

S.p.A.

DIREZIONE REGIONALE PER LA SICILIA

PA 12/09

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO - NORD EUROPA

ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA - A19

S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE"

AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001

Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19

VARIANTE TECNICA N°4

ai sensi dell'art. 176, comma 5, secondo periodo lettera "a" e lettera "b", del D.Lgs. N. 163/2006 e Art. 11 del CSA-NG

CONTRAENTE GENERALE



DIRETTORE DEI LAVORI

Ing. CARLO DAMIANI

OPERE D'ARTE MAGGIORI

GALLERIE NATURALI

GALLERIA NATURALE CALTANISSETTA

Relazione Geotecnica giustificativa



Codice Unico Progetto (CUP) : F91B09000070001

3569-00

Codice Elaborato:

PA12\_09 - V 1 2 5 GN 2 0 4 GN 0 2 Z R H 0 0 0 C

Scala: -----

F																	
E																	
D																	
C	Aprile 2021	AGGIORNAMENTO CARTIGLIO												A. ANTONELLI	A.FINAMORE		
B	Marzo 2019	Emissione a seguito nota DL nr.003/CD/19 del 05.02.2019												A. ANTONELLI	P. PAGLINI		
A	Aprile 2018	EMISSIONE												A. ANTONELLI	P. PAGLINI		
REV.	DATA	DESCRIZIONE										REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	AUTORIZZATO		

Il Progettista:



Il Consulente Specialista:



Il Geologo:



Il Coordinatore per la sicurezza:



Il Direttore dei Lavori:



Responsabile del procedimento: Ing. LUIGI MUPO



## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	<b>2</b>
<b>2. SINTESI DELLA TECNICA COSTRUTTIVA E DEL MONITORAGGIO</b> .....	<b>4</b>
2.1 La costruzione della galleria con TBM in modalità EPB .....	4
2.2 Dati del monitoraggio in superficie.....	6
2.2.1 Cedimenti “target edificio” .....	8
2.2.2 Cedimenti “target terreno” .....	12
2.3 Dati monitoraggio del cavo .....	14
2.3.1 Prove di martinetto piatto .....	14
2.3.2 Prove inclinometriche sub-orizzontali all’interno del cavo sinistro.....	16
<b>3. ANALISI DELLE FENOMENOLOGIE DI CARATTERE GEOLOGICO-GEOTECNICO</b> .....	<b>21</b>
3.1 Stabilizzazione dei fenomeni di subsidenza superficiale .....	21
3.1.1 Cedimenti e probabile grado di danneggiamento per gli edifici lungo la GN Caltanissetta. ....	24
3.2 Esclusione di eventuali fenomeni di sovrascavo .....	28
3.2.1 Campagna integrativa indagini ed approfondimento della conoscenza dei parametri geotecnici delle argille .....	33
<b>4. IL COMPORTAMENTO ATTESO</b> .....	<b>36</b>
4.1 Modello di calcolo .....	36
4.1.1 Generalità .....	36
4.1.1 Elementi strutturali .....	39
4.1.2 Stratigrafia di riferimento e legge di comportamento del terreno .....	41
4.1.3 Carichi .....	42
4.2 Risultati delle analisi 3D.....	43
4.3 Osservazioni.....	54
<b>5. CONCLUSIONI</b> .....	<b>63</b>
<b>6. IL PROGETTO DEI BY PASS DELLA GN CALTANISSETTA DI PVT</b> .....	<b>64</b>
6.1 Contestualizzazione della distribuzione planimetrica dei by pass della GN Caltanissetta ..	69
<b>7. PROPOSTA DI VARIANTE</b> .....	<b>72</b>
7.1 Rimodulazione planimetrica degli attraversamenti .....	73
7.2 Struttura di Attacco dei Conci .....	76
7.3 Schema di scavo e consolidamento dei by pass pedonali .....	78
7.4 Schema di scavo e consolidamento dei by pass carrabili .....	83

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 1 di 88

## 1. INTRODUZIONE

Il presente documento è redatto nell'ambito dei lavori di adeguamento alla categoria B della S.S. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19.

Scopo del presente documento è quello di fornire una sintesi delle particolari condizioni geologiche e geotecniche riscontrate durante lo scavo della galleria naturale "Caltanissetta" e di analizzare la fattibilità tecnica dei by-pass di interconnessione tra le due canne della galleria stradale.

L'analisi che viene proposta è stata condotta alla luce dell'inconsueto ed anomalo comportamento deformativo del terreno attraversato dalle due canne della galleria, non sperimentato né conosciuto in precedenza in considerazione alla notevole profondità della galleria (circa 100-120 m) ed agli effetti negativi indotti (subsidenze).

Nello specifico, il comportamento in superficie, registrato grazie all'implementazione dell'esteso sistema di monitoraggio geotecnico definito in fase di PE ed integrato successivamente durante la realizzazione delle due canne, si può considerare del tutto inatteso a livello di previsione; lo stesso vale anche per le deformazioni del terreno in profondità davanti al fronte di scavo che sono caratterizzate da un andamento deformazioni-distanza dal fronte non contemplato da equazioni scientifiche o empiriche (esperienze/dati di altri progetti) riportate in letteratura.

