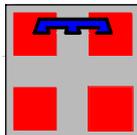




Autostrada Asti-Cuneo



PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

PROGETTO ESECUTIVO
OPERE D'ARTE IN SEDE

GALLERIA DI VERDUNO
PARTE GENERALE

RELAZIONE SUGLI EFFETTI DELLO SCAVO SUGLI EDIFICI IN SUPERFICIE

Aggiornato: 00	Data : Apr. 2013	Descrizione: EMISSIONE	Redatto: Ing. Gatti	Controllato: Ing. Ossezia	Approvato: Ing. Ghislandi	Codifica: 2.6 E - r D.2.1.07
Aggiornato: 01	Data : Marzo 2015	Descrizione: Rev. a seguito richieste MIT-SVCA	Redatto: Ing. Gatti	Controllato: Ing. Saurio	Approvato: Ing. Ghislandi	Lotto Prog. Tipo Elaborato
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data: Marzo 2015
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Scala: -



PROGETTISTA e RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
Dott. Ing. Enrico Ghislandi
Albo di Milano
N° A 16993

CONSULENZA SPECIALIZZATA



CONCESSIONARIA:





INDICE

1. INTRODUZIONE.....	2
2. BACINI DI SUBSIDENZA – METODI EMPIRICI.....	3
2.1. CENNI TEORICI	3
2.2. BACINO TRASVERSALE DI SUBSIDENZA	4
2.3. CEDIMENTI LONGITUDINALI	7
2.4. CATEGORIE DI DANNO	9
2.5. SPOSTAMENTI E DISTORSIONI LIMITE	10
2.6. STIMA DELLE DEFORMAZIONI E DEFINIZIONE DELLE CATEGORIE DI DANNO.....	12
2.7. OSSERVAZIONI	16
3. IPOTESI DI CALCOLO.....	18
4. SINTESI DEI RISULTATI.....	20
4.1. GREEN FIELD	20
4.2. CLASSIFICAZIONE DEL DANNO SUI FABBRICATI	26
4.3. ANALISI ALLE DIFFERENZE FINITE	35
4.3.1. <i>Codice di calcolo</i>	36
4.3.2. <i>Parametri geotecnici</i>	38
4.3.3. <i>Caratteristiche dei materiali strutturali</i>	39
4.3.4. <i>Sintesi dei risultati</i>	40
4.3.4.1. Sintesi dei risultati	43
5. ANALISI DI INTERFERENZA SCAVI-CORPI DETRITICI	46
5.1. MODELLO DI CALCOLO	47
5.2. ANALISI DI SENSIBILITÀ.....	49
5.3. SIMULAZIONE DELLO SCAVO CON TBM - SINTESI DEI RISULTATI	54
5.3.1. <i>Esame dei risultati</i>	55
6. CONCLUSIONI.....	57



1. INTRODUZIONE

La presente relazione illustra i risultati dello studio svolto per valutare l'interferenza tra gli scavi condotti in sotterraneo per la realizzazione della galleria naturale "Verduno", opera facente parte del Lotto 6, Tronco 2 del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo), ed i fabbricati e manufatti presenti in superficie. Lo scavo avviene con sistema meccanizzato, adottando una TBM del tipo EPB con diametro di scavo pari a 15.30 m. Si valuteranno in dettaglio i bacini di subsidenza relativi agli scavi ed i cedimenti/spostamenti determinati a piano campagna ed in corrispondenza dei piani fondazione, così da valutare la classe di danno attesa per ciascun fabbricato.

Il lavoro è basato essenzialmente sui dati ottenuti da:

- schede di censimento dei fabbricati;
- caratterizzazione geotecnica:
- planimetrie e profili altimetrici di tracciato.

Lo studio effettuato si basa sulla valutazione del comportamento deformativo dei terreni, ossia dell'entità dei cedimenti e delle distorsioni indotte dagli scavi applicando le "formulazioni empiriche", tipiche di letteratura, che riconducono il bacino di subsidenza a funzioni gaussiane di entità dipendente dal volume perso in fase di scavo (Peck, 1969; O'Reilly e New 1982).

A seguito della definizione del probabile bacino di subsidenza e determinato quindi il regime di cedimenti a piano campagna/piano fondazione che si verificano a seguito dallo scavo delle future gallerie, vengono valutate le deformazioni ad essi associabili e si procede ad individuare l'effetto indotto sui



fabbricati mediante il calcolo delle categorie di danno secondo quanto riportato in letteratura (Mair e Taylor e Burland, 1996).

2. BACINI DI SUBSIDENZA – METODI EMPIRICI

Allo scopo di esaminare il comportamento deformativo lungo l'asse delle gallerie, ossia valutare l'entità dei cedimenti in avanzamento indotti dagli scavi, sono stati condotti, come accennato, calcoli specifici secondo metodologie di carattere empirico.

Nel presente paragrafo verrà descritto più nel dettaglio tale approccio.

2.1. CENNI TEORICI

I metodi empirici si basano sull'osservazione sperimentale dei bacini di subsidenza di opere già eseguite ed aventi una notevolissima bibliografia in merito (Peck 1969, Attewell e Fermer 1974; Attwell 1977; Attwell & Woodman 1982; O'Reilly e New 1982; Rankin 1987; Shirlaw e Doran, 1988).

Le correlazioni che sono state dedotte consentono di valutare la distribuzione spaziale, l'ampiezza e l'evoluzione delle subsidenze sulla base di parametri di semplice determinazione.

Definiti quindi i parametri geometrici delle gallerie e le caratteristiche del terreno attraversato è possibile individuare i profili di subsidenza trasversale.

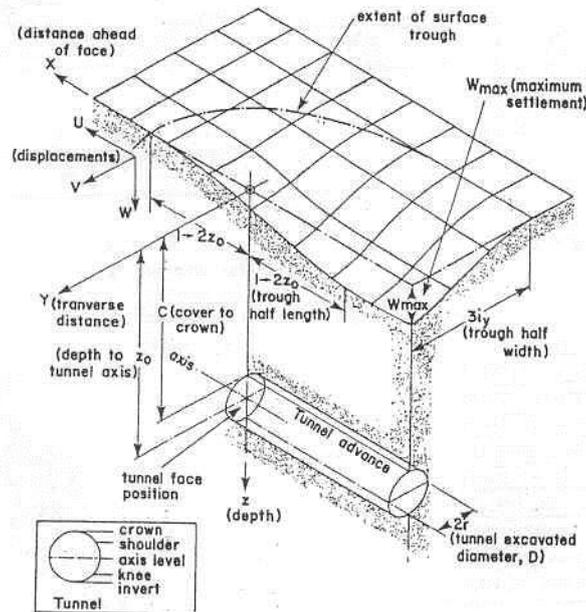


Figura 1 – Curva di subsidenza

L'involuppo della zona interessata dalle deformazioni è quindi funzione della distanza dall'asse verticale delle gallerie e dipende dalle dimensioni delle gallerie stesse, dalla sua quota, dal volume perso, dai parametri di resistenza-deformabilità del terreno attraversato.

2.2. BACINO TRASVERSALE DI SUBSIDENZA

Gli andamenti della curva di subsidenza in direzione trasversale rispetto all'asse di una galleria sono ben rappresentabili da una funzione normale di probabilità di tipo gaussiano, caratterizzata da due parametri: il cedimento massimo S_{max} (in corrispondenza dell'asse della galleria) e la distanza i tra l'asse della galleria ed il punto di flesso della curva, da cui dipende la larghezza della conca.

La funzione di subsidenza può quindi essere espressa dalla relazione:



$$S(x) = S_{\max} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right)} \quad (1)$$

dove $S(x)$ è il generico spostamento verticale a distanza y dall'asse della galleria, S_{\max} è lo spostamento massimo (ad $y=0$) ed i rappresenta la deviazione standard della curva.

Il volume totale della conca di subsidenza per unità di lunghezza della galleria V_s può essere ottenuto dall'integrazione della (1) e risulta essere pari a

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max} \cong 2.5 \cdot i \cdot S_{\max} \quad (2)$$

La grandezza S_{\max} può essere quindi ricavata stabilendo a priori il valore di V_s atteso

$$S_{\max} = \frac{V_s}{2.5 \cdot i} \quad (3)$$

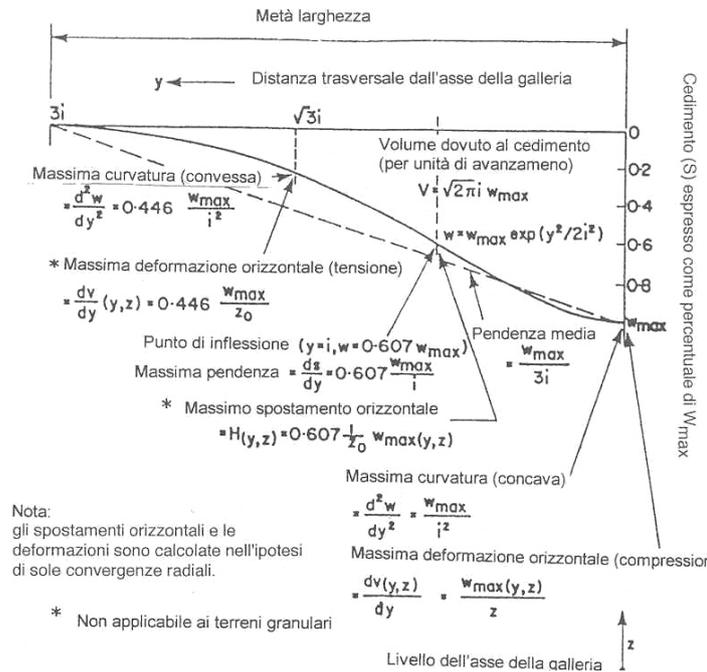


Figura 2 – Profilo trasversale di subsidenza

Il valore del volume della conca V_s viene assunto pari al volume perso allo scavo, ovvero come una percentuale del volume scavato V_{exc} .

Per la valutazione del parametro i , questo dipende dalla tipologia del terreno e dalla profondità della galleria; in accordo con quanto proposto da O'Reilly e New (1991), per valori della copertura maggiori del diametro della galleria, si ha una relazione lineare tra larghezza della conca e profondità della galleria, con coefficiente diverso a seconda del tipo di terreno:

$$i = k \cdot Z \tag{4}$$

Per i terreni attraversati, costituiti da argille marnose, si sono ipotizzati k nel range 0,4 – 0,6. Per quanto riguarda il volume perso è stato assunto, come valore di previsione, un valore pari allo 0.5%, sulla base di esperienze raccolte in contesti simili, in termini di caratteristiche di terreni attraversati. E' stato

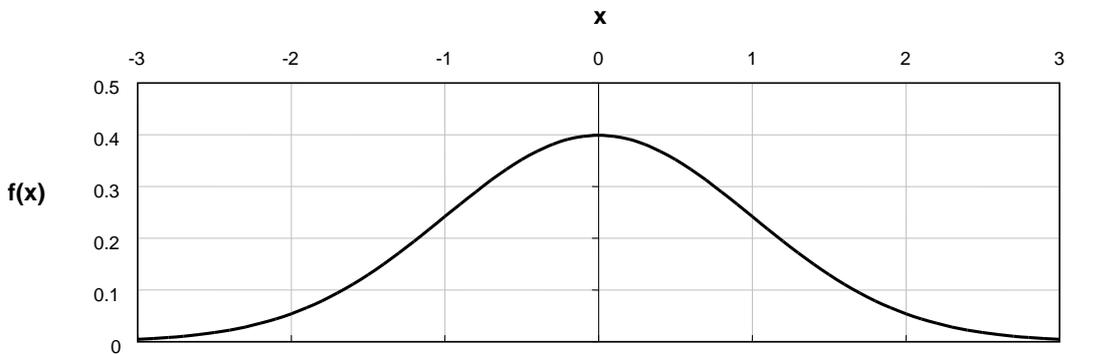
inoltre considerato, nell'ambito di uno scenario di rischio, un volume perso pari all'1,5% in considerazione di una non perfetta performance dell'avanzamento con TBM ed uno scenario intermedio con volume perso pari a 1,0%.

2.3. CEDIMENTI LONGITUDINALI

Per rappresentare la sezione della conca di subsidenza in direzione longitudinale, parallela all'asse della galleria, Attewell e Woodman (1982) hanno proposto di utilizzare la funzione integrale della funzione gaussiana, o curva di probabilità cumulata, $F(x)$:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

a)



b)

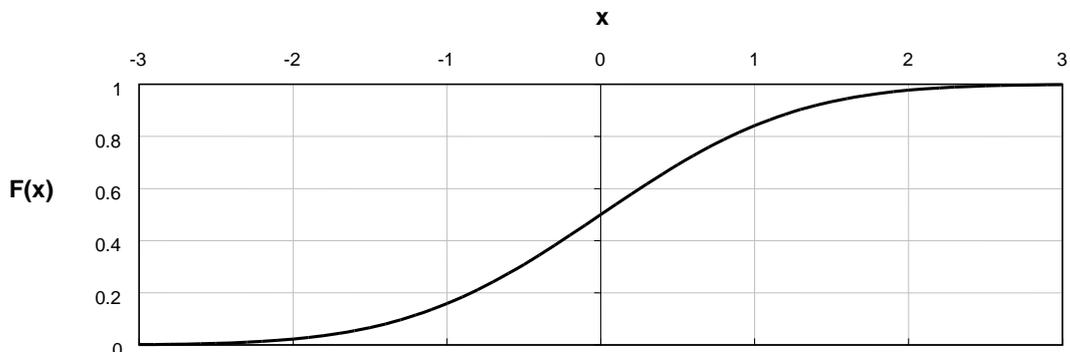


Figura 3 – Curva gaussiana (a) e funzione di probabilità cumulata (b)

In un riferimento cartesiano (0, x, y, z) caratterizzato da:

- Origine 0 posizionata al piano campagna;
- Asse y orizzontale e perpendicolare all'asse della galleria;
- Asse x orizzontale, parallelo all'asse della galleria e diretto nel verso di avanzamento dello scavo;
- Asse z: verticale e diretto verso il basso;

indicando con u, v e w le componenti dello spostamento lungo gli assi x, y e z, rispettivamente, e con x_0 , y_0 e z_0 le coordinate del centro della galleria, le espressioni generali delle componenti del campo di spostamenti indotto dallo scavo della galleria sono riportate di seguito (adattate da Attewell e Woodman, 1982):

$$w(x, y, z) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left[\frac{-y^2}{2i^2}\right] \left\{ F\left(\frac{x-x_i}{i}\right) - F\left(\frac{x-x_f}{i}\right) \right\} \quad (6)$$

$$v(x, y, z) = \frac{-n}{z_0 - z} y \cdot w(x, y, z) \quad (7)$$

$$u(x, y, z) = \frac{nV_s}{2\pi(z_0 - z)} \exp\left[\frac{-y^2}{2i^2}\right] \left\{ \exp\left[\frac{-(x-x_i)^2}{2i^2}\right] - \exp\left[\frac{-(x-x_f)^2}{2i^2}\right] \right\} \quad (8)$$

Con n viene indicato l'esponente della legge di variazione con la profondità $i(z)$ della distanza del punto di flesso dall'asse della galleria. Il pedice "i" sta per "iniziale" e indica dove parte lo scavo, il pedice "f" indica invece il fronte dello scavo.

