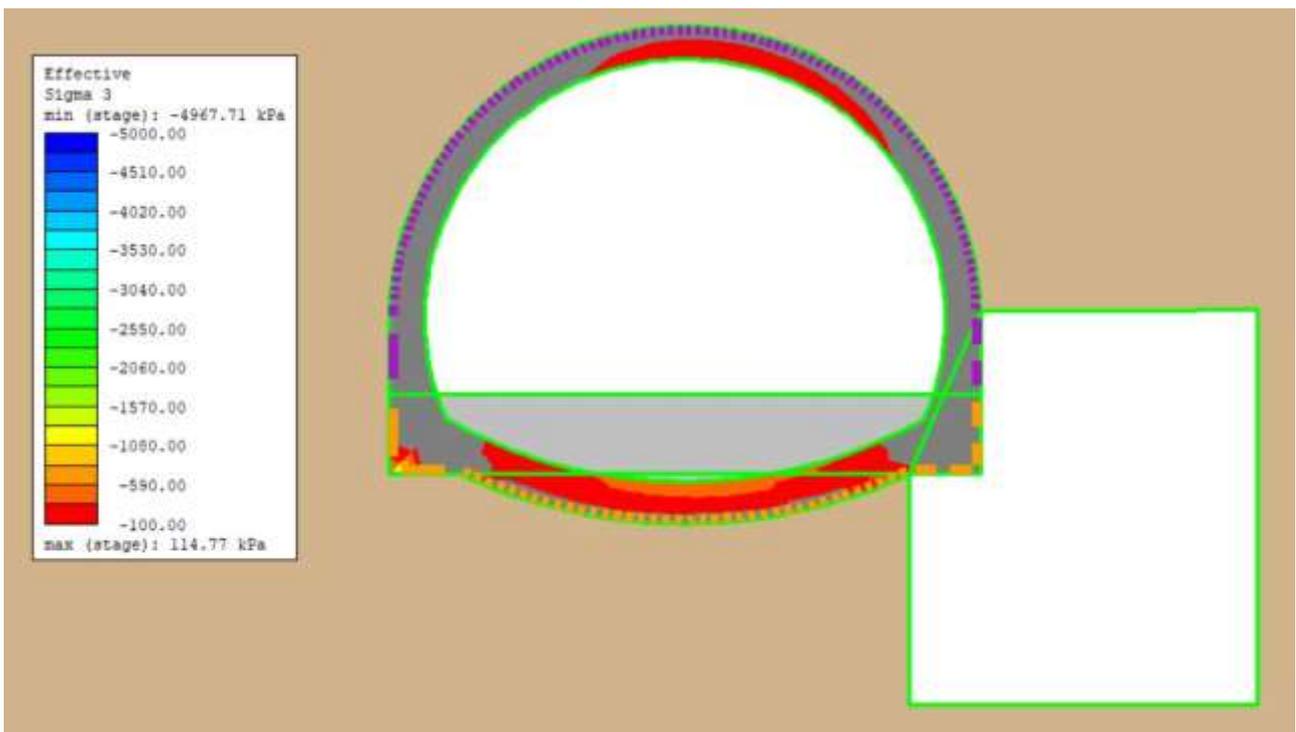
*Tensioni di trazione configurazione c) (2D)*