In particolare si fa riferimento a due fenomeni, tra di loro collegati:

- cedimenti in superficie molto importanti e non compatibili né con l'elevata profondità dello scavo, né tantomeno con la tecnologia di scavo utilizzata: EPB scudata, in grado di fornire una contropressione al fronte e con lo scavo rivestito in tempi molto brevi con anelli in conci prefabbricati di rigidità elevata;
- deformazioni del fronte di tipo estrusivo già riscontrate a distanze maggiori di circa 5 diametri oltre al fronte di scavo, comportamento del tutto sconosciuto ed incontrollabile con le tecniche attualmente disponibili.

Ad oggi, con le due canne completate, il complesso terreno-rivestimento, come dimostrato dai dati di monitoraggio, ha raggiunto l'equilibrio tensionale e deformativo. Certamente la realizzazione dei by-pass, che peraltro vanno scavati in un terreno che ha subito la

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 2 di 88

sovrapposizione degli effetti dello scavo sia della prima che della seconda canna, andrà a perturbare questo equilibrio, comportando variazioni sullo stato tensionale al contorno delle due canne e quindi un aumento delle deformazioni in superficie ed una variazione nello stato tensionale del rivestimento definitivo di entrambe.

A questa situazione va inoltre considerata la variazione della permeabilità delle argille al contorno del cavo imputabile alla formazione di fasce plastiche e/o alla presenza di calcari in profondità; infatti durante la perforazione esplorativa eseguita secondo comunicazione del 15.11.2017, prot. n.2533 si sono misurate portate dell'ordine di 18l/s caratterizzate dalla presenza di fini in sospensione che denota la esportazione della parte fine dal materiale. Questa situazione, oltre a comportare importanti difficoltà allo scavo dei bypass, introduce ulteriori rischi di subsidenza in superficie che sono impossibili da valutare.

Per tutti questi motivi, in conformità con le norme stradali emanate a livello europeo, si propone una riduzione del numero dei by-pass ed un loro ri-posizionamento in zone meno critiche in termini di condizioni idro/geologiche riscontrate durante lo scavo.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 3 di 88

## 2. SINTESI DELLA TECNICA COSTRUTTIVA E DEL MONITORAGGIO

### 2.1 La costruzione della galleria con TBM in modalità EPB

La galleria Caltanissetta è costituita da due fornici i cui assi distano tra loro da un minimo di 35m (in prossimità degli imbocchi) fino ad un massimo di 85m. Il rivestimento definitivo della galleria naturale è costituito da un anello formato da 9 (8+1 concio chiave) conci prefabbricati in c.a. di spessore pari a 0.6m e lunghezza nominale pari a 2.0m.

La copertura massima in calotta galleria è di circa 130m (all'incirca alla progressiva 15+450.00m) mentre le coperture minori si riscontrano in corrispondenza dei due imbocchi. Lo sviluppo della canna SX in naturale si estende dalla progressiva 12+959.33 alla progressiva 16+836.86m per un totale di 3877.53m. Lo sviluppo in naturale della canna DX, invece è compresa dalla progressiva 12+964.33 alla progressiva 16+881.83m per un totale di 3917.50m. L'intera tratta in naturale è stata realizzata mediante scavo meccanizzato con l'utilizzo di una fresa meccanica di tipo EPBs di proprietà della NFM Technologies®.

Il contesto geologico attraversato ha visto la presenza di substrati argilloso-marnosi costituiti dalle argille tortoniane della Formazione Terravecchia (TRV) e le marne argillose altresì dette Trubi (TRB). La galleria si imposta quasi interamente nella formazione argillosa TRV, con eccezione della tratta tra le progressive 15+800 e 16+000, dove vi è la presenza di un attraversamento in un orizzonte calcareo evaporitico appartenente alla formazione dei Calcari di base, dislocato a vari livelli da strutture tettoniche distensive e compressive.

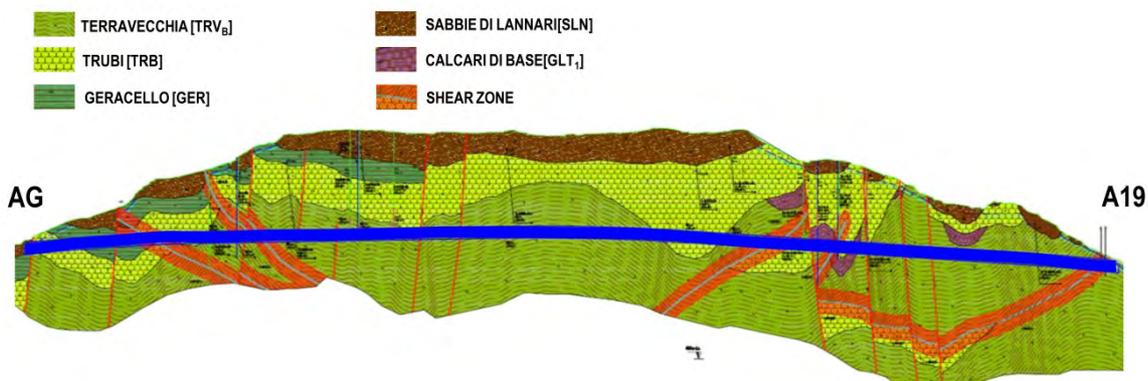


Figura 2.1: Sezione longitudinale geologica di attraversamento

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 4 di 88

Per quanto attiene invece il quadro idrogeologico generale, l'area interessata dall'opera, nonostante sia caratterizzata dalla prevalenza di sedimenti argillosi e argilloso-marnosi con permeabilità molto basse, localmente durante lo scavo in avanzamento, ha riscontrato una discreta presenza di acqua, soprattutto in corrispondenza della formazione dei Trubi.