In definitiva, ad ogni profondità z , nelle sezioni trasversali all'asse della galleria, il profilo degli spostamenti verticali è sempre rappresentato da curve di tipo gaussiano amplificate attraverso la funzione:

$$F\left(\frac{x-x_f}{i}\right)$$

che permette di tenere conto della distanza del fronte di scavo dalla sezione trasversale.

Nel paragrafo successivo viene descritto il metodo empirico per l'analisi di interazione terreno-struttura in cui sono analizzati gli effetti dei cedimenti indotti dallo scavo delle future gallerie sulle preesistenze interferenti con riferimento ai valori di copertura tra piano di imposta fondazione e chiave calotta, sulla base dei dati sulle strutture in nostro possesso a tutt'oggi.

2.4. CATEGORIE DI DANNO

Sulla base dello studio dei cedimenti indotti dallo scavo è possibile stimare l'entità dell'estensione del bacino di subsidenza, quindi, unitamente alle caratteristiche geometriche, strutturali e di conservazione degli edifici, si può conseguentemente effettuare una valutazione del probabile rischio di danno in merito ai risentimenti provocati sugli edifici dallo scavo delle gallerie.

Nel seguito si riassumono i criteri di classificazione del danno rispettivamente basati sulla determinazione della distorsione limite e sulla stima delle deformazioni di trazione generate nelle strutture secondo le formulazioni di Mayer, Burland e Taylor.



Alla luce di un'attenta analisi delle interferenze presenti lungo la tratta in esame, l'analisi dei cedimenti è stata finalizzata agli edifici ritenuti più significativi per lo studio proposto. Come riportato sugli elaborati planimetrici si è considerata una fascia variabile tra i 100m e 400m circa, in funzione delle coperture presenti e del diametro di scavo.

Una volta determinato il regime di cedimenti indotto dallo scavo delle future gallerie e valutate le deformazioni associabili agli stessi si è proceduto ad individuare l'effetto indotto sui fabbricati mediante il calcolo delle categorie di danno secondo quanto riportato in letteratura (Mair e Taylor e Burland,1996). Secondo tali approcci la categoria di danno è correlata con la deformazione unitaria massima di allungamento ϵ_{max} . Per i singoli edifici analizzati, sulla base della deformazione massima di trazione ϵ_{max} e del relativo bacino di subsidenza, è stato possibile associare ad un valore di volume perso V_p (definito sulla base di contesti analoghi) un determinato valore del parametro "categoria di danno" secondo quanto esposto nelle tabelle di sintesi riportate in letteratura (Boscardin e Cording, 1989), ottenendo così una prima valutazione delle situazioni a rischio.

2.5. SPOSTAMENTI E DISTORSIONI LIMITE

Al fine di stabilire le ripercussioni degli scavi sulle preesistenze in superficie, appare importante individuare i valori limite di spostamento e distorsione.

Oltre al cedimento massimo, un parametro molto significativo per la valutazione dei danni a fabbricati e manufatti è la "distorsione angolare" fra due punti dell'edificio/manufatto, essendo principalmente il cedimento differenziale la causa dell'insorgere di lesioni e rotture.

Al riguardo, facendo riferimento alla bibliografia esistente sull'argomento, Skempton e MacDonald (1956), basandosi sull'osservazione di 98 edifici e con riferimento anche allo studio di Ricceri e Sorazo (1985) su 25 strutture

realizzate in Italia, evidenziano che non si ha comparsa di fessure sulle strutture di tamponamento fino a valori di $\beta < 1/300$ e per vedere danni sulle strutture portanti in calcestruzzo è necessario arrivare a valori di β pari a $1/150$.

In Polschin e Tokar (1957) si considera un approccio più conservativo, indicando valori ammissibili pari a $1/500$ per strutture a telaio in calcestruzzo armato con tamponature, e pari a $1/200$ per telai aperti.

Stessi valori vengono indicati anche nell'ambito dell'Eurocodice 7, appendice H, dove si indica come ammissibile una distorsione pari a $1/500$, evidenziando una condizione di stato limite ultimo pari a $1/150$.

Un criterio di classificazione dei rischi indotti dai cedimenti, relativamente a strutture in cemento armato, è stato proposto da Rankin (1988) secondo quanto esposto nella tabella sottostante.

Categoria di rischio	Massima distorsione dell'edificio	Massimo cedimento dell'edificio [cm]	Descrizione del rischio
1	$\beta < 1/500$	$w < 1$	Non visibile
2	da $1/500$ a $1/200$	da 1 a 5	Leggero: crepe facilmente rimovibili con una tinteggiatura
3	da $1/200$ a $1/50$	da 5 a 7.5	Moderato: danni a porte e finestre, danni da infiltrazione di umidità
4	$\beta > 1/50$	$w > 7.5$	Alto: danni strutturali, necessità di riparazioni notevoli, pericoli di instabilità

Tabella 1 – Criterio di classificazione del rischio di Rankin



Il valore del cedimento assoluto, come pure il valore differenziale, dovrà essere valutato in dettaglio in funzione delle condizioni dell'edificio e delle reali geometrie delle fondazioni.

In prima battuta, in assenza informazioni puntuali sulle caratteristiche dei fabbricati, le analisi di danno sono state condotte considerando il valore degli spostamenti assoluti e tenendo conto delle deformazioni di trazione generate nelle strutture secondo le formulazioni di Mayer, Burland e Taylor, come illustrato nel seguito.

2.6. STIMA DELLE DEFORMAZIONI E DEFINIZIONE DELLE CATEGORIE DI DANNO

Nel caso in esame si è proceduto ad individuare la categoria di danno secondo quanto suggerito dalla letteratura (Mair e Taylor e Burland – *Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling*). Come indicato in Mair, Taylor e Burland, la categoria di danno è correlata con la deformazione unitaria massima di allungamento ϵ_{max} .

La determinazione di tale deformazione può essere individuata assimilando l'edificio ad un corpo elastico di altezza H, lunghezza L, momento d'inerzia I e rapporto tra moduli elastici E/G pari a 12.5 per il cemento armato e a 2.6 per la muratura. Nell'analisi svolta cautelativamente gli edifici misti muratura-c.a. sono stati considerati con un valore di E/G pari a 2.6, assimilati quindi a edifici in muratura.

Il bacino di subsidenza può essere suddiviso in due zone distinte in base alle modalità di deformazione del piano campagna, come rappresentato in figura.

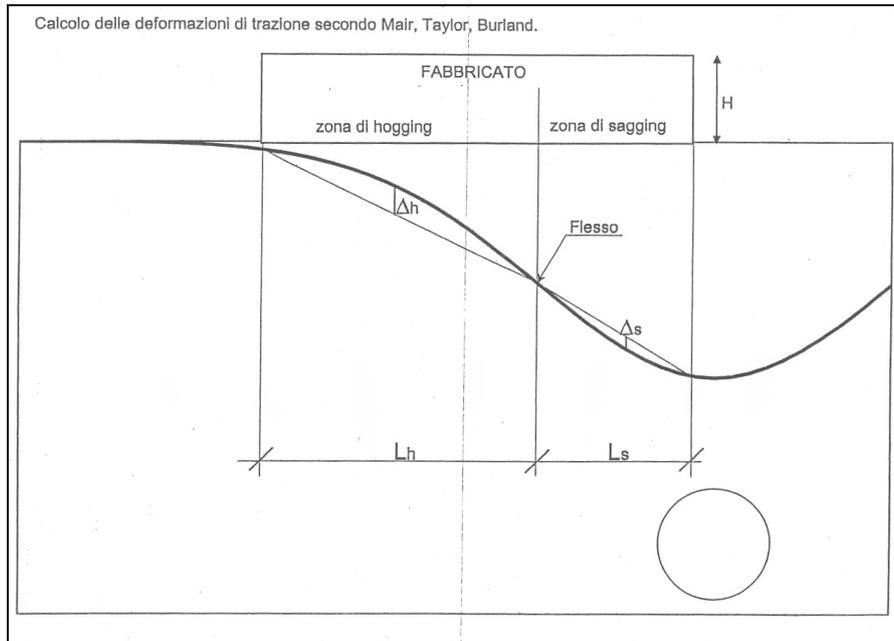


Figura 4 – Zona di hogging e sagging

zona di hogging (concavità della deformata orientata verso il basso):

momento d'inerzia edificio $\Rightarrow I = H^3/3$

distanza asse neutro dal lembo teso = H

zona di sagging (concavità della deformata rivolta verso l'alto):

momento d'inerzia edificio $\Rightarrow I = H^3/12$

distanza asse neutro dal lembo teso = H/2

Il punto di inflessione dello spostamento, (i), divide quindi l'edificio nelle due zone sopra indicate.

Nella zona di hogging ($-i > y > i$) dove l'asse neutro è pari ad H, tutti gli sforzi dovuti alla flessione sono di trazione, mentre nella zona di sagging, dove l'asse



neutro si assume pari ad $H/2$, la flessione induce sforzi sia di compressione che di trazione.

Definita l'inflessione massima Δ/L , così come indicato dagli autori, è possibile risalire alle deformazioni unitarie massime per trazione.

Per quanto dovuto a sollecitazioni di flessione, le deformazioni si sviluppano parallelamente all'asse dell'edificio e valgono:

$$\varepsilon_b = \left(\frac{\Delta}{L}\right) \times \frac{1}{\left[\left(\frac{L}{12t}\right) + \left(\frac{3EI}{2tLHG}\right)\right]}$$

dove $t = (H; H/2)$ secondo se ci si trova in zona Hogging o Sagging.

Invece per le deformazioni dovute taglio si ha:

$$\varepsilon_d = \left(\frac{\Delta}{L}\right) \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{HL^2G}{18EI}\right)\right]}$$

Si considera inoltre il contributo dovuto alle deformazioni orizzontali (ε_h) che verrà combinato con la deformazione di flessione e taglio.

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_h + \varepsilon_b$$

$$\varepsilon_{dt} = 0.35\varepsilon_h + \sqrt{\left((0.65\varepsilon_h)^2 + \varepsilon_d^2\right)}$$



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Si ottiene quindi la massima deformazione di trazione ε_{\max} pari al valore massimo tra ε_{bt} e ε_{dt}

Si riportano nel seguito le tabelle di sintesi di Boscarding e Cording (1989).

Categoria del danno	Intensità del danno	Deformazione limite di trazione ε_{lim} (%)
0	Trascurabile	0÷0.05
1	Molto lieve	0.05÷0.075
2	Lieve	0.075÷0.15
3	Moderata	0.15÷0.3
4	Severa	0.3÷0.45
5	Molto severa	>0.45

Tabella 2 – Boscardin e Cording, 1989

Categoria del danno	Intensità del danno	Descrizione
0	Trascurabile	Fessure capillari con aperture ≤ 0.1 mm.
1	Molto lieve	Fessure sottili cui si rimedia facilmente con lavori di pitturazione. Il danno è limitato agli intonaci delle pareti interne. Fessure alle parti esterne rilevabili con attento esame. Tipica apertura delle lesioni ≤ 1 mm.
2	Lieve	Fessure facilmente stuccabili, ripittura necessaria. Le fessure ricorrenti possono essere mascherate con opportuni rivestimenti. Fessure anche visibili all'esterno; può essere necessaria qualche ripresa della spillatura per garantire l'impermeabilità. Possibili difficoltà nell'apertura di porte e finestre. Tipica apertura delle lesioni ≤ 5 m.
3	Moderata	Le fessure richiedono cucì e scuci della muratura.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

		Anche all'esterno necessari interventi sulla muratura. Possibile blocco di porte e finestre. Rottura di tubazioni. Spesso l'impermeabilità non è garantita. Tipica apertura delle lesioni $5 \div 15$ mm, oppure molte lesioni ≤ 3 .
4	Severa	Necessarie importanti riparazioni, compresa demolizione e ricostruzione di parti di muri, specie al di sopra di porte e finestre. I telai di porte e finestre si distorcono; percepibile pendenza di pavimenti. Muri inclinati o spanciati; qualche perdita d'appoggio di travi. Tubazioni distrutte. Tipica apertura delle lesioni $15 \div 25$ mm, dipendente anche dal numero di lesioni.
5	Molto severa	Richiesti importanti lavori con parziale e totale demolizione e ricostruzione. Le travi perdono l'appoggio, i muri si inclinano fortemente e richiedono puntellatura. Pericolo di instabilità. Tipica apertura delle lesioni superiori a 25 mm, dipendente anche dal numero di lesioni.

Tabella 3 – Boscardin e Cording, 1989

La categoria di danno ammissibile per un fabbricato dipende dalle caratteristiche dell'edificio stesso, ovvero dalla metodologia costruttiva (strutture in c.a./acciaio o muratura), dallo stato di conservazione (stato buono o precario) e dalla destinazione d'uso. In particolare vengono ritenute ammissibili le classi di danno inferiori alla 3.

2.7. OSSERVAZIONI

La metodologia impiegata per le analisi di interferenza, descritta nei capitoli precedenti, si basa sulle seguenti ipotesi:

- gli spostamenti e le deformazioni indotte sugli edifici sono assunte pari a quelle corrispondenti alla condizione "green-field";



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

- la rigidità degli edifici analizzati è considerata nulla; in realtà le opere di fondazione interagiscono con il terreno riducendo il rapporto di inflessione e le deformazioni orizzontali ottenute nella condizione “green-field”;
- nessuna distinzione tra fondazioni su plinti, su trave e su platea che presentano chiaramente comportamenti differenti soprattutto nei confronti degli spostamenti orizzontali;
- tutti gli edifici vengono considerati come disposti perpendicolarmente all’asse della galleria scavata (configurazione che determina per uno stesso edificio le condizioni peggiori in termini di entità di deformazione).

L’approccio risulta sicuramente conservativo, determinando quindi classi di danno che possono essere assunte come condizioni superiori, affinabili verso classi inferiori in virtù di modelli più approfonditi che potranno essere messi a punto una volta disponibili rilievi più dettagliati dei fabbricati stessi.



3. IPOTESI DI CALCOLO

Nel seguito vengono presentate le ipotesi di calcolo adottate per la valutazione dell'interferenza tra gli scavi ed i fabbricati presenti in superficie.

Come accennato in precedenza, il lavoro è basato essenzialmente sui dati ottenuti da:

- schede di censimento dei fabbricati;
- caratterizzazione geotecnica;
- planimetrie e profili altimetrici di tracciato.

Non essendo specificato nelle schede di censimento degli edifici la quota di fondazione, rispetto a piano campagna, si è ipotizzata la stessa secondo il seguente criterio:

- 1,5 m, assenza di piano interrato;
- 3 m, presenza di un piano parzialmente interrato;
- 4 m, presenza di un piano interrato.

La tipologia strutturale impiegata nelle valutazioni di calcolo è stata assunta in funzione di quanto riportato nelle schede di censimento; laddove vi era la contemporanea presenza di due tipologie strutturali si è considerata la più conservativa per le analisi.