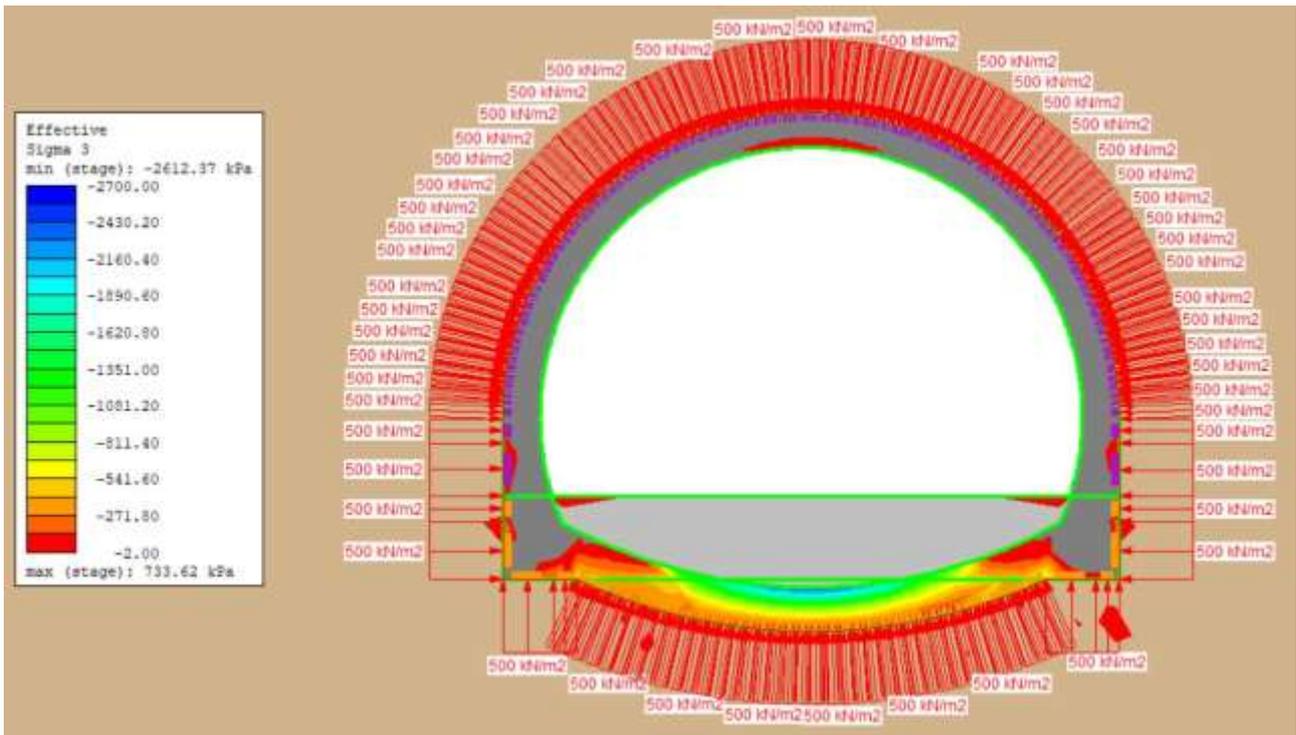
*Tensioni di trazione configurazione d) (2D)*



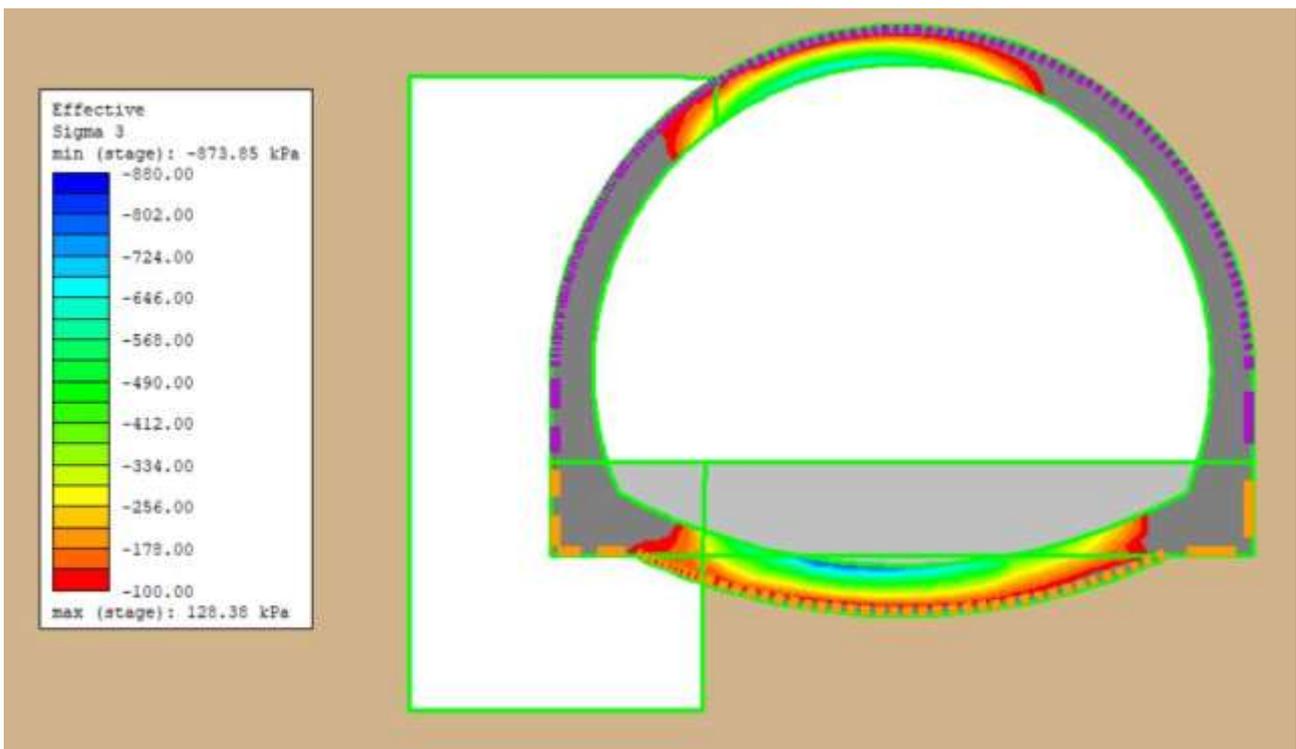
*Tensioni di trazione configurazione e) (2D)*