Discorso del tutto difforme è costituito dalla tratta dei Calcari di Base della Formazione di Cattolica, la cui permeabilità elevata rispetto al contesto attraversato congiuntamente alla presenza di un forte battente d'acqua (8-9 bar) ha necessitato, per il proprio sottoattraversamento, della realizzazione di una batteria di pozzi di emungimento per l'abbattimento delle altezze piezometriche.

In generale, il quadro geologico previsto in fase di P.E., basato su un programma di indagini geofisiche e geognostiche molto esteso e completo, è stato confermato durante lo scavo.

Il rivestimento della galleria è costituito da un anello di spessore di 60cm, composto da 8 conci prefabbricati in calcestruzzo armato più il concio di chiave. Di seguito si riportano alcune delle principali caratteristiche geometriche del rivestimento:

- diametro esterno,  $D_{ex}$  : 14.65 m
- diametro interno,  $D_{in}$  : 13.45 m
- spessore conci, h: 60 cm
- lunghezza conci, b: 200 cm
- numero di conci: 8+1 (anello universale)
- classe calcestruzzo: C55/67

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 5 di 88

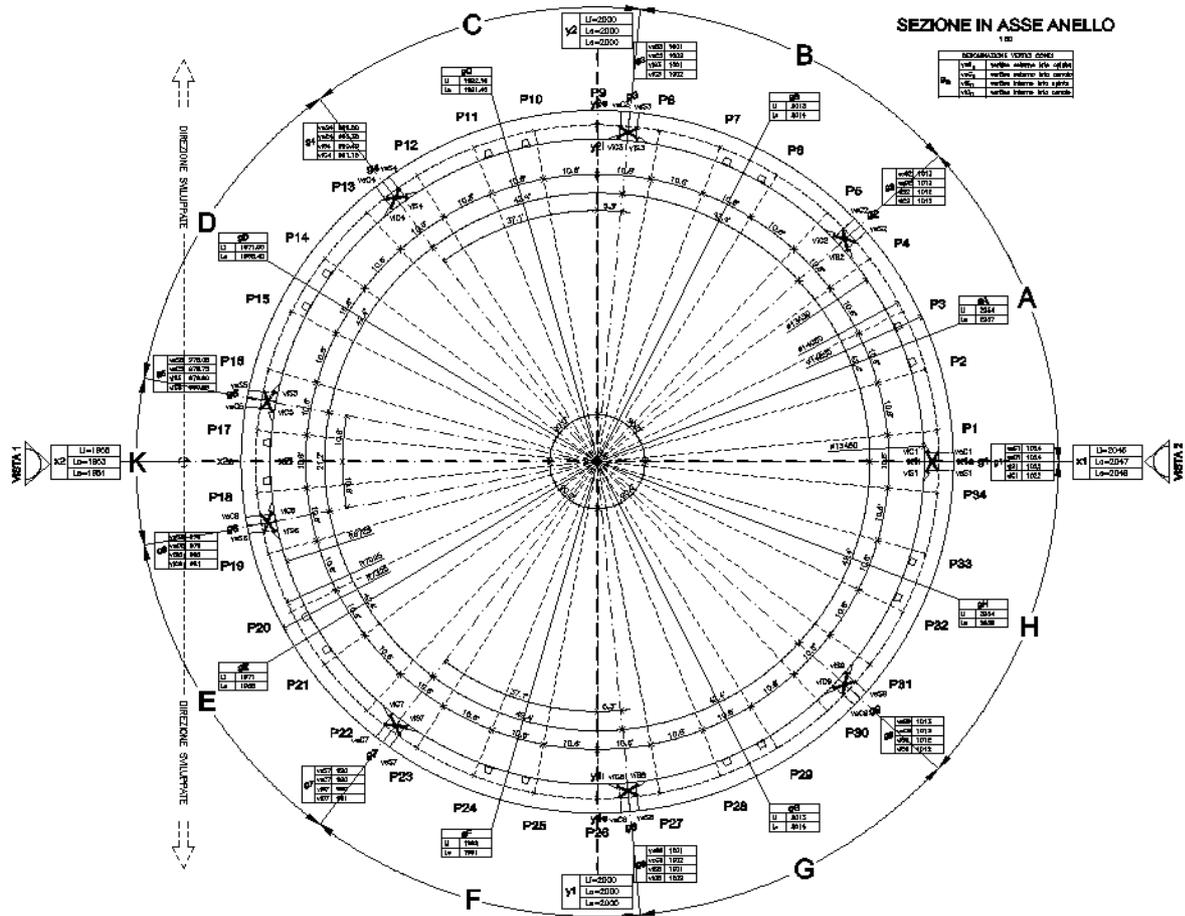


Figura 2.2: schema dell'anello di conchi

## 2.2 Dati del monitoraggio in superficie

Il tracciato della galleria naturale sottoattraversa il centro urbano della città di Caltanissetta per circa il 70-80% del suo intero sviluppo longitudinale.