Le analisi proposte nel seguito sono state condotte ipotizzando tre valori di volume perso :

- $V_p = 0.5\%$ - scavo in condizioni di lavoro in linea con le attese progettuali;
- $V_p = 1.0\%$ - scavo in condizioni di lavoro intermedie tra le attese progettuali e lo scenario di rischio;
- $V_p = 1.5\%$ - scenario di rischio in cui si considera una non perfetta performance dell'avanzamento con TBM;

Essendo inoltre il contesto geomeccanico attraversato caratterizzato dalla presenza di terreno prevalentemente argilloso si è ipotizzata una variabilità di k in considerazione di una possibile variabilità nei valori di coesione secondo i valori:

- $k = 0.4$ - terreni caratterizzati da bassa coesione;
- $k = 0.6$ - terreni caratterizzati da elevata coesione;

così da coprire il range di variabilità presente nel contesto studiato.

Analisi effettuate	
$k = 0.4$	$V_p = 0.5\%$
	$V_p = 1.0\%$
	$V_p = 1.5\%$
$k = 0.6$	$V_p = 0.5\%$
	$V_p = 1.0\%$
	$V_p = 1.5\%$

Tabella 4 – Analisi effettuate

4. SINTESI DEI RISULTATI

4.1. GREEN FIELD

Come analisi preliminare è stato condotto uno studio in condizioni di “green field”. Tale analisi, che fornisce un primo studio di sensibilità, conduce alla valutazione dei cedimenti indotti dallo scavo riferiti al piano campagna.

Al fine di chiarire le scelte effettuate per le analisi, sono riportati nel seguito due grafici che mostrano l’effetto della variabilità dei parametri adottati sul cedimento indotto dagli scavi.

Il primo studio presentato mostra l’andamento del bacino di subsidenza calcolato con volume perso costante pari a $V_p = 0.5\%$, copertura $C = 30$ m e valori di k variabili pari a $k = 0.4$ e $k = 0.6$.

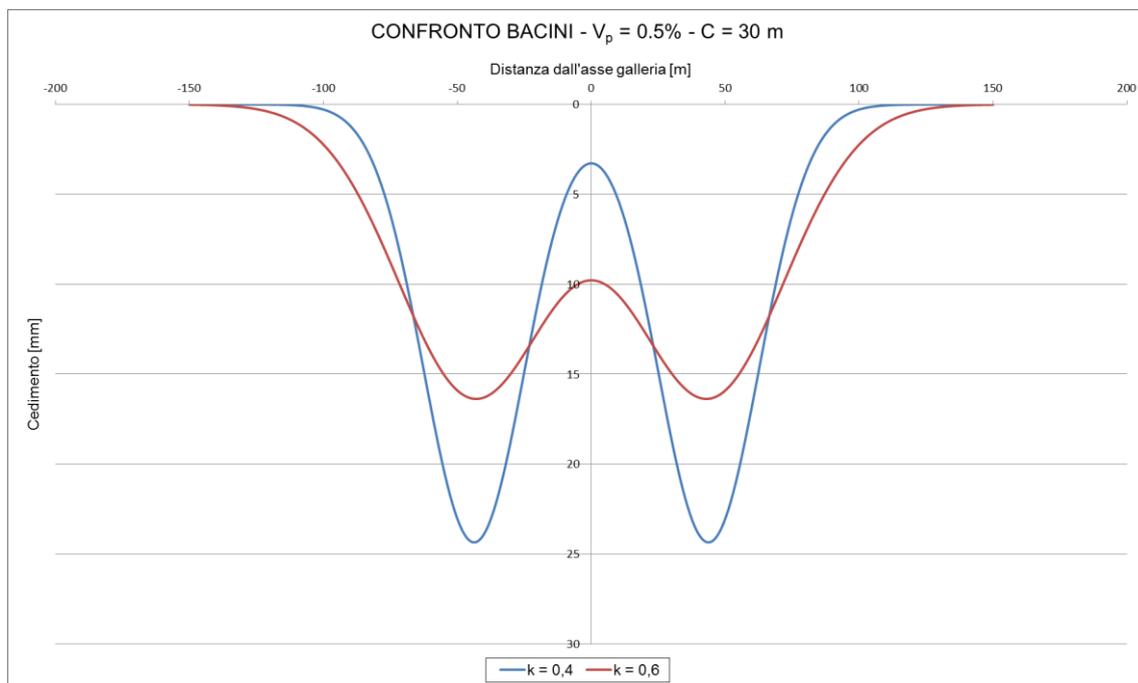


Figura 5 – Bacino di subsidenza - Variabilità parametro k

Il grafico mostra l'influenza del parametro k sull'ampiezza del bacino e sul cedimento massimo. In particolare aumentando tale valore da 0,4 a 0,6 si ottiene un bacino più ampio e caratterizzato da un cedimento minore. Tale comportamento deriva dalla differente risposta deformativa data da un terreno caratterizzato da bassi valori di coesione ed un terreno più coesivo. Nel caso in esame l'ampiezza complessiva del bacino di subsidenza passa da 200 m a 300 m, ed il valore massimo di cedimento, in asse galleria, da 24 mm a 16 mm.

Il secondo studio mostra l'andamento del bacino di subsidenza calcolato con k costante pari a $k = 0,4$, copertura $C = 30$ m e volume perso pari rispettivamente a $V_p = 0.5\%$ e $V_p = 1.0\%$.

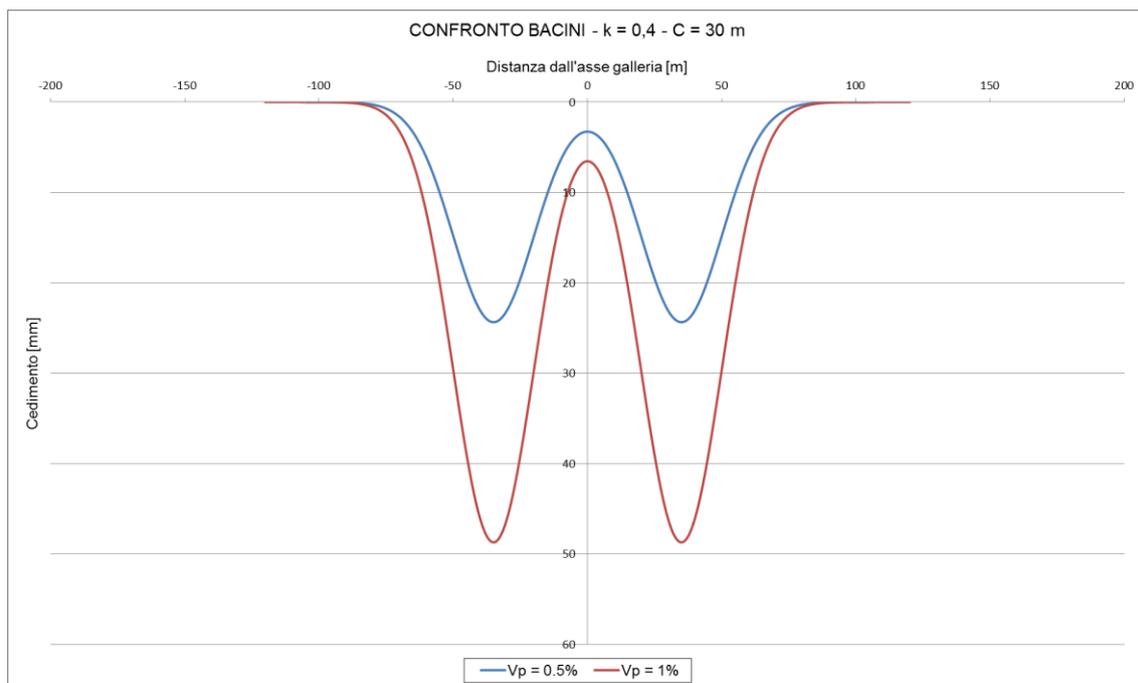


Figura 6 – Bacino di subsidenza - Variabilità volume perso

Osservando il grafico si nota come il volume perso influenzi il cedimento massimo (range 24-49 mm) ma non l'ampiezza del bacino la quale rimane costante.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Le analisi in condizioni di green field sono state condotte seguendo il criterio sopra descritto considerando valori di copertura tali da coprire il range presente lungo il tracciato della galleria. Nelle analisi si è considerato anche il caso di un volume perso pari all'1.5%, il quale rappresenta un non corretto funzionamento della TBM associabile ad uno scenario di rischio. Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati ottenuti.

Copertura [m]	Distanza gallerie [m]	k = 0.4					
		V _p = 0.5%		V _p = 1.0%		V _p = 1.5%	
		Ampiezza [m]	w _{max} [mm]	Ampiezza [m]	w _{max} [mm]	Ampiezza [m]	w _{max} [mm]
15	50	104.4	40	104.4	81	104.4	121
30	70	160.4	24	160.4	49	160.4	73
50	80	218.4	16	218.4	32	218.4	48
70	80	266.4	12	266.4	25	266.4	37
90	84	318.4	11	318.4	21	318.4	32

Tabella 5 – Risultati analisi “green field” – k = 0,4

Copertura [m]	Distanza gallerie [m]	k = 0.6					
		V _p = 0.5%		V _p = 1.0%		V _p = 1.5%	
		Ampiezza [m]	w _{max} [mm]	Ampiezza [m]	w _{max} [mm]	Ampiezza [m]	w _{max} [mm]
15	50	131.5	27	131.5	54	131.5	81
30	70	205.5	16	205.5	33	205.5	49
50	80	287.5	12	287.5	23	287.5	35
70	80	359.5	11	359.5	22	359.5	33
90	84	435.5	10	435.5	19	435.5	29

Tabella 6 – Risultati analisi “green field” – k = 0,6

Nei seguenti grafici vengono mostrati gli andamenti dell'ampiezza del bacino e del cedimento massimo al variare della copertura.

E' possibile notare che, in generale, l'aumento di ampiezza del bacino di subsidenza è direttamente proporzionale all'aumento della copertura a parità di k. Il cedimento invece aumenta col diminuire della copertura a parità di k e volume perso.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in
superficie