*Tensioni di trazione configurazione f) (2D)*

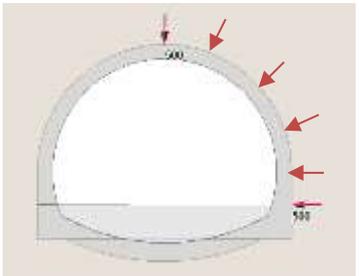
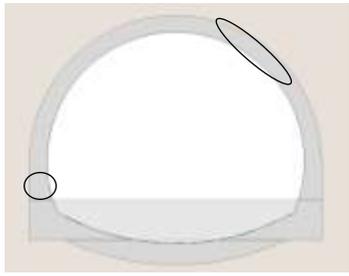
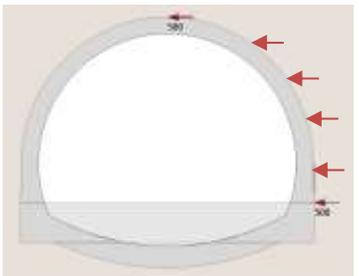
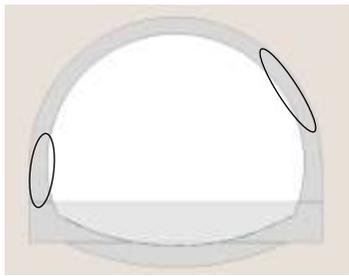


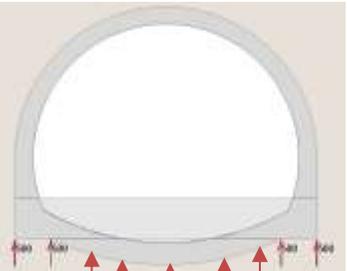
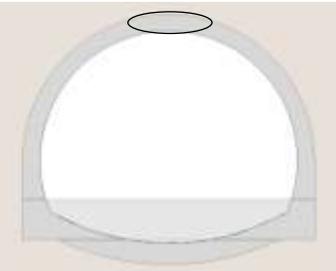
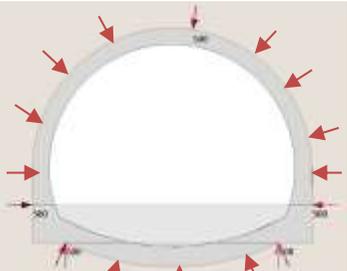
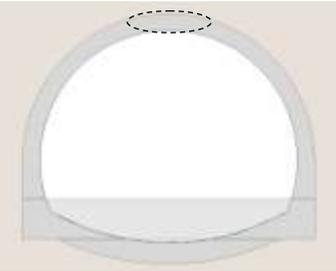
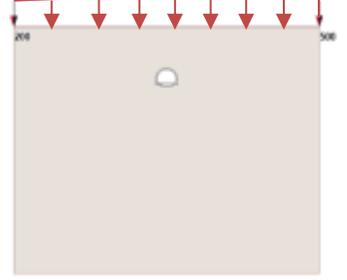
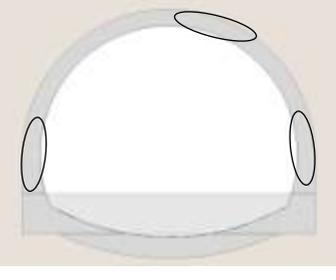
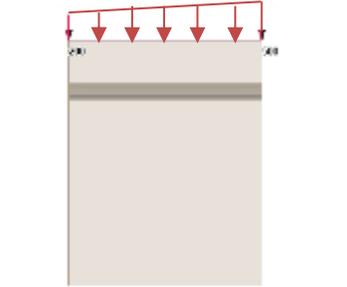
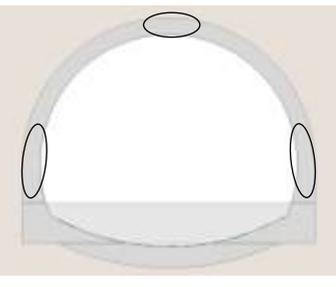
Tensioni di trazione configurazione j) (2D)