<p>Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A                  Nome file v_3569-00 relazione geotecnica                  giustificativa rev.b</p>	<p>Titolo: Galleria Caltanissetta  <b>Relazione Geotecnica                  giustificativa</b></p>	<p>Data: Febbraio 2019                  Pagina 6 di 88</p>
--	--	--

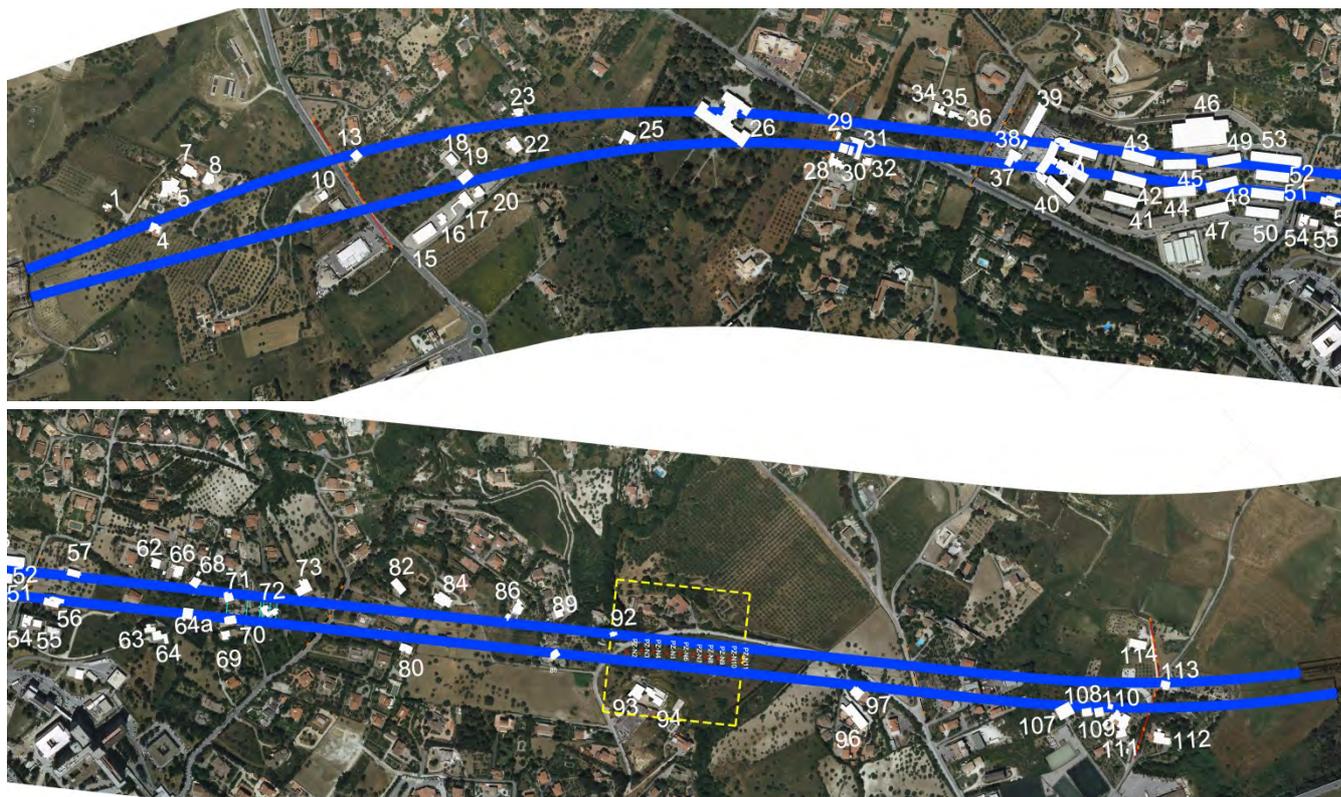


Figura 2.3: stralcio planimetrico con ubicazione degli edifici monitorati (evidenziati in bianco)

Considerata l'elevata connotazione antropica dell'area da sottoattraversare, sin dalle iniziali fasi di scavo si è provveduto all'implementazione di un sistema di monitoraggio di superficie, con target di misura fissati sia sugli edifici che direttamente sul terreno (*stendimenti di subsidenza*). Lo scopo di tale piano di monitoraggio è stato quello di fornire informazioni utili sulle evoluzioni deformative indotte, con il fine ultimo di permettere una progressiva acquisizione di una sempre maggiore conoscenza del territorio e della risposta deformativa delle diverse litologie allo scavo.

Il piano di monitoraggio previsto in progetto per le preesistenze, predisponeva il controllo di tutti gli edifici le cui impronte si trovano entro una distanza di circa 100m dall'asse tra le due canne. Sebbene tale distanza costituisse già una misura conservativa per la valutazione dei fenomeni indotti, al fine di procedere con lo scavo in avanzamento con il maggior numero di informazioni possibile sulla superficie, in via prudenziale, si è provveduto in corso d'opera a estendere ulteriormente il raggio di monitoraggio a circa 150-200m.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 7 di 88

Anche il posizionamento previsto per gli stendimenti di subsidenza ha subito variazioni rispetto al piano di monitoraggio di progetto. Anziché concentrare il monitoraggio sulle zone di imbocco, così come previsto dal PVT, gli stendimenti sono stati infatti distribuiti con una maggiore omogeneità lungo il tracciato della galleria naturale.