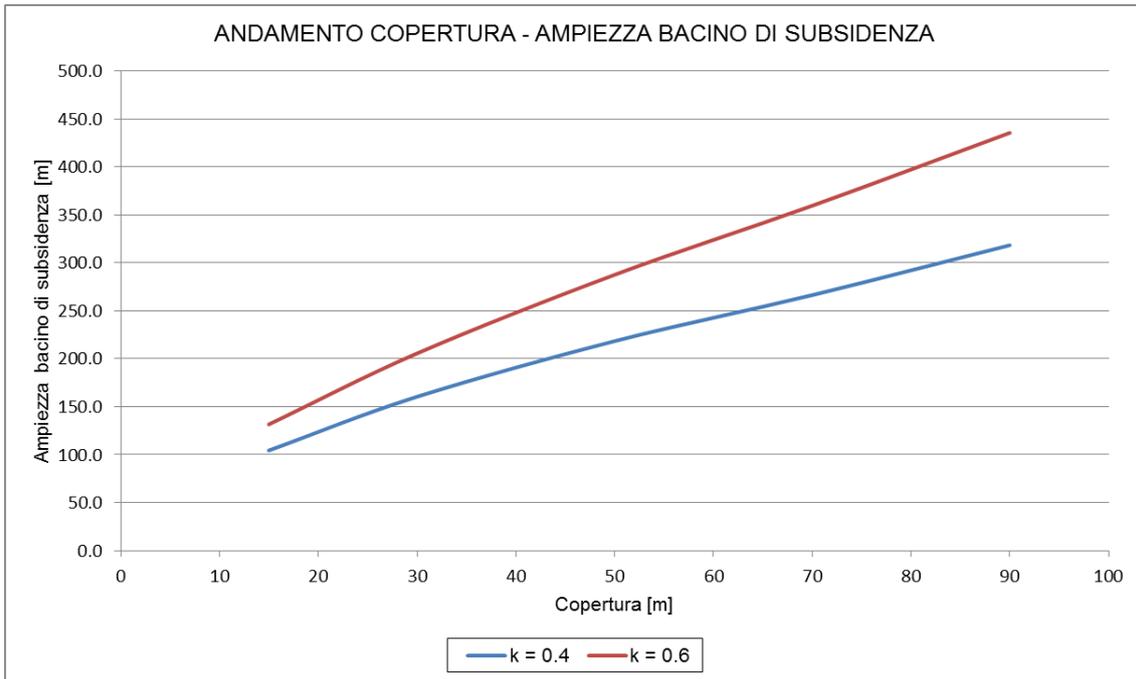


Figura 7 – Andamento copertura – Ampiezza bacino

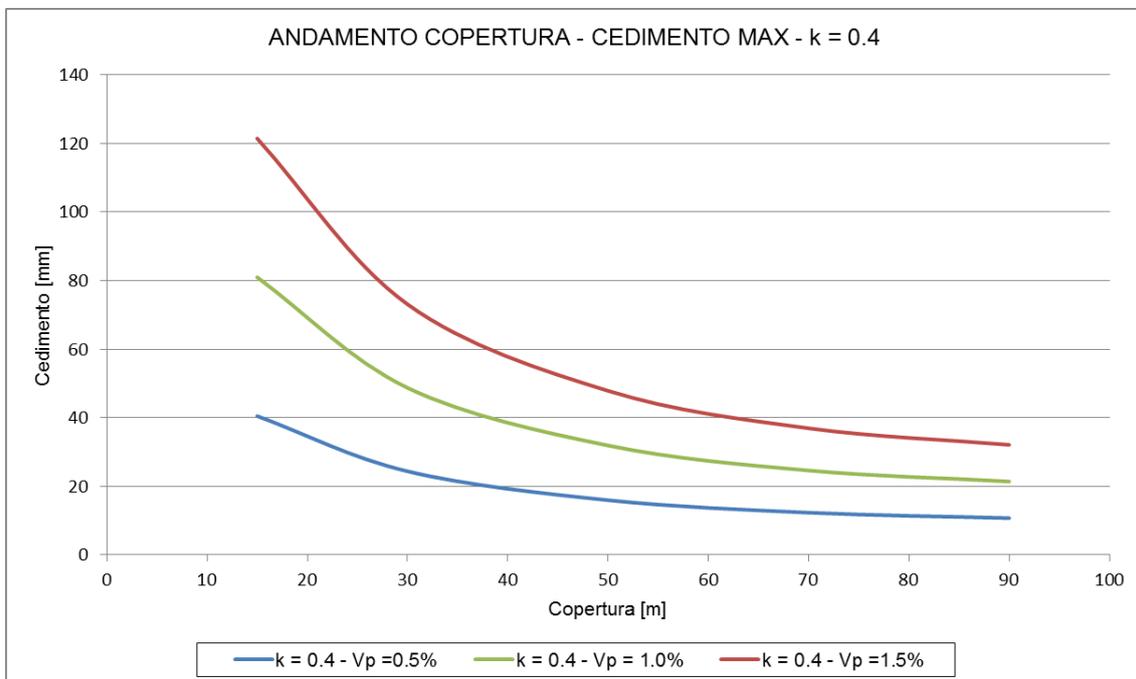


Figura 8 – Andamento copertura – Cedimento massimo – k = 0,4

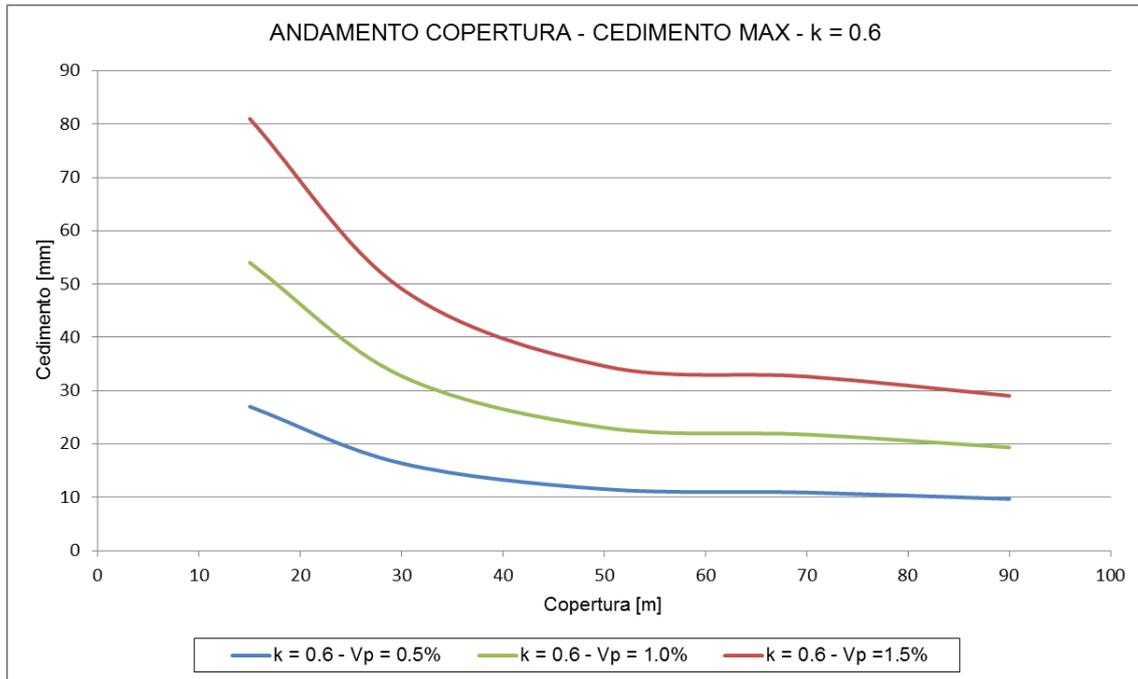


Figura 9 – Andamento copertura – Cedimento massimo – $k = 0,6$

I valori di cedimento massimo in asse galleria seguono l'andamento descritto precedentemente con valore minimo pari a 10 mm, in corrispondenza di una copertura pari a 90 m, $k = 0,6$ e $Vp = 0,5\%$, e valore massimo pari a 121 mm, per copertura pari a 15 m, $k = 0,4$ e $Vp = 1,5\%$ (corrispondente allo scenario di rischio).

Anche la variabilità dell'ampiezza del bacino segue l'andamento descritto precedentemente con valore minimo pari a 104 m, in corrispondenza di una copertura pari a 15 m e $k = 0,4$, e valore massimo pari a 436 m, per una copertura pari a 90 m e $k = 0,6$.

Si riporta infine nel seguito l'andamento dei cedimenti lungo lo sviluppo delle gallerie in funzioni delle diverse coperture e dei parametri sopra citati. Tali valori costituiscono il range dei cedimenti attesi, da controllare mediante monitoraggio topografico.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

I risultati sono riportati nella seguente tabella.

PK Monte	Copertura [m]	Distanza gallerie [m]	Vp = 0.5%		Vp = 1.0%		Vp = 1.5%	
			k = 0.4	k = 0.6	k = 0.4	k = 0.6	k = 0.4	k = 0.6
			w _{max} [mm]					
0+900	15	50	40.5	27.0	81.0	54.0	121.4	81.1
1+100	35	70	21.5	14.7	43.0	29.4	64.5	44.1
1+300	50	70	16.1	12.7	32.1	25.4	48.2	38.1
1+500	60	70	13.7	11.1	27.5	22.2	41.2	33.4
1+700	65	80	12.9	11.0	25.9	22.1	38.8	33.1
1+900	90	84	10.7	9.7	21.4	19.4	32.1	29.0
2+100	65	80	12.9	11.0	25.9	22.1	38.8	33.1
2+300	60	80	13.7	11.1	27.5	22.2	41.2	33.4
2+500	70	80	12.3	10.9	24.6	21.8	36.9	32.7
2+700	60	80	13.7	11.1	27.5	22.2	41.2	33.4
2+900	50	80	16.1	12.7	32.1	25.4	48.2	38.1
3+100	65	80	12.9	11.0	25.9	22.1	38.8	33.1
3+300	45	70	17.5	13.0	35.0	25.9	52.5	38.9
3+500	25	50	28.1	19.6	56.2	39.1	84.3	58.7

Figura 10 – Andamento dei cedimenti lungo lo sviluppo delle gallerie

I valori di cedimento massimo attesi in asse galleria, associati a valori del volume perso nel range 0.5-1.0%, sono compresi mediamente compresi nel range 10-50 mm, i valori più elevati in corrispondenza delle minori coperture.



4.2. CLASSIFICAZIONE DEL DANNO SUI FABBRICATI

Lo studio è stato condotto considerando i fabbricati rappresentativi della tratta in esame di cui si è in possesso delle schede di censimento. Per una rapida identificazione delle caratteristiche di ogni edificio interferente viene riportata una tabella nel seguito. Inoltre non essendo specificato nelle schede di censimento degli edifici la quota di fondazione, rispetto a piano campagna, si è ipotizzata la stessa secondo il seguente criterio:

- 1,5 m, assenza di piano interrato;
- 3 m, presenza di un piano parzialmente interrato;
- 4 m, presenza di un piano interrato.

La tipologia strutturale impiegata nelle valutazioni di calcolo è stata assunta in funzione di quanto riportato nelle schede dei fabbricati; laddove vi era la contemporanea presenza di due tipologie strutturali si è considerata la più conservativa per le analisi.

Nella seguente tabella 7 si riporta l'elenco dei fabbricati esaminati, la cui localizzazione grafica è riportata nell'elaborato 2.6E-dD.2.1.26 "Planimetria edifici censiti"; le caratteristiche di dettaglio sono riportate nell'elaborato 2.6E-rD.2.1.27 "Schede censimento edifici interferiti".



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Interferenza	Piani fuori terra	Piani interrati	H edificio fuori terra [m]	Quota fondazioni [m]	Htot [m]	Tipo costruzione	Destinazione d'uso	Stato di conservazione strutture portanti
01	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Abitazione civile	Ragionevole
02	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
03	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	-
04	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Abitazione civile	Buono
05	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Abitazione civile	Ragionevole
06	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
07	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
08	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
09	1	1	6.0	4	10	C.A.	Abitazione civile	Buono
10	1	1	6.0	4	10	C.A.	Abitazione civile	Buono
11	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
12	1	-	6.0	1.5	7.5	C.A.	Magazzino	Ragionevole
13	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
14	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
15	1	-	6.0	1.5	7.5	MURATURA	Magazzino	Buono
16	2	1 seminterrato	8.0	3	11	C.A.	Abitazione civile	Buono
17	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Abitazione civile	Buono
18	2	1 seminterrato	8.0	3	11	MURATURA	Magazzino	Cattivo
19	2	1 seminterrato	8.0	3	11	MURATURA	Magazzino	Cattivo
20	3	1	11.0	4	15	C.A.	Abitazione civile	Buono
21	2	1	8.0	4	12	C.A.	Abitazione civile	Buono
22	2	1	8.0	4	12	C.A.	Abitazione civile	Buono
23	2	1	8.0	4	12	C.A.	Abitazione civile	Buono
24	2	1	8.0	4	12	C.A.	Abitazione civile	Buono
25	2	1	8.0	4	12	C.A.	Abitazione civile	Buono
26	1	-	6.0	1.5	7.5	C.A.	Magazzino	Buono
27	1	-	6.0	1.5	7.5	MURATURA	Magazzino	Buono
28	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Abitazione civile	Buono
29	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Magazzino	Ragionevole
30	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Abitazione civile	Buono
31	1	-	6.0	1.5	7.5	MURATURA	Magazzino	Ragionevole
32	1	-	6.0	1.5	7.5	MURATURA	Cabina ENEL	Buono
33	1+sottotetto	-	6.0	1.5	7.5	C.A.	Abitazione civile	Buono
34	2	-	8.0	1.5	9.5	MURATURA	Abitazione civile	Cattivo
35	1	-	6.0	1.5	7.5	C.A.	Magazzino	Ragionevole
36	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Attività commerciale/Magazzino	Buono
37	2	-	8.0	1.5	9.5	C.A.	Attività commerciale/Magazzino	Buono

Tabella 7 – Caratteristiche principali edifici interferenti

Con riferimento ai fabbricati, lungo il tracciato sono state identificate le sezioni di analisi ritenute più significative per lo studio dell'interferenza scavo-preesistenze.

Nelle seguenti figure, vengono riportate le viste planimetriche degli edifici analizzati, al fine di rendere più chiara la lettura dei risultati ottenuti.

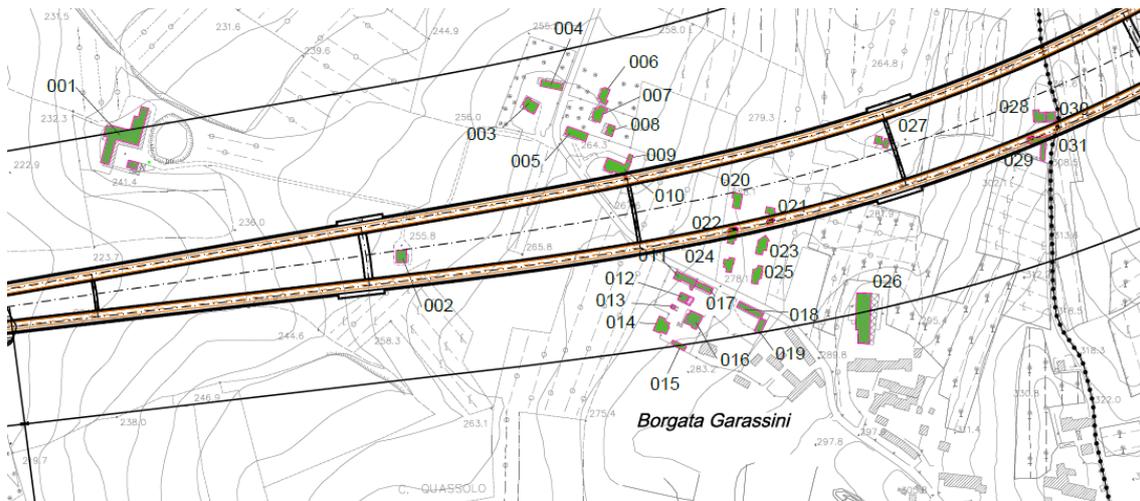


Figura 11 – Planimetria edifici interferenti (Borgata Garassini)

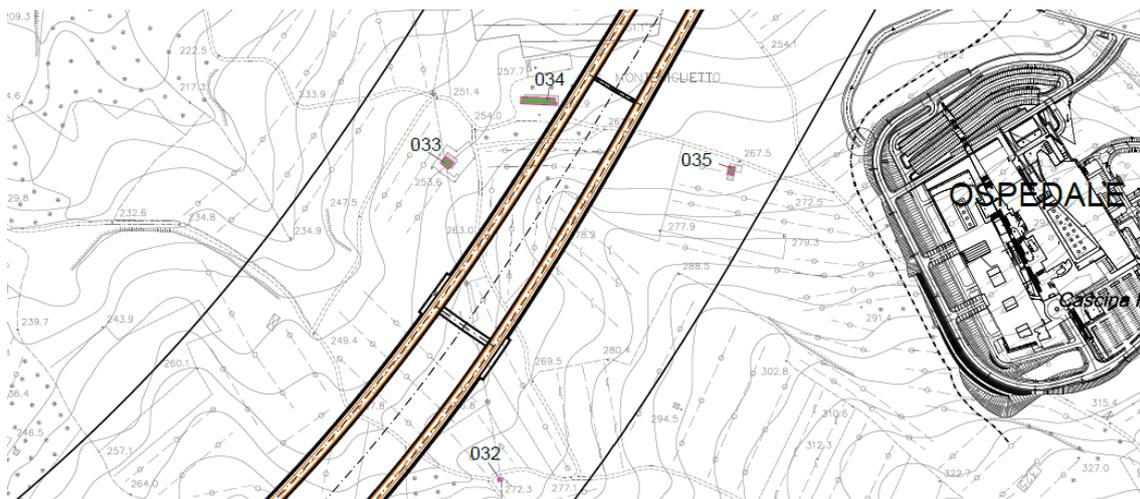


Figura 12 – Planimetria edifici interferenti (Zona Ospedale Alba-Bra)



Figura 13 – Planimetria edifici interferenti (Imbocco Alba)

Dalle immagini sopra riportate si nota che il tracciato delle due gallerie, ad esclusione di rari casi, non interferisce mai direttamente con gli edifici, che risultano localizzati ai lati o tra le stesse, risentendo, come mostrato nel seguito, in modo meno significativo degli effetti degli scavi.