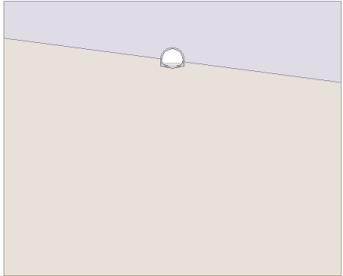
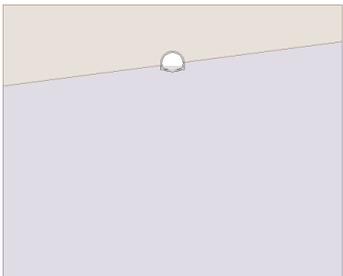


Tensioni di trazione configurazione l) (2D)

Allegato 3 Quadro sinottico finale

Condizioni al contorno - Descrizione	Condizioni al contorno - Schema grafico	Aree interessate da fessure	Quadro fessurativo	Possibili interventi					
				Ancoraggi passivi/attivi	Reti inox/in carbonio + ripristino	Blindaggio	Alesaggio + sostituzione rivestimento	Consolidamento al contorno	Sistema di drenaggio
Carico di 500 kPa di natura geostrutturale agente radialmente alla galleria sulla metà di destra			Fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria e dunque orientate verticalmente.	X	X	X			
Carico di 500 kPa di natura geostrutturale agente orizzontalmente alla galleria sulla metà di destra			Fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria e dunque orientate verticalmente.	X	X	X			

<p>Carico di 500 kPa di natura geostrutturale agente verticalmente sull'arco rovescio della galleria</p>			<p>Fessure sia longitudinali che trasversali allo sviluppo della galleria, dunque sia orizzontali che verticali; possibili fessure diagonali.</p>	<p>X</p>	<p>X</p>				
<p>Carico di 500 kPa di natura geostrutturale agente radialmente all'intera galleria</p>			<p>Nascita di fessure poco probabile per 500 kPa; probabile per carichi più elevati. Potrebbero influenzare la calotta più che i piedritti con orientazione trasversale e non longitudinale.</p>	<p>X</p>		<p>X</p>	<p>X</p>	<p>X</p>	
<p>Carico non uniforme distribuito in superficie con variazione trasversale allo sviluppo della galleria – da 200 kPa a sx a 500 kPa a dx</p>			<p>In calotta fessure con orientazione trasversale; sui piedritti fessure con orientazione longitudinale, dunque orizzontali.</p>			<p>X</p>	<p>X</p>	<p>X</p>	
<p>Carico non uniforme distribuito in superficie con variazione longitudinale allo sviluppo della galleria – da 200 kPa davanti a 500 kPa dietro</p>			<p>Fessure prevalentemente longitudinali allo sviluppo della galleria, dunque orizzontali. In calotta potrebbero nascere, in base all'entità dei carichi, anche fessure trasversali.</p>			<p>X</p>	<p>X</p>	<p>X</p>	

Condizioni al contorno - Descrizione	Condizioni al contorno - Schema grafico	Aree interessate da fessure	Quadro fessurativo	Possibili interventi					
				Ancoraggi passivi/attivi	Reti inox/in carbonio + ripristino	Blindaggio	Alesaggio + sostituzione rivestimento	Consolidamento al contorno	Sistema di drenaggio
Interfaccia suborizzontale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno superiore 2 ordini di grandezza inferiore a quello del terreno inferiore			Potrebbero nascere fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria e dunque orientate verticalmente.		X	X		X	
Interfaccia suborizzontale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno superiore 2 ordini di grandezza superiore a quello del terreno inferiore			Potrebbero nascere fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria e dunque orientate verticalmente.		X	X		X	

<p>Interfaccia subverticale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno a sinistra 2 ordini di grandezza inferiore a quello del terreno a destra</p>			<p>Potrebbero nascere fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria e dunque orientate verticalmente.</p>		<p>X</p>	<p>X</p>		<p>X</p>	
<p>Interfaccia subverticale che attraversa la sezione trasversale con modulo di Young del terreno a sinistra 2 ordini di grandezza superiore a quello del terreno a destra</p>			<p>Potrebbero nascere fessure prevalentemente trasversali allo sviluppo della galleria e dunque orientate verticalmente.</p>		<p>X</p>	<p>X</p>		<p>X</p>	
<p>Cavità in corrispondenza del piedritto destro</p>			<p>Le fessure potrebbero influenzare la calotta e il piedritto dx in corrispondenza della cavità con orientazione longitudinale allo sviluppo della galleria.</p>		<p>X</p>			<p>X</p>	<p>X</p>
<p>Cavità in corrispondenza della parte sinistra della galleria che coinvolge circa metà sezione</p>			<p>Le fessure potrebbero influenzare la calotta e il piedritto sx in corrispondenza della cavità con orientazione longitudinale e/o trasversale allo sviluppo della galleria.</p>		<p>X</p>			<p>X</p>	<p>X</p>