Con tale distribuzione, infatti, si è riusciti ad analizzare il dato topografico con una maggiore ridondanza e ciò ha permesso di comprendere con un migliore livello di dettaglio le evoluzioni deformative in atto.



Figura 2.4: stralcio planimetrico con ubicazione degli stendimenti di subsidenza (rosso)

È importante sottolineare che gli aspetti produttivi, siano essi legati alle fasi di scavo in avanzamento o alla gestione dei tempi di produzione, sono stati scanditi e profondamente influenzati dalle manifestazioni deformative di superficie. Procedere con lo scavo in avanzamento, con l'obiettivo di regimare il più possibile le subsidenze, ha di fatto sicuramente influenzato la scelta dei parametri macchina e di scavo da adottare, con inevitabili influenze sul tempo finale di realizzazione.

### 2.2.1 Cedimenti “target edificio”

Il monitoraggio delle presistenze lungo il tracciato della galleria Caltanissetta è avvenuto tramite l'applicazione di target topografici (mire/miniprismi), per consentire l'implementazione di livellazioni ad altissima precisione mediante stazione totale con

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 8 di 88

sensibilità di lettura dell'ordine del millimetro. Numero e disposizione dei target installati su ciascun edificio, sono stati funzione della geometria delle varie impronte planimetriche e del loro sviluppo in correlazione ai capidaldi di livellazione sfruttabili. Complessivamente il piano di monitoraggio ha incluso in totale n°90 edifici.

Al fine di ottenere un livello di informazione pertinente e congruente con le zone di volta in volta sottoattraversate, le frequenze di lettura adoperate per il monitoraggio hanno seguito un andamento progressivo allineato con l'avanzamento del fronte di scavo. Nello specifico la frequenza è stata intensificata nelle fasi di avvicinamento-attraversamento-allontanamento della fresa (-70÷-50m – 0m - 100÷120m), per poi essere progressivamente ridotte quanto l'influenza del fronte risultava essere poco significativa ai fini dei fenomeni di disturbo superficiale.

Il dato topografico è stato analizzato e correlato ai diversi fattori di avanzamento in modo da fornire il miglior supporto possibile per la gestione dei parametri macchina e di avanzamento, con il fine ultimo di minimizzare o perlomeno garantire la gestione dell'evoluzione dei fenomeni deformativi di superficie.

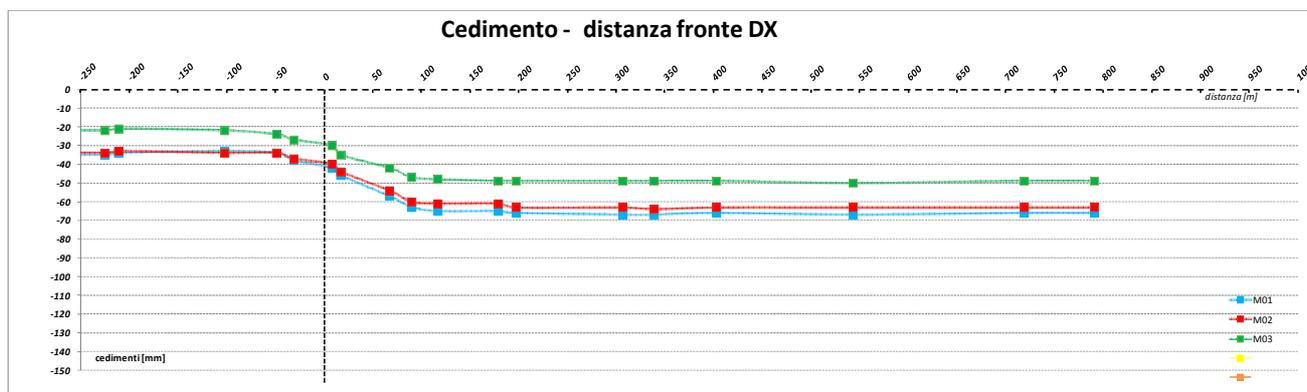


Figura 2.5: esempio di gestione e analisi grafica del dato topografico di un edificio

Il fenomeno di disturbo superficiale (Figura 2.5 e file "schede di monitoraggio edifici"), ha riscontrato le 2 fenomenologie caratteristiche della subsidenza indotta dalla scavo di una galleria:

- richiamo deformativo con l'avvicinamento del fronte, **pre\_subsidenza** (20% canna SX e 23% canna DX);

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 9 di 88

- richiamo deformativo dovuto all'allontamento del fronte di scavo, **post\_subsidenza** (80% canna SX e 77% canna DX);

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva per la canna SX e la canna DX, con il cedimento massimo al termine di ciascun scavo e la distribuzione della percentuale di pre e post subsidenza, riscontrati per ciascun edificio.