Con riferimento alle analisi svolte, infine si riportano nel seguito le tabelle di sintesi dei risultati in cui si evidenziano i valori ottenuti attraverso le analisi empiriche, in termini di cedimento massimo dell'edificio, cedimento massimo in corrispondenza del bacino, deformazioni massime nelle zone di hogging (zona tesa) e sagging (zona compressa) e relativa classe di danno.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Interferenza	Copertura da piano fondazione. [m]		K	Vp [%]	W _{max,bacino} [mm]	W _{max,edificio} [mm]	ε _{max,hogging}	ε _{max,sagging}	Classe di danno
	canna valle	canna monte							
01	10.9	11.9	0.4	0.50%	49.4	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	98.8	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	148.2	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	32.9	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	65.9	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	98.8	0.0	0.000%	0.000%	0
02	38.5	40.5	0.4	0.50%	19.9	12.5	0.028%	0.000%	0
				1.00%	39.8	25.0	0.056%	0.000%	1
				1.50%	59.8	37.4	0.084%	0.000%	2
			0.6	0.50%	14.4	13.4	0.007%	0.000%	0
				1.00%	28.8	26.7	0.014%	0.000%	0
				1.50%	43.2	40.1	0.021%	0.000%	0
03	48.5	51.0	0.4	0.50%	16.4	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	32.9	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	49.3	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.4	0.3	0.002%	0.000%	0
				1.00%	24.8	0.7	0.004%	0.000%	0
				1.50%	37.3	1.0	0.006%	0.000%	0
04	49.5	52.0	0.4	0.50%	16.2	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	32.3	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	48.5	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.2	0.1	0.001%	0.000%	0
				1.00%	24.5	0.2	0.002%	0.000%	0
				1.50%	36.7	0.2	0.002%	0.000%	0
05	49.5	52.5	0.4	0.50%	16.1	1.8	0.008%	0.000%	0
				1.00%	32.3	3.5	0.017%	0.000%	0
				1.50%	48.4	5.3	0.025%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.2	4.0	0.010%	0.000%	0
				1.00%	24.3	8.1	0.019%	0.000%	0
				1.50%	36.5	12.1	0.029%	0.000%	0
06	48.0	52.5	0.4	0.50%	16.6	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	33.1	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	49.7	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.2	0.5	0.003%	0.000%	0
				1.00%	24.5	0.9	0.006%	0.000%	0
				1.50%	36.7	1.4	0.009%	0.000%	0
07	48.0	52.5	0.4	0.50%	16.6	0.2	0.001%	0.000%	0
				1.00%	33.1	0.5	0.003%	0.000%	0
				1.50%	49.7	0.7	0.004%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.2	1.7	0.007%	0.000%	0
				1.00%	24.5	3.3	0.013%	0.000%	0
				1.50%	36.7	5.0	0.020%	0.000%	0
08	48.0	52.5	0.4	0.50%	16.6	1.6	0.008%	0.000%	0
				1.00%	33.1	3.2	0.015%	0.000%	0
				1.50%	49.7	4.8	0.023%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.2	3.9	0.009%	0.000%	0
				1.00%	24.5	7.9	0.018%	0.000%	0
				1.50%	36.7	11.8	0.027%	0.000%	0
09	45.5	50.0	0.4	0.50%	17.3	12.5	0.003%	0.000%	0
				1.00%	34.6	25.1	0.006%	0.001%	0
				1.50%	51.9	37.6	0.010%	0.001%	0
			0.6	0.50%	12.5	10.2	0.000%	0.000%	0
				1.00%	25.0	20.4	0.000%	0.001%	0
				1.50%	37.5	30.7	0.000%	0.001%	0
10	45.5	50.0	0.4	0.50%	17.3	17.2	0.004%	0.005%	0
				1.00%	34.6	34.4	0.008%	0.009%	0
				1.50%	51.9	51.6	0.012%	0.014%	0
			0.6	0.50%	12.5	12.2	0.000%	0.001%	0
				1.00%	25.0	24.4	0.000%	0.003%	0
				1.50%	37.5	36.6	0.000%	0.004%	0



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Interferenza	Copertura da piano fondazione. [m]		K	Vp [%]	W _{max,bacino} [mm]	W _{max,edificio} [mm]	ε _{max,hogging}	ε _{max,sagging}	Classe di danno
	canna valle	canna monte							
11	48.5	52.0	0.4	0.50%	16.4	6.1	0.011%	0.000%	0
				1.00%	32.8	12.2	0.023%	0.000%	0
				1.50%	49.2	18.2	0.034%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.0	6.8	0.005%	0.000%	0
				1.00%	24.0	13.7	0.010%	0.000%	0
				1.50%	36.1	20.5	0.014%	0.000%	0
12	48.5	52.0	0.4	0.50%	16.4	0.9	0.005%	0.000%	0
				1.00%	32.8	1.9	0.010%	0.000%	0
				1.50%	49.2	2.8	0.015%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.0	3.0	0.008%	0.000%	0
				1.00%	24.0	5.9	0.015%	0.000%	0
				1.50%	36.1	8.9	0.023%	0.000%	0
13	48.5	51.5	0.4	0.50%	16.4	0.3	0.002%	0.000%	0
				1.00%	32.8	0.6	0.005%	0.000%	0
				1.50%	49.2	0.8	0.007%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.1	1.7	0.007%	0.000%	0
				1.00%	24.1	3.5	0.014%	0.000%	0
				1.50%	36.2	5.2	0.022%	0.000%	0
14	48.0	52.5	0.4	0.50%	16.6	0.1	0.001%	0.000%	0
				1.00%	33.1	0.2	0.001%	0.000%	0
				1.50%	49.7	0.2	0.002%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.2	1.0	0.004%	0.000%	0
				1.00%	24.5	2.0	0.009%	0.000%	0
				1.50%	36.7	3.0	0.013%	0.000%	0
15	48.5	51.5	0.4	0.50%	16.4	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	32.8	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	49.2	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.1	0.1	0.001%	0.000%	0
				1.00%	24.1	0.2	0.002%	0.000%	0
				1.50%	36.2	0.3	0.003%	0.000%	0
16	47.0	50.5	0.4	0.50%	16.8	0.1	0.000%	0.000%	0
				1.00%	33.7	0.1	0.001%	0.000%	0
				1.50%	50.5	0.2	0.001%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.2	0.9	0.004%	0.000%	0
				1.00%	24.4	1.8	0.008%	0.000%	0
				1.50%	36.5	2.7	0.012%	0.000%	0
17	50.0	55.5	0.4	0.50%	16.0	2.6	0.010%	0.000%	0
				1.00%	32.0	5.1	0.019%	0.000%	0
				1.50%	48.0	7.7	0.029%	0.000%	0
			0.6	0.50%	11.9	4.5	0.007%	0.000%	0
				1.00%	23.9	9.0	0.013%	0.000%	0
				1.50%	35.8	13.5	0.020%	0.000%	0
18	54.0	58.5	0.4	0.50%	15.0	0.2	0.001%	0.000%	0
				1.00%	30.0	0.3	0.002%	0.000%	0
				1.50%	45.1	0.5	0.003%	0.000%	0
			0.6	0.50%	11.5	1.3	0.005%	0.000%	0
				1.00%	23.1	2.6	0.010%	0.000%	0
				1.50%	34.6	3.8	0.015%	0.000%	0
19	54.0	58.5	0.4	0.50%	15.0	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	30.0	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	45.1	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	11.5	0.3	0.002%	0.000%	0
				1.00%	23.1	0.7	0.004%	0.000%	0
				1.50%	34.6	1.0	0.007%	0.000%	0
20	54.0	58.0	0.4	0.50%	15.0	10.8	0.013%	0.000%	0
				1.00%	30.0	21.6	0.027%	0.000%	0
				1.50%	45.0	32.4	0.040%	0.000%	0
			0.6	0.50%	11.4	10.9	0.001%	0.000%	0
				1.00%	22.8	21.9	0.003%	0.000%	0
				1.50%	34.3	32.8	0.004%	0.000%	0



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Interferenza	Copertura da piano fondazione. [m]		K	Vp [%]	W _{max,bacino} [mm]	W _{max,edificio} [mm]	ε _{max,hogging}	ε _{max,sagging}	Classe di danno
	canna valle	canna monte							
21	59.0	62.0	0.4	0.50%	14.0	13.3	0.000%	0.003%	0
				1.00%	27.9	26.6	0.000%	0.006%	0
				1.50%	41.9	39.9	0.000%	0.009%	0
			0.6	0.50%	11.1	10.6	0.000%	0.001%	0
				1.00%	22.2	21.2	0.000%	0.001%	0
				1.50%	33.4	31.8	0.000%	0.002%	0
22	47.5	53.0	0.4	0.50%	16.7	15.1	0.000%	0.006%	0
				1.00%	33.4	30.3	0.000%	0.011%	0
				1.50%	50.0	45.4	0.000%	0.017%	0
			0.6	0.50%	12.1	10.8	0.000%	0.001%	0
				1.00%	24.2	21.6	0.000%	0.002%	0
				1.50%	36.3	32.4	0.000%	0.004%	0
23	59.0	62.0	0.4	0.50%	14.0	11.7	0.002%	0.001%	0
				1.00%	27.9	23.5	0.005%	0.002%	0
				1.50%	41.9	35.2	0.007%	0.003%	0
			0.6	0.50%	11.1	8.9	0.000%	0.000%	0
				1.00%	22.2	17.8	0.000%	0.001%	0
				1.50%	33.4	26.7	0.000%	0.001%	0
24	47.5	53.0	0.4	0.50%	16.7	7.6	0.010%	0.000%	0
				1.00%	33.4	15.2	0.020%	0.000%	0
				1.50%	50.0	22.7	0.030%	0.000%	0
			0.6	0.50%	12.1	7.5	0.002%	0.000%	0
				1.00%	24.2	14.9	0.005%	0.000%	0
				1.50%	36.3	22.4	0.007%	0.000%	0
25	54.0	58.0	0.4	0.50%	15.0	3.4	0.008%	0.000%	0
				1.00%	30.0	6.9	0.017%	0.000%	0
				1.50%	45.0	10.3	0.025%	0.000%	0
			0.6	0.50%	11.4	5.0	0.005%	0.000%	0
				1.00%	22.8	10.0	0.010%	0.000%	0
				1.50%	34.3	15.1	0.015%	0.000%	0
26	59.0	64.0	0.4	0.50%	14.0	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	28.0	0.1	0.000%	0.000%	0
				1.50%	42.0	0.1	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	11.2	0.6	0.002%	0.000%	0
				1.00%	22.4	1.1	0.003%	0.000%	0
				1.50%	33.6	1.7	0.005%	0.000%	0
27	55.5	62.0	0.4	0.50%	14.7	11.3	0.016%	0.000%	0
				1.00%	29.4	22.5	0.032%	0.000%	0
				1.50%	44.0	33.8	0.047%	0.000%	0
			0.6	0.50%	11.3	11.2	0.001%	0.000%	0
				1.00%	22.6	22.4	0.002%	0.000%	0
				1.50%	33.9	33.6	0.003%	0.001%	0
28	77.5	86.5	0.4	0.50%	11.7	10.4	0.001%	0.000%	0
				1.00%	23.5	20.8	0.002%	0.000%	0
				1.50%	35.2	31.2	0.002%	0.001%	0
			0.6	0.50%	10.2	9.7	0.000%	0.000%	0
				1.00%	20.3	19.4	0.000%	0.001%	0
				1.50%	30.5	29.0	0.000%	0.001%	0
29	75.5	84.5	0.4	0.50%	11.9	10.5	0.000%	0.002%	0
				1.00%	23.8	21.0	0.000%	0.005%	0
				1.50%	35.7	31.5	0.000%	0.007%	0
			0.6	0.50%	10.3	8.6	0.000%	0.000%	0
				1.00%	20.5	17.2	0.000%	0.001%	0
				1.50%	30.8	25.8	0.000%	0.001%	0
30	78.5	87.5	0.4	0.50%	11.7	10.4	0.000%	0.000%	0
				1.00%	23.3	20.7	0.000%	0.001%	0
				1.50%	35.0	31.1	0.000%	0.001%	0
			0.6	0.50%	10.1	9.4	0.000%	0.000%	0
				1.00%	20.2	18.8	0.000%	0.000%	0
				1.50%	30.3	28.1	0.000%	0.001%	0



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Interferenza	Copertura da piano fondazione. [m]		K	Vp [%]	W _{max,bacino} [mm]	W _{max,edificio} [mm]	ε _{max,hogging}	ε _{max,sagging}	Classe di danno
	canna valle	canna monte							
31	77.5	86.5	0.4	0.50%	11.7	10.1	0.000%	0.000%	0
				1.00%	23.5	20.2	0.000%	0.001%	0
				1.50%	35.2	30.4	0.000%	0.001%	0
			0.6	0.50%	10.2	8.2	0.000%	0.000%	0
				1.00%	20.3	16.3	0.000%	0.000%	0
				1.50%	30.5	24.5	0.000%	0.000%	0
32	41.5	51.0	0.4	0.50%	18.7	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	37.5	0.0	0.001%	0.000%	0
				1.50%	56.2	0.1	0.001%	0.000%	0
			0.6	0.50%	13.5	0.5	0.004%	0.000%	0
				1.00%	27.1	1.1	0.008%	0.000%	0
				1.50%	40.6	1.6	0.012%	0.000%	0
33	52.5	63.5	0.4	0.50%	15.9	0.2	0.002%	0.000%	0
				1.00%	31.9	0.4	0.003%	0.000%	0
				1.50%	47.8	0.7	0.005%	0.000%	0
			0.6	0.50%	13.1	1.6	0.007%	0.000%	0
				1.00%	26.1	3.2	0.014%	0.000%	0
				1.50%	39.2	4.8	0.020%	0.000%	0
34	45.0	51.5	0.4	0.50%	17.8	15.3	0.019%	0.002%	0
				1.00%	35.5	30.5	0.038%	0.004%	0
				1.50%	53.3	45.8	0.058%	0.006%	1
			0.6	0.50%	14.1	11.9	0.008%	0.001%	0
				1.00%	28.1	23.8	0.015%	0.002%	0
				1.50%	42.2	35.7	0.023%	0.004%	0
35	45.0	49.0	0.4	0.50%	17.7	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	35.3	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	53.0	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	13.9	0.1	0.001%	0.000%	0
				1.00%	27.7	0.1	0.001%	0.000%	0
				1.50%	41.6	0.2	0.002%	0.000%	0
36	4.5	11.0	0.4	0.50%	75.4	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	150.9	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	226.3	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	50.3	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	100.6	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	150.9	0.0	0.000%	0.000%	0
37	4.5	11.0	0.4	0.50%	75.4	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	150.9	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	226.3	0.0	0.000%	0.000%	0
			0.6	0.50%	50.3	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.00%	100.6	0.0	0.000%	0.000%	0
				1.50%	150.9	0.0	0.000%	0.000%	0

Tabella 8 – Sintesi dei risultati

Le analisi mostrano che la gran parte degli edifici risulta soggetta a cedimenti trascurabili dell'ordine di pochi millimetri. Il valore di cedimento massimo si riscontra per l'interferenza 10 in condizioni di $V_p=1.5\%$ e $k = 0,4$, attestandosi su un valore pari a circa 52 mm. In corrispondenza del bacino, si hanno i valori di cedimento massimo già discussi al precedente capitolo 4.1. (alcuni valori, in corrispondenza di coperture localmente molto ridotte, non sono significativi). Si ricorda ancora che i cedimenti massimi sono correlabili a volumi persi pari al 1.5%, atti a simulare uno scenario di rischio legato ad ipotesi di condizioni di

lavoro non ottimali, in cui si ipotizza una non perfetta performance nell'avanzamento della TBM.

Le deformazioni massime a cui sono soggetti i fabbricati risultano essere all'interno di un range definito da $0\% \leq \epsilon_{\max,h} \leq 0,084\%$ nella zona di hogging e da un range pari a $0\% \leq \epsilon_{\max,s} \leq 0,017\%$ nella zona di sagging.

Si osserva infine che le categorie di danno relative agli edifici analizzati sono sempre uguali a 0 e solo in un caso, l'interferenza 02, peraltro legata ad elevati volumi persi e quindi decisamente cautelativi, raggiunge una classe di danno pari a 1-2. Gli esiti delle analisi e la fascia di territorio interessata dal bacino di subsidenza sono riportati nell'elaborato 2.6E-dD.2.1.28 "Planimetria con valutazione delle subsidenze".

Categoria del danno	Intensità del danno	Deformazione limite di trazione ϵ_{lim} (%)
0	Trascurabile	0÷0.05
1	Molto lieve	0.05÷0.075
2	Lieve	0.075÷0.15
3	Moderata	0.15÷0.3
4	Severa	0.3÷0.45
5	Molto severa	>0.45

Tabella 9 – Boscardin e Cording, 1989

4.3. ANALISI ALLE DIFFERENZE FINITE

Per la situazione più critica individuata dalle analisi empiriche, si è proceduto ad un approfondimento tramite un'analisi alle differenze finite. Si è stati così in grado di analizzare il comportamento del terreno non più basandosi sulle ipotesi adottate dal metodo empirico ma utilizzando i parametri geotecnici reali.