Edif.	Cop. [m]	Inter. [m]	Form.	CANNA SX				CANNA DX			
				Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post-cedimento [mm]	%pre / post	Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post-cedimento [mm]	%pre / post
1	27	54	GER/TRB	--	--	--		6	--	--	
4	30	60	GER	--	--	--		16	--	--	
5	30	65	GER	25	--	--		23	--	--	
7	34	69	GER	15	--	--		23	--	--	
8	37	70	GER	--	--	--		25	--	--	
10	70	82	TRB	5	0	5	0%	43	9	29	24%
13	73	83	TRB/TRVb	7	0	7	0%	29	7	15	32%
15	79	83	TRB/TRVb	--	--	--		15	4	11	27%
16	80	81	TRVb	--	--	--		14	4	10	29%
17	82	78	TRVb	3	0	3	0%	33	12	18	40%
18	81	80	TRVb	13	--	--		69	16	39	29%
19	83	78	TRVb	14	--	--		79	24	41	37%
20b	86	75	TRVb	--	--	--		59	12	35	26%
21	89	72	TRVb	8	--	--		31	8	15	35%
22	90	70	TRVb	50	4	46	8%	151	35	66	35%
23	93	69	TRVb	35	10	25	29%	76	7	34	17%
26	124	44	TRVb	45	1	44	2%	96	4	47	8%
28	124	36	TRVb	16	1	15	6%	48	13	19	41%
29	124	35	TRVb	32	8	24	25%	49	4	13	24%
30	124	35	TRVb	--	--	--		55	7	23	23%
31	124	35	TRVb	27	4	23	15%	55	7	21	25%
32	124	35	TRVb	16	5	11	31%	40	2	22	8%
34	124	35	TRVb	--	--	--		32	2	9	18%
35	124	35	TRVb	--	--	--		40	1	14	7%
37	124	35	TRVb	15	2	13	13%	37	1	21	5%
38	124	35	TRVb	17	3	18	18%	43	1	25	4%
39	124	35	TRVb	22	3	19	14%	47	1	24	4%
40	124	35	TRVb	14	4	18	29%	62	6	42	13%

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta <b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>		Pagina 10 di 88

VARIANTE TECNICA N.4

Edif.	Cop. [m]	Inter. [m]	Form.	CANNA SX				CANNA DX			
				Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post- cedimento [mm]	%pre / post	Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post- cedimento [mm]	%pre / post
41	124	35	TRVb	--	--	--		14	--	--	
42	124	35	TRVb	--	--	--		15	--	--	
43	124	35	TRVb	--	--	--		38	--	--	
44	124	35	TRVb	--	--	--		21	--	--	
45	124	35	TRVb	--	--	--		35	--	--	
46	124	35	TRVb	--	--	--		47	--	--	
47	124	35	TRVb	--	--	--		21	--	--	
48	124	35	TRVb	--	--	--		30	--	--	
49	124	35	TRVb	--	--	--		32	--	--	
50	124	35	TRVb	--	--	--		26	9	17	35%
51	124	35	TRVb	--	--	--		28	11	17	39%
52	124	35	TRVb	--	--	--		27	8	15	35%
53	124	35	TRVb	--	--	--		24	7	10	41%
54	124	35	TRVb	2	--	--		9	2	5	29%
55	124	35	TRVb	1	--	--		9	1	7	13%
56	120	35	TRVb	12	--	--		28	1	15	6%
57	120	35	TRVb	17	2	15	12%	26	1	8	11%
59	121	35	TRVb	--	--	--		23	3	9	25%
62	121	35	TRVb	--	--	--		5	1	5	17%
63-64	120	35	TRVb	4	4	1		9	1	3	25%
65	120	35	TRVb	--	--	--		21	5	14	26%
66	120	35	TRVb	7	1	8	14%	15	0	8	0%
68	120	35	TRVb	--	--	--		10	1	9	10%
69	124	35	TRVb	17	4	13	24%	56	4	35	10%
70	129	35	TRVb/TRB	20	4	16	20%	60	5	35	13%
71	129	35	TRVb/TRB	22	5	17	23%	58	4	32	11%
72	129	35	TRB	--	--	--		37	10	27	27%
73	127	35	TRB	15	1	18	7%	26	1	10	9%
75	130	35	TRB	--	--	--		17	1	17	6%
79	130	35	TRVb/TRB	--	--	--		28	6	17	26%
80	130	35	TRVb/TRB	14	3	17	21%	40	4	22	15%
82	130	35	TRVb/TRB	18	6	20	33%	44	8	18	31%
84	130	35	TRVb	14	5	9	36%	23	1	8	11%
86	122	35	TRVb	38	16	22	42%	80	8	34	19%
87	115	35	TRVb	--	--	--		46	7	13	35%
88	115	35	TRVb	20	2	18	10%	40	5	15	25%
89	114	35	TRVb	21	12	9	57%	30	7	2	78%
91	100	35	TRVb	--	--	--		13	6	5	55%
92	100	35	TRVb	18	9	9	50%	30	2	10	17%
93	98	35	TRVb/GTL1	12	4	11	33%	30	2	16	11%
94	101	35	TRVb/GTL1	13	6	7	46%	30	1	16	6%
95	105	35	TRVb/GTL1	10	4	6	40%	26	1	15	6%
96	82	35	TRVb	14	1	13	7%	61	9	38	19%
97	82	35	TRVb	35	0	35	0%	95	7	53	12%
100	62	35	TRVb	--	--	--		49	15	30	33%
101	62	35	TRVb	--	--	--		53	5	9	36%
102	62	35	TRVb	--	--	--		56	15	17	47%
102B	62	35	TRVb	--	--	--		15	5	7	42%
102C	62	35	TRVb	--	--	--		19	1	9	10%
103	62	35	TRVb	--	--	--		57	27	24	53%

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 11 di 88

Edif.	Cop. [m]	Inter. [m]	Form.	CANNA SX				CANNA DX					
				Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post- cedimento [mm]	% pre / post	Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post- cedimento [mm]	% pre / post		
104	62	35	TRVb	--	--	--		70	23	30	43%		
104B	62	35	TRVb	--	--	--		64	12	30	29%		
106	62	35	TRVb	--	--	--		72	27	20	57%		
107	68	35	TRVb	57	6	51	11%	133	12	64	16%		
108	68	35	TRVb	60	7	53	12%	129	14	55	20%		
109	68	35	TRVb	59	7	52	12%	166	12	95	11%		
110	68	35	TRVb	70	10	60	14%	172	3	99	3%		
111	68	35	TRVb	60	14	46	23%	182	9	113	7%		
112	58	35	TRVb	50	10	40	20%	159	28	81	26%		
113	58	35	TRVb	41	10	31	24%	54	2	11	15%		
114	58	35	TRVb	--	--	--		14	--	--			
				<b>media pre-SUB</b>				<b>20%</b>	<b>media pre-SUB</b>				<b>23%</b>
				<b>media post-SUB</b>				<b>80%</b>	<b>media post-SUB</b>				<b>77%</b>

## 2.2.2 Cedimenti "target terreno"

Come descritto precedentemente, per quanto attiene gli stendimenti di subsidenza, è stata apportata una ridistribuzione della loro ubicazione più omogenea rispetto a quella prevista inizialmente in PVT, che concentrava il loro posizionamento principalmente nelle corrispondenze dei due imbocchi della galleria naturale.

Gli stendimenti di misurazione topografica, sono stati installati alle seguenti progressive:

- **Sez. S\_05 pk 13+500 ca**
- **Sez. S\_A pk 14+200 ca**
- **Sez. S\_B pk 14+428 ca**
- **Sez. S\_C pk 14+909 ca**
- **Sez. S\_D pk 15+354 ca**
- **Sez. S\_E pk 16+253 ca**
- **Sez. S\_07 pk 16+660 ca**

In modo analogo con quanto fatto con il monitoraggio degli edifici, i punti terreno sono stati rilevati con una frequenza congruente con le fasi di avanzamento/allontanamento del fronte. Nello specifico si è seguito lo stesso criterio di infittimento e progressiva riduzione adottata per le letture sulle preesistenze. Successive letture integrative sono state talora effettuate in quei casi dove il fenomeno deformativo suggeriva una non completa dissipazione del disturbo indotto, nonostante il fronte si trovasse ormai a grande distanza.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 12 di 88

Il dato topografico, anche in questo caso, è stato analizzato e correlato ai diversi fattori di avanzamento, quali tempo e distanza del fronte, in modo da fornire il miglior supporto possibile per la gestione dei parametri macchina e di avanzamento, con il fine ultimo di minimizzare o perlomeno garantire la gestione dell'evoluzione dei fenomeni deformativi di superficie

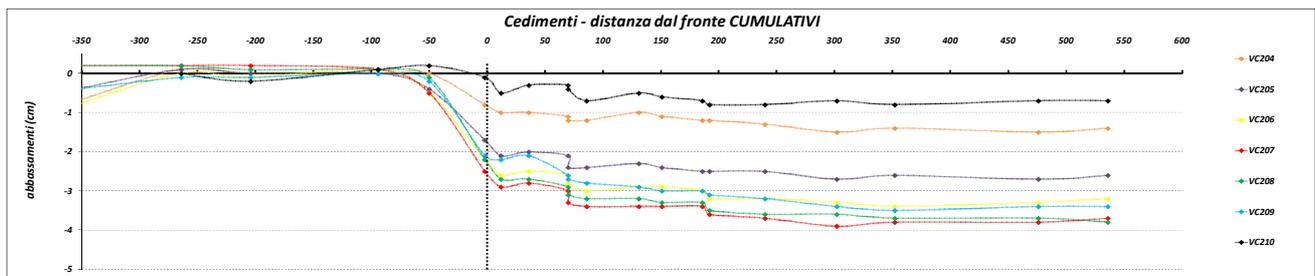


Figura 2.6: andamento degli spostamenti verticali sullo stendimento S05 installato alla pk 13+500 ca (canna SX)

Le proporzioni tra il fenomeno di pre e post-subsidenza, relativamente alle fasi di avvicinamento e allontanamento del fronte, si suddividono per la canna SX con percentuali del 14% per il cedimento totale in avvicinamento ed il rimanente 86% viene dissipato nella fase di allontanamento della fresa. In canna DX, si registra invece una tendenza differente, con circa il 40% del cedimento che si sviluppa nelle fasi di avvicinamento, mentre il 60% della deformazione totale avviene con il fronte di scavo in allontanamento.