In particolare lo studio ha permesso di ottenere il bacino di subsidenza indotto dagli scavi secondo le reali fasi operative. L'edificio per cui è stata condotta un'analisi di approfondimento risulta l'interferenza 02 che, a seguito delle analisi empiriche, è risultato in classe di danno 2 per volume perso pari a 1,5%.

In particolare lo studio ha permesso di ottenere i bacini di subsidenza indotti dagli scavi secondo le reali fasi operative come descritto in seguito:

- 1) Condizione geostatica
- 2) Scavo della canna di MONTE (destra) e attivazione pressione radiale fornita dalla TBM con reset dei cedimenti dovuti al carico dell'edificio
- 3) Disattivazione pressione radiale e realizzazione rivestimento canna di MONTE (destra)
- 4) Scavo della canna di VALLE (sinistra) e attivazione pressione radiale fornita dalla TBM
- 5) Disattivazione pressione radiale e realizzazione rivestimento canna di VALLE (sinistra)

L'analisi è stata condotta ottenendo per entrambi gli scavi un volume perso pari a $V_p \sim 1.5\%$, simulando così lo scenario di rischio in cui si prevede una non perfetta performance nell'avanzamento con TBM.

4.3.1. Codice di calcolo

Le analisi tenso-deformative presentate nel seguito, sono state condotte impiegando il codice di calcolo FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting, il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di comportamento, di tipo elastico o plastico, e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite. Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame, attraverso la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. In questo modo, le equazioni differenziali vengono trasformate in equazioni algebriche, da risolversi in successivi passi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato "esplicito per integrazione diretta nel tempo" (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agevolmente e molto velocemente per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l'invertibilità di matrici). L'adattamento del metodo alle differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l'approccio di Wilkins M.L..

La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata un reticolo, in genere di maglie quadrilatera, in corrispondenza dei cui nodi (gridpoints) sono definite le grandezze in gioco. E' allora possibile approssimare la derivata prima di una funzione rispetto a una variabile indipendente, con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione stessa nel passare da un nodo ad uno contiguo, e la corrispondente variazione della variabile indipendente.

Con riferimento alla figura seguente, può assumersi ad un certo istante t una delle seguenti equivalenze:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x},$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t}{2\Delta x},$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i,j}^t - u_{i-1,j}^t}{\Delta x}.$$

In modo analogo si opera per le derivate rispetto ad y, e per le derivate di ordine superiore. La legge costitutiva del materiale viene espressa nella seguente forma:

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \sigma_{i,j}^t = E \cdot \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x}$$

Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione “esplicito condizionatamente stabile”, la cui sequenza di calcolo iterativo, illustrata schematicamente nella figura seguente, comprende i seguenti passi:

- per ogni nodo della griglia si valuta la massa m, la risultante delle forze esterne F_e (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne F_i , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo F_u (unbalanced force $F_u = F_e - F_i$);
- per ogni gridpoint si scrive l’equazione di Newton $F_u = m \cdot a$, tramite la quale è possibile determinare l’accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l’accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo;
- dal campo di spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo;

- la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la F_u , dando inizio ad un nuovo passo di calcolo. Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita.

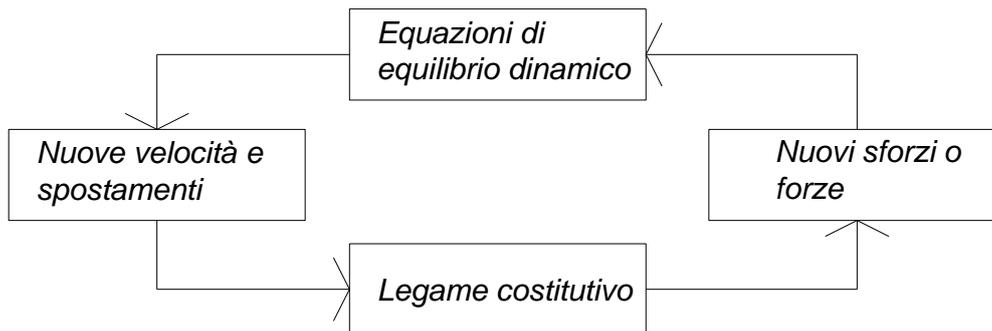


Figura 14 – Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC

4.3.2. Parametri geotecnici

La scelta dei valori dei parametri di calcolo, adottati nell’analisi numerica, deriva dalla caratterizzazione geotecnica dei materiali, cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

I parametri geotecnici di calcolo dei materiali interessati dallo scavo della galleria, utilizzati nell’analisi, vengono di seguito riassunti.

Formazione	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E [Mpa]	ν [-]
Unità 4/5	20	32	5	20	0,3
Unità 6	20	24	40	200	0,3
Unità 7	21	30	100	200	0,3



Tabella 10 - Parametri geomeccanici

4.3.3. Caratteristiche dei materiali strutturali

Per i materiali con cui verranno realizzati i conci prefabbricati di rivestimento, si considerano le seguenti caratteristiche meccaniche:

Calcestruzzo: Classe C40/50

resistenza caratteristica su cubi:	$R_{ck} = 50 \text{ MPa}$
resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} = 41.5 \text{ MPa}$
resistenza cilindrica media:	$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 49.5 \text{ MPa}$
resistenza media a trazione semplice:	$f_{ctm} = 0.3 \cdot (f_{ck})^{2/3} = 3.6 \text{ MPa}$
modulo elastico:	$E_c = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3} = 35547 \text{ MPa}$
coefficiente di Poisson:	$\nu = 0.2$
massima deformazione di accorciamento:	$\epsilon_c = 3.5 \text{ ‰}$

4.3.4. Sintesi dei risultati

Con riferimento alle analisi svolte, si riporta nel seguito la sintesi dei risultati, fornendo in particolare il bacino di subsidenza determinato ed un confronto tra il bacino ottenuto dall'analisi numerica e dall'analisi empirica. Si sottolinea come tali analisi siano state condotte con riferimento al piano fondazione per un volume perso pari a $V_p \sim 1.5\%$. Sui bacini così ottenuti è stata infine effettuata un'analisi di classificazione del danno secondo quanto riportato in letteratura.

Si riporta nel seguito la tabella di sintesi dell'analisi svolta nella quale viene indicato l'edificio analizzato e le coperture di riferimento.

Interferenza	$H_{\text{calcolo, valle}}$ [m]	$H_{\text{calcolo, monte}}$ [m]
02	38.5	40.5

Tabella 11 – Coperture

Per un migliore inquadramento dell'edificio analizzato viene inoltre riportata un'immagine del prospetto del fabbricato interessato dagli scavi.



Figura 15 – Prospetto edificio 02

La mesh di calcolo adottata possiede le seguenti caratteristiche:

- Numero di zone: 22956
- Sviluppo lungo x: -130 m — 130 m
- Sviluppo lungo y: 40 m — -70.0 m

Il reticolo risulta vincolato in direzione verticale ed orizzontale in corrispondenza del lembo inferiore e in direzione orizzontale sui lati destro e sinistro. La discretizzazione appare più fitta in corrispondenza delle zone di scavo. Le gallerie sono di diametro pari a 15.30 m. La copertura delle gallerie risulta pari a 38.5 m in corrispondenza della canna di valle e pari a 40.5 m in corrispondenza della canna di monte mentre l'interasse tra le due canne è di 33 m. La quota di fondazione risulta essere pari a circa -1.5 m dal P.C..

Viene considerata in questa modellazione una pressione radiale fornita dalla TBM per il sostegno a breve termine dello scavo tale da ottenere un volume perso $V_p \sim 1.5\%$.

Nella seguente figura viene mostrata la mesh di calcolo utilizzata:

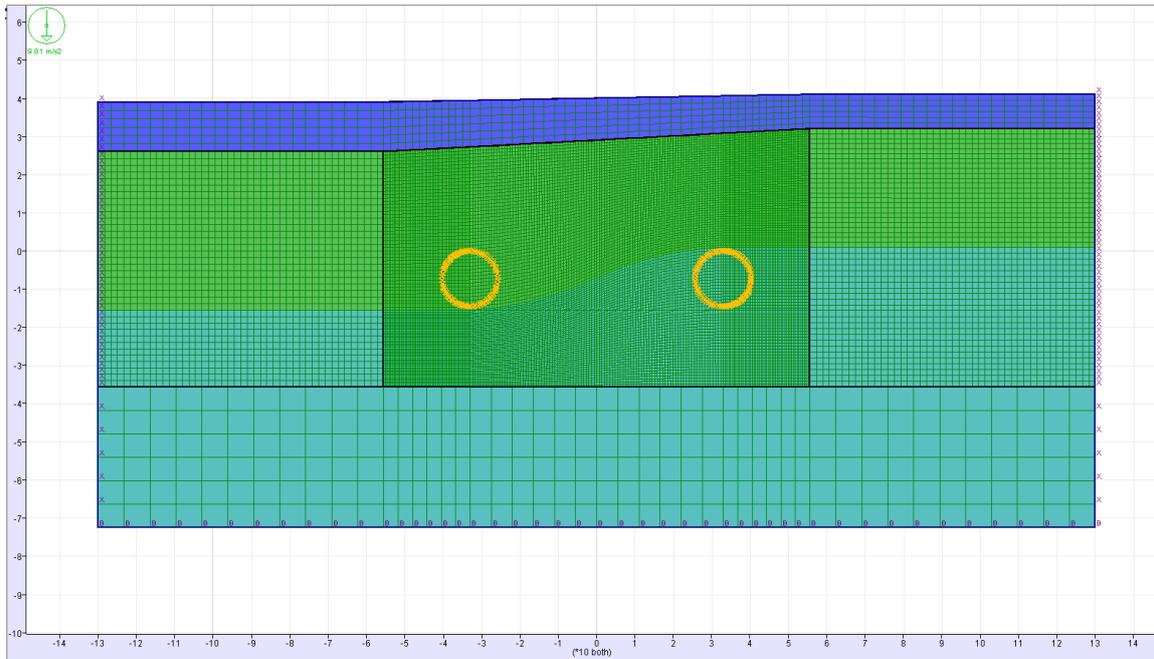


Figura 16 – Mesh di calcolo

Viene riportata infine la tabella di riepilogo della stratigrafia di calcolo.

		Canna di valle	Canna di monte
		Stratigrafia	Stratigrafia
	Classificazione		
Strato 1	Unità 4/5	da P.C. a -13 m	da P.C. a -9 m
Strato 2	Unità 6	da -13 m a -53 m	da -9 m a -39 m
Strato 3	Unità 7	da -53 m a -110 m	da -39 m a -110 m

Tabella 12 - Stratigrafia

Si osserva che la successione stratigrafica è differente tra le due canne, in particolare si ha che il profilo dello strato di gessi, Unità 6, lambisce in chiave

calotta la canna di monte ed in arco rovescio la canna di valle. Ciò determina un comportamento differente del cavo tra le due gallerie a seguito dello scavo, come pure l'avanzamento con TBM viene condotto con differenti pressioni di contenimento del fronte di scavo.

4.3.4.1. Sintesi dei risultati

Vengono riportati nel seguito i risultati ottenuti dalla simulazione ed i grafici in cui si mostra l'andamento dei cedimenti a piano di fondazione nella sezione analizzata sia a seguito dello scavo della galleria di monte sia il bacino di subsidenza cumulato indotto dallo scavo di entrambe le gallerie.

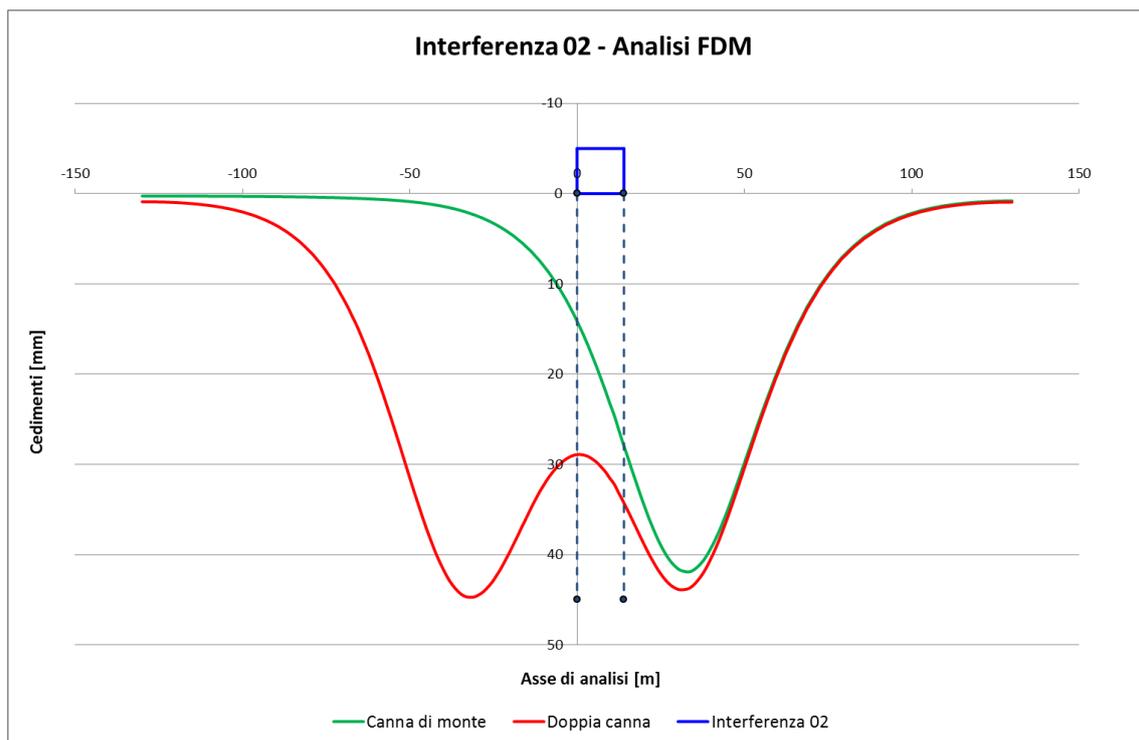


Figura 17 – Bacino di subsidenza

Dai risultati è possibile notare che, come prevedibile, lo scavo della canna di valle determina un regime di cedimenti leggermente maggiore di quello generato dalla canna di monte. Tale comportamento è spiegabile in accordo

alla differente copertura in chiave calotta delle gallerie che risulta inferiore per la canna di valle, inducendo così cedimenti maggiori.

Nel seguente grafico è riportato un confronto dei bacini di subsidenza ottenuti tramite analisi empirica ed analisi numerica.

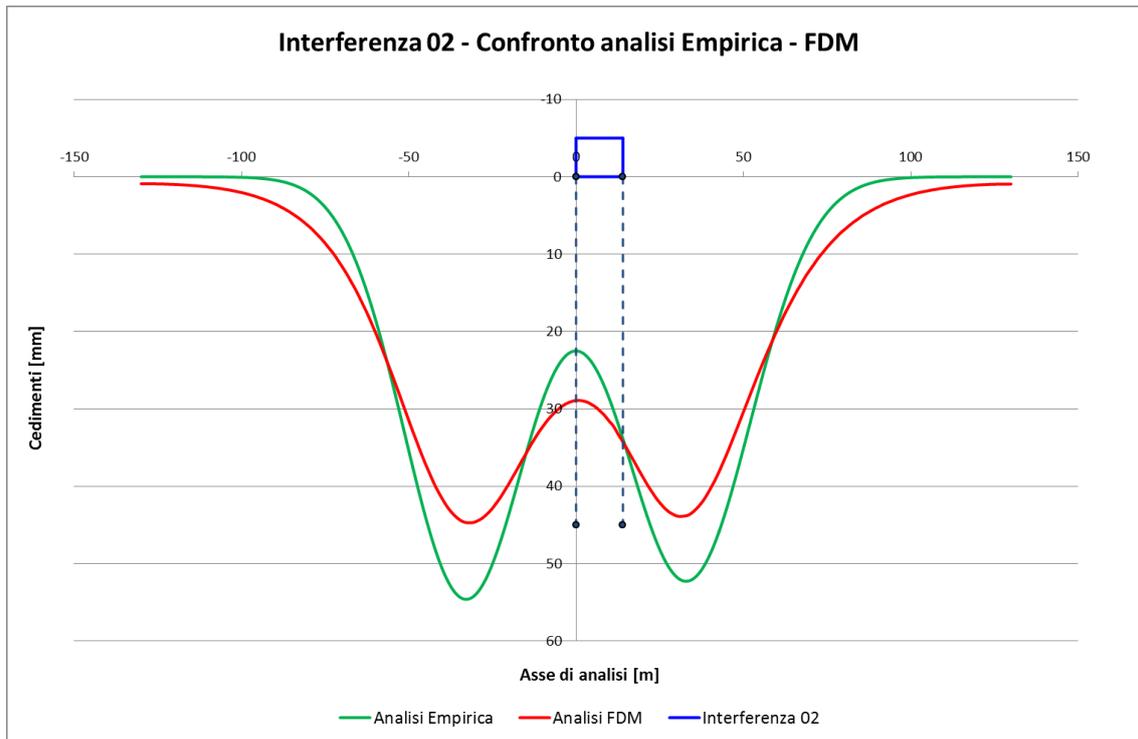


Figura 18 – Confronto bacini di subsidenza

Si osserva che l'analisi empirica, come da attese, risulta essere più conservativa di quella numerica risultando in cedimenti maggiori per entrambe le canne e con pendenze più accentuate dei rami della subsidenza.

Sono state infine eseguite analisi di classificazione del danno, secondo quanto riportato in letteratura da Boscardin e Cording, ricreando tramite le formulazioni empiriche il bacino di subsidenza ottenuto dall'analisi alle differenze finite. Le analisi sono state effettuate sia a seguito dello scavo della canna di monte sia a scavo di entrambe le gallerie completato, mostrando che a seguito dello scavo della canna di monte la classe di danno risulta essere pari a 0 mentre a seguito



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

dello scavo della seconda canna si ottiene una classe di danno pari a 1, comunque inferiore a quanto ottenuto dalle analisi empiriche preliminari.

Nella seguente tabella sono mostrati i risultati delle analisi di classificazione del danno in termini di cedimenti, deformazioni e classe di danno. Vengono inoltre riportati i di k che caratterizzano i profili ottenuti nelle analisi numeriche alle differenze finite.

Analisi	k		Cedimento max bacino [mm]	Cedimento max edificio [mm]	$\epsilon_{\max, \text{hogging}}$ [%]	$\epsilon_{\max, \text{sagging}}$ [%]	Classe di danno
	Valle	Monte					
Canna di monte	-	0.48	41.9	29.1	0.022%	0.000%	0
Singola canna	0.49	0.48	44.7	34.3	0.059%	0.000%	1

Figura 19 – Classificazione del danno

Come si può osservare, k risulta essere pari a circa 0,5 per entrambe le canne (valore medio nel range 0.4 – 0.6 impiegato nelle analisi). Ciò è in linea con le aspettative di progetto considerando il contesto geomeccanico della sezione analizzata. Si osserva inoltre che le assunzioni effettuate per le analisi empiriche consentono di investigare un adeguato range del parametro k .

5. ANALISI DI INTERFERENZA SCAVI-CORPI DETRITICI

In un settore della galleria Verduno, gli approfondimenti geologici ed idrogeologici hanno individuato la presenza di corpi detritici costituiti da materiale granulare, quale ghiaia e sabbia, con acqua in pressione variabile tra 2 e 6 bar. Durante lo scavo è dunque prevedibile che il fronte venga ad interessare questi corpi operando un drenaggio parziale; in canna di valle sono presenti lenti principalmente sul fronte, mentre in canna di monte la presenza dei corpi detritici è posta principalmente sopra la calotta della galleria. Si può quindi attendere che ai cedimenti associabili alla variazione tenso-deformativa nell'ammasso a seguito dello scavo (comportamento meccanico del mezzo) si sovrappongano cedimenti legati all'azione di drenaggio operata dallo scavo (comportamento idraulico).

Nel presente capitolo si presenta uno studio semplificato volto a quantificare il possibile impatto che l'abbattimento del battente idraulico, generato dallo scavo con TBM, nei corpi detritici, può generare a piano campagna. Prendendo in esame il corpo detritico principale, avente spessore di circa 15 m e posto a circa 3 m sopra la calotta della galleria, l'analisi condotta permette pertanto di verificare l'effetto di compressione dello strato detritico, che si genera a seguito della fuoriuscita d'acqua dai pori durante lo scavo delle gallerie, ed i conseguenti cedimenti verticali a piano campagna, ovvero i possibili risentimenti sui fabbricati posti in superficie.

L'analisi è stata svolta considerando 4 possibili scenari di pressione residua dei pori a seguito dell'abbattimento della falda durante lo scavo:

- $P = 3$ bar;
- $P = 2$ bar;
- $P = 1$ bar;

- $P = 0$ bar.

Questo considerando che la TBM, del tipo EPB, impiegata per lo scavo consente di mettere in fronte in pressione, fino a valori in calotta generalmente pari a 3-4 bar, così da controbilanciare la spinta idrostatica e mitigare, fino ad annullare, l'effetto di drenaggio.

Le analisi sono state condotte tramite il programma a differenze finite FLAC 7.0 adottando un modello fluido-meccanico accoppiato.

Nella seguente tabella viene riportata la stratigrafia adottata nei calcoli, ricavata dal profilo geomeccanico di previsione nel settore ove si ha la presenza del corpo detritico (Unità 7a) di maggiore spessore, pari a 15 m.

	Classificazione	Stratigrafia
Strato 1	Unità 4/5	da P.C. a -25 m
Strato 2	Unità 7	da -25 m a -32 m
Strato 3	Unità 7a	da -32 m a -47 m
Strato 4	Unità 7	da -47 m a -120 m

Tabella 13: Stratigrafia

5.1. MODELLO DI CALCOLO

Per la modellazione viene adottato un modello fluido-meccanico accoppiato così da quantificare l'effetto dell'abbattimento del livello di falda in considerazione delle pressioni al fronte operate dalla TBM. Viene considerato il modello illustrato nella figura sottostante in condizioni di deformazioni piana e nell'ipotesi di simmetria rispetto all'asse verticale, nelle seguenti ipotesi semplificative:

- Assenza di flusso per le unità 4/5 e 7 (limi, argille e marne);

- Comportamento fluido-meccanico accoppiato per l'unità 7a (corpi detritici).

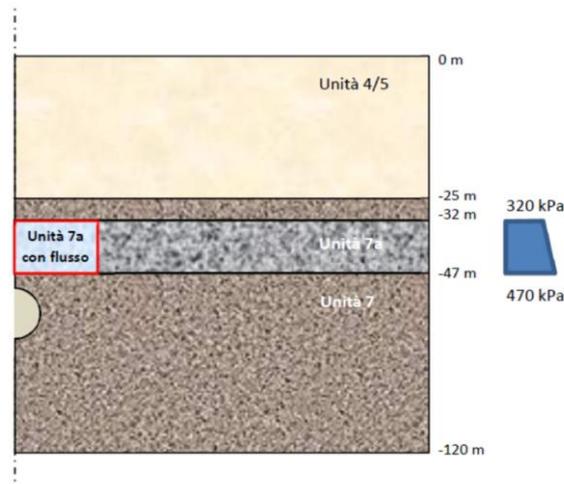


Figura 20 – Modello di calcolo

Il problema viene semplificato modellando il flusso solo all'interno della zona contrassegnata come "Unità 7a con flusso", considerando che la conducibilità idraulica delle altre unità sia trascurabile. Il modello viene inizializzato con tensioni geostatiche e una distribuzione idrostatica coincidente con quella che svilupperebbe con falda a piano campagna (per altro del tutto in linea con i rilevamenti piezometrici condotti all'interno dei corpi detritici). Nel modello i contorni contrassegnati in rosso sono considerati impermeabili, non potendo esservi flusso dall'alto e dal basso ed ipotizzando che la zona di influenza del drenaggio della galleria riguardi una fascia di estensione di 25m circa (per lato).

Una volta stabilito l'equilibrio iniziale, viene simulato l'abbattimento della falda nella zona contornata in rosso valutandone così l'effetto nelle lenti di corpi detritici.

Nella seguente tabella vengono riportati i parametri geomeccanici adottati nel calcolo.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Formazione	γ_{nat} [kN/m ³]	γ_{dry} [kN/m ³]	n [-]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E [Mpa]	v [-]
Unità 4/5	20	16	0,412	32	5	20	0,3
Unità 7a	19	14	0,454	35	0	40	0,3
Unità 7	21	17,5	0,333	30	100	200	0,3

Tabella 14 – Parametri geomeccanici

L'unità 7a è caratterizzata da valori di permeabilità k compresi tra $1E-5 \div 1E-6$ m/s. Nel calcolo viene considerata una permeabilità pari a $1E-5$ m/s. Nel seguito viene presentata un'analisi di sensibilità in cui viene adottato il valore massimo di permeabilità del range individuato, evidenziando come questo parametro risulta poco influente sulla valutazione del cedimento in superficie.

Merita invece particolare attenzione l'assegnazione del modulo di compressibilità dell'acqua. Tale parametro in natura risulta essere pari a circa $2E9$ Pa, il quale se assegnato come valore di input nell'analisi, conduce però a risultati non realistici. Ciò è dovuto a problematiche intrinseche al codice di calcolo FLAC, per il quale, come suggerito dal Rivenditore italiano Harpaceas s.r.l., l'assunzione di valori del modulo di compressibilità venti volte superiori a quello del terreno in cui si instaura il flusso, conduce ai risultati numericamente non corretti. Si è quindi seguito il suggerimento dei Tecnici Harpaceas, impiegando riducendo di un ordine di grandezza tale vale, ed adottando così per le analisi un modulo di compressibilità pari a $2E8$ Pa.

5.2. ANALISI DI SENSIBILITÀ



Come analisi preliminare è stato condotto uno studio di sensibilità per individuare la variabilità del cedimento con i parametri utilizzati nel calcolo. In particolare di è fatto riferimento alla variabilità dei seguenti dati di input:

- permeabilità dello strato detritico k ;
- modulo elastico dello strato detritico E ;
- altezza della falda H_w .

I risultati di tali analisi, effettuati con pressione dei pori residua nulla (pressione idrostatica finale nello strato pari a zero), vengono riportati nel seguito.

Variabilità della permeabilità k

La prima analisi di sensibilità riguarda la variabilità della permeabilità dello strato detritico. Come accennato in precedenza l'unità 7a è caratterizzata da valori di permeabilità k compresi tra $1E-5 \div 1E-6$ m/s. I risultati delle analisi condotte adottando entrambi i valori di k mostrano che la stessa non influisce sull'andamento dei cedimenti ottenendo per entrambe le analisi un cedimento massimo pari a circa 8,8 mm. Nel seguente grafico viene riportato l'andamento dei cedimenti ed è possibile notare la sovrapposizione delle curve di cedimento.

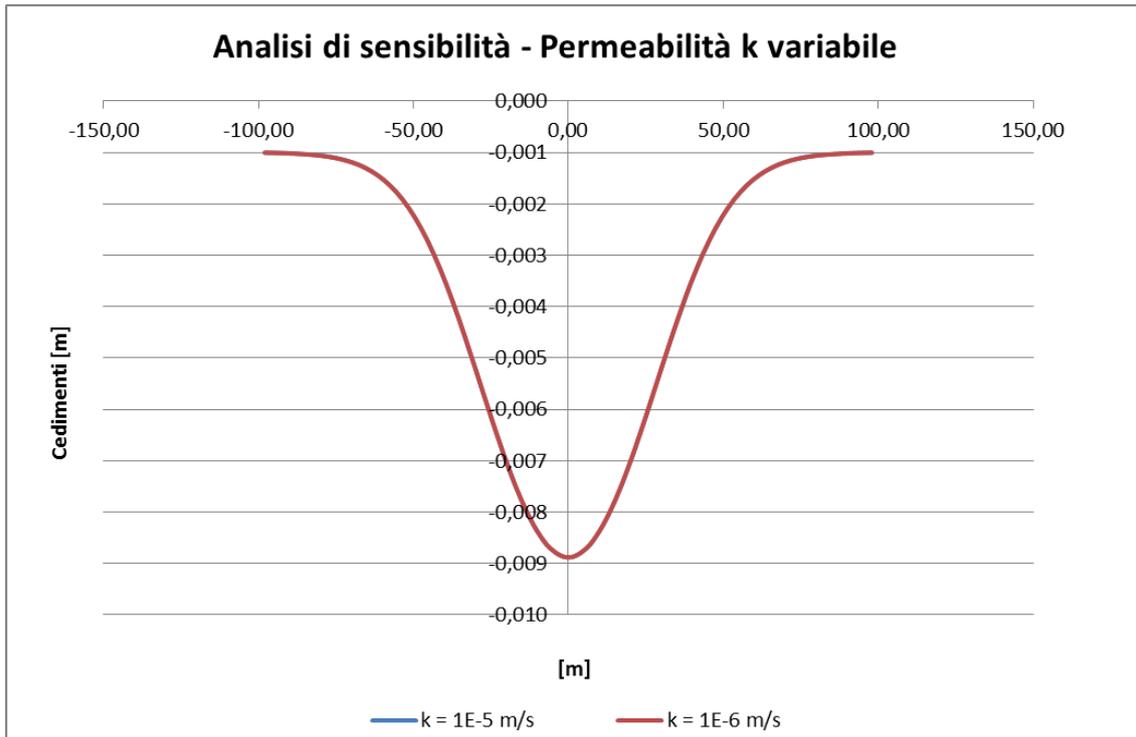


Figura 21 – Cedimenti al variare di k

Variabilità del modulo elastico dello strato detritico E

Si osserva ora l'andamento dei cedimenti al variare del modulo elastico dell'unità 7a. Le analisi sono condotte sia con un modulo elastico dello strato detritico pari a E=40MPa e pari a E=80MPa.

I risultati mostrano una riduzione del cedimento all'aumentare della rigidezza dello strato di terreno interessato dal flusso ottenendo i seguenti risultati.