E' da sottolineare che differentemente da quanto registrato per gli edifici, i punti terreno, presentano una rigidità minore nei confronti di eventuali refluenti superficiali, e tale minore rigidità potrebbe essere la causa di questa importante differenza in termini di distribuzione dei fenomeni deformativi di superficie.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 13 di 88

Edif.	Cop. [m]	Inter. [m]	Form.	CANNA SX				CANNA DX			
				Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post- cedimento [mm]	% pre / post	Cedimento max [mm]	Pre cedimento [mm]	Post- cedimento [mm]	% pre / post
sez. S_05	66	83	TRB/TRVb	9	2	7	22%	42	21	12	64%
sez. S_A	120	35	TRVb	--	--	--		33	14	19	42%
sez. S_B	120	35	TRVb	--	--	--		25	10	15	40%
sez. S_C	120	35	TRVb	--	--	--		17	7	10	41%
sez. S_D	120	35	TRVb	--	--	--		10	3	7	30%
sez. S_E	64	35	TRVb	--	--	--		54	16	38	30%
sez. S_07	42	35	TRVb	40	2	38	5%	174	56	78	42%
				<b>media pre-SUB</b>				<b>media pre-SUB</b>			
				14%				41%			
				<b>media post-SUB</b>				<b>media post-SUB</b>			
				86%				59%			

## 2.3 Dati monitoraggio del cavo

Il monitoraggio del cavo previsto in progetto includeva la installazione di barrette estensimetriche, celle di pressione, celle di carico, misure di ovalizzazione.

Tutti questi dati sono stati oggetto di trattazione specifica durante lo scavo.

Inoltre in fase di esecuzione dei lavori si è optato per misure dirette della pressione e dello stato tensionale dei conci tramite martinetti piatti.

Di seguito si riporta una sintesi dei risultati di questi ultimi, essendo misure dirette e quindi caratterizzate da maggiore affidabilità.

### 2.3.1 Prove di martinetto piatto

Alla luce della dispersione dei dati rilevati all'interno del cavo, al fine di ottenere in maniera univoca la fotografia sul quadro tensionale del rivestimento definitivo della galleria ed al tempo stesso scongiurare qualsiasi eventuale dubbio, si è optato per la verifica e controllo delle tensioni sul rivestimento mediante l'implementazione di misure dirette di tipo invasivo, nella fattispecie mediante l'uso del martinetto piatto.

Nello specifico, per quanto riguarda le prove condotte sul rivestimento della galleria Caltanissetta, si è preferito praticare il taglio in corrispondenza del giunto longitudinale tra due conci contigui dello stesso anello, anche per non tagliare i ferri dei conci

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 14 di 88

Le prove invasive, sono state distribuite in maniera omogenea lungo tutto il rivestimento della canna SX. Si è preferito concentrarsi su tale canna poiché essa costituisce il fornice realizzato per primo e presenta sia una maggiore dispersione delle sollecitazioni.

Tendenzialmente, l'esperienza di scavi analoghi in presenza di galleria a doppia canna, come il caso della GN Caltanissetta, ha riportato che il rivestimento definitivo maggiormente sollecitato risulta essere quello relativo alla prima canna in ordine di realizzazione, poiché soggetto al disturbo tensionale del terreno indotto anche dallo scavo della seconda canna.

Nell'ottica di ottenere una certa ridondanza delle misure, per evitare di acquisire esclusivamente un dato tensionale per ciascun anello, si è proceduto come consuetudine vuole, realizzando le prove sia sul paramento sinistro che in quello destro dell'anello investigato.

L'ubicazione di tre delle cinque prove di martinetto eseguite, è stata volutamente posizionata in corrispondenza degli anelli strumentati, in modo da verificare ed eventualmente confermare i valori tensionali restituiti dagli stessi.

Di seguito una tabella riassuntiva dei risultati ottenuti:

<b>CANNA SX</b>					
<b>Anello</b>	<b>PRESSIONE DI RIPRISTINO GIUNTO</b>		<b>MEDIA [Mpa]</b>	<b>Tensione concio* [Mpa]</b>	<b>NOTE</b>
	<b>prova DX</b>	<b>prova SX</b>			
ANELLO n° 242	70 bar	120 bar	9,5	6,08	Anello n° 232 con ? 26 MPa di compressione media
ANELLO n° 638	200 bar	200 bar	20	12,8	Anello n° 636 con ? 55 MPa di compressione media
ANELLO n° 746	190 bar	240 bar	21,5	13,76	
ANELLO n° 1170	150 bar	150 bar	15	9,6	Anello n° 1170 con ? 34 MPa di compressione media
ANELLO n° 1355	130 bar	150 bar	14	8,96	

\*A causa delle concentrazioni di forze all'interfaccia del giunto, per conoscere le tensioni agenti sul concio, si deve moltiplicare la pressione di ripristino ottenuta dalla prova di martinetto eseguita sul giunto per il coefficiente di omogenizzazione  $\mu$  pari al rapporto tra la superficie del giunto e la superficie del concio ( $\mu \approx 0,64$ ).

Come si evince dalla tabella, sui conci degli anelli indagati, si ottengono valori compresi tra ca 6MPa e ca 14MPa, che risultano globalmente in contrasto con i picchi registrati dalle barrette estensimetriche ed al tempo stesso, sono perfettamente in linea con la pressione media di progetto ipotizzata sui conci che è pari a 24.4MPa.

Alla luce dei risultati ottenuti con le prove di martinetto piatto, la presenza di dati dispersi ed anomali risulta di per sé associabile alla fisiologica connotazione del dato tensionale per opere di questo genere.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 15 di 88

Le tensioni ottenute dalle prove di martinetto piatto, restituiscono valori mediamente inferiori rispetto alle ipotesi progettuali e sostanzialmente rassicurano dalle incongruenze e dalla dispersione di valori riscontrati sugli anelli strumentati.

### **2.3.2 Prove inclinometriche sub