MODULO ELASTICO	CEDIMENTO
[Mpa]	[mm]
40	8,8
80	7,0

Tabella 15 – Variabilità modulo elastico - Risultati

Nel seguente grafico viene riportato l'andamento dei cedimenti in cui si osserva che l'irrigidimento dello strato detritico comporta, oltre a un abbattimento del cedimento massimo, un incremento dell'ampiezza del bacino di subsidenza indotto dal drenaggio la cui subsidenza risulta pertanto essere caratterizzata da pendenze più "dolci".

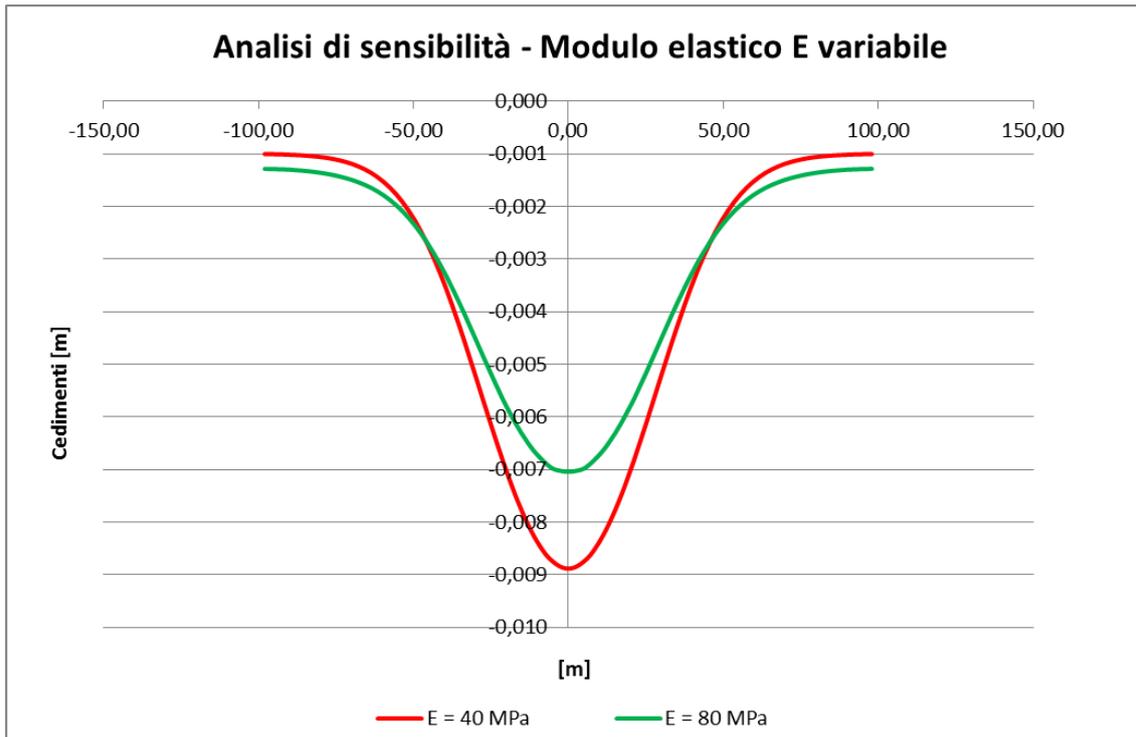


Figura 22 – Cedimenti al variare di E

Variabilità dell'altezza di falda H_w

L'ultimo studio è rivolto alla dipendenza del cedimento al variare del livello di falda. In particolare si sono analizzate le due condizioni di falda a piano campagna e falda a -10 m da p.c..

I risultati mostrano, in linea con le attese, una riduzione del cedimento al diminuire del livello di falda secondo quanto riportato in tabella.

ALTEZZA FALDA H_W	CEDIMENTO
[m]	[mm]
p.c.	8,8
-10 da p.c.	7,3

Tabella 16 – Variabilità falda iniziale - Risultati

Nel seguente grafico viene riportato l'andamento dei cedimenti in cui si osserva che un livello di falda più basso comporta sia una riduzione del cedimento massimo che una riduzione dell'ampiezza del bacino di subsidenza.

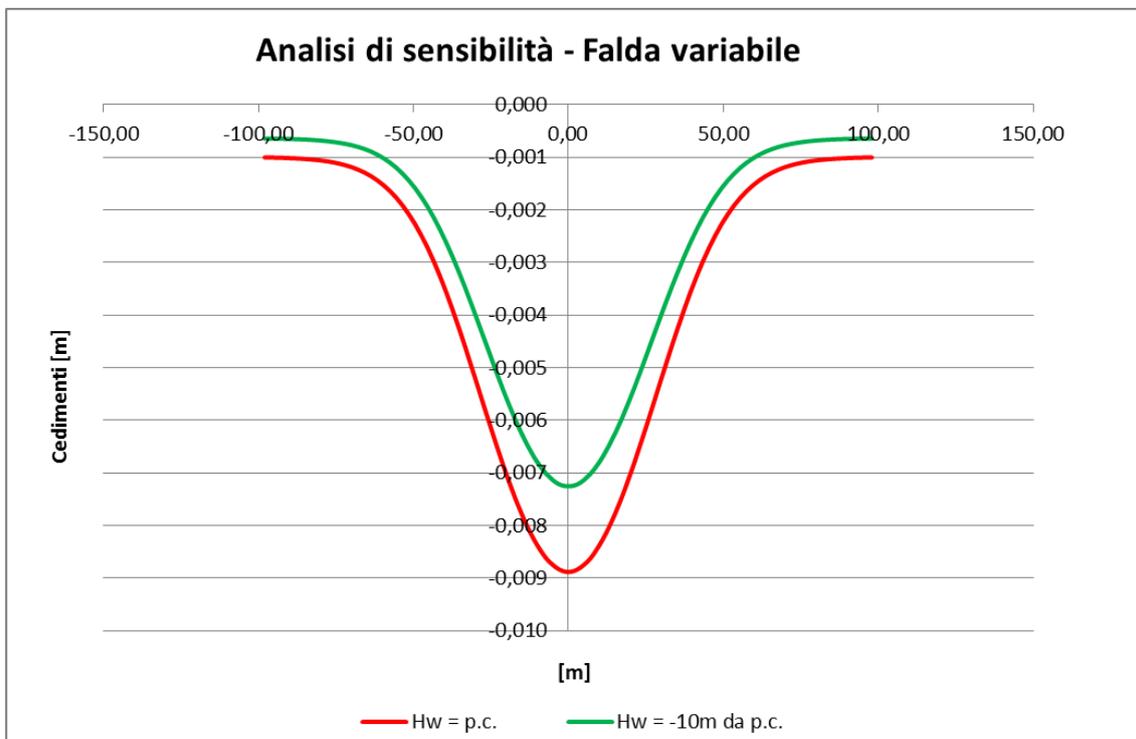


Figura 23 – Cedimenti al variare di E

5.3. SIMULAZIONE DELLO SCAVO CON TBM - SINTESI DEI RISULTATI

Come descritto in precedenza le analisi numeriche sono state condotte considerando quattro scenari di pressione residua nei pori, a seguito dell'abbattimento di falda generato dal passaggio della TBM, ovvero della possibile pressione presente nella camera di scavo:

- $P = 3$ bar;
- $P = 2$ bar;
- $P = 1$ bar;
- $P = 0$ bar.

I parametri geomeccanici di calcolo sono i medesimi riportati in precedenza e riproposti nella seguente tabella.

Formazione	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E [Mpa]	ν [-]
Unità 4/5	20	32	5	20	0,3
Unità 7a	14*	35	0	40	0,3
Unità 7	21	30	100	200	0,3

* γ_{dry}

Tabella 17 – Parametri geomeccanici

5.3.1. Esame dei risultati

Nel seguito vengono riportati i risultati di cedimento ottenuti dalle analisi. Si osserva che, come da attese, il cedimento risulta maggiore al diminuire della pressioni residua nei pori con valore minimo pari a 1,8 mm e massimo pari a 8.8 mm.

Pressione [bar]	Cedimento [mm]
3	1.8
2	3.8
1	5.8
0	8.8

Tabella 18 – Sintesi dei risultati

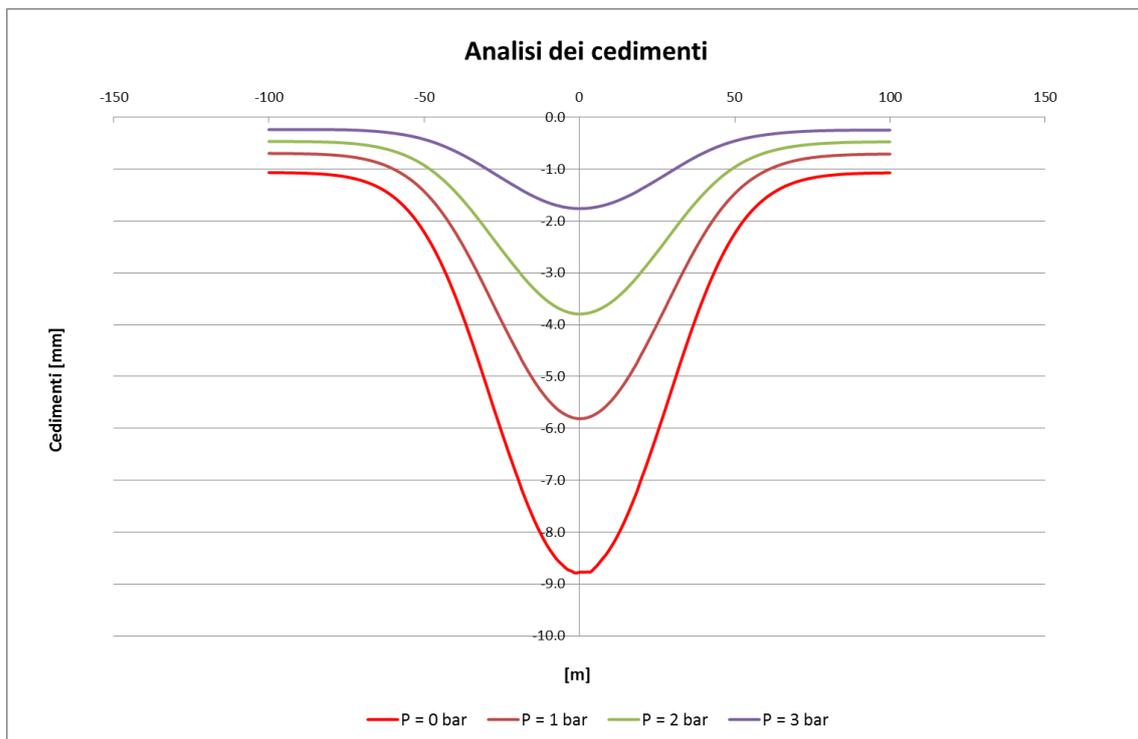


Figura 24 – Cedimenti a piano campagna



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

Si evince dai risultati che i cedimenti indotti dal possibile abbattimento del livello di falda al passaggio della TBM risultano inferiori al centimetro. Tramite un corretto avanzamento degli scavi ed una corretta valutazione della pressione da applicare al fronte di scavo i cedimenti causati dall'abbattimento di falda potrebbero quindi essere del tutto trascurabili.

6. CONCLUSIONI

Lo studio svolto è stato affrontato al fine di definire gli effetti sui fabbricati e sulle infrastrutture presenti lungo il tracciato in termini di cedimenti, di deformazioni e di possibili danni indotti dagli scavi.

Lo studio ha condotto alla valutazione del comportamento deformativo dei terreni, ossia l'entità dei cedimenti e delle distorsioni indotte dagli scavi applicando le formulazioni di letteratura che riconducono il bacino di subsidenza a funzioni gaussiane di entità dipendente dal volume perso in fase di scavo (Peck, 1969; O'Reilly e New 1982). A seguito della definizione del probabile bacino di subsidenza si è proceduto ad individuare l'effetto indotto sui fabbricati mediante il calcolo delle categorie di danno secondo quanto riportato in letteratura (Mair e Taylor e Burland, 1996).

Le analisi proposte sono state condotte ipotizzando tre valori di volume perso :

- $V_p = 0.5\%$ - scavo in condizioni di lavoro in linea con le attese progettuali;
- $V_p = 1.0\%$ - scavo in condizioni di lavoro intermedie tra le attese progettuali e lo scenario di rischio;
- $V_p = 1.5\%$ - scenario di rischio in cui si considera una non perfetta performance dell'avanzamento con TBM;

Essendo inoltre il contesto geomeccanico attraversato caratterizzato dalla presenza di terreno prevalentemente argilloso si è ipotizzata una variabilità di k in considerazione di una possibile variabilità nei valori di coesione secondo i valori:



- $k = 0.4$ - terreni caratterizzati da bassa coesione;
- $k = 0.6$ - terreni caratterizzati da elevata coesione;

così da coprire il range di variabilità presente nel contesto studiato. I cedimenti massimi risultano compresi, in funzione dei parametri impiegati, nel range 10-120 mm, con ampiezza dei bacini nel range 100 – 440 m circa. In corrispondenza dei fabbricati sono attesi cedimenti nel range 10-50 mm circa. I valori di cedimento massimo sono comunque da associare a volumi persi pari all'1.5% che simulano uno scenario di rischio legato ad un non perfetto funzionamento della TBM. Nel range operativo si prevedono cedimenti più ragionevolmente contenuti nel range 10-50 mm, in funzione della copertura presente.

I risultati ottenuti hanno mostrato che nessun edificio presente lungo la tratta ricade nelle classi di rischio tali da generare danni strutturali ai fabbricati o lesioni severe nelle opere di finitura; sono quindi attese solo lievi fessurazioni o danni di natura “cosmetica”. La sola interferenza che presenta danno superiore a 0 è risultata essere l'interferenza 02 la quale ricade in classe 2 per valori di volume perso pari a 1,5% e $k = 0,4$. Si è pertanto proceduto ad un'analisi più raffinata alle differenze finite per la suddetta interferenza tramite il programma di calcolo FLAC 7. I risultati ottenuti dall'analisi hanno mostrato un abbattimento della classe di danno al valore 1, mostrando inoltre affidabilità nei valori di k adottati nelle analisi empiriche.

In ogni caso modelli più approfonditi potranno essere messi a punto una volta disponibili rilievi più dettagliati dei fabbricati stessi.

Si è infine osservato l'effetto del possibile abbattimento della falda in corrispondenza delle lenti detritiche (unità 7a). Le analisi sono state condotte per diverse ipotesi di pressione nei pori residua:



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno – Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie

- $P = 3 \text{ bar}$;
- $P = 2 \text{ bar}$;
- $P = 1 \text{ bar}$;
- $P = 0 \text{ bar}$.

I risultati hanno mostrato che i cedimenti aumentano al diminuire della pressione, in linea con le attese. In particolare si osserva che il cedimento rimane sempre inferiore al centimetro e a seguito di una corretta valutazione della pressione da applicare al fronte di scavo tali valori di cedimento diventano del tutto trascurabili.

In ogni caso, durante la realizzazione della galleria si procederà alla gestione di un sistema di monitoraggio, sia topografico a piano campagna, sia mediante strumentazione profonda (inclinometri e piezometri), così da valutare in dettaglio, in corso d'opera, i risentimenti generati sul territorio dagli scavi e calibrare sia le modalità di avanzamento sia i modelli di previsione al momento sviluppati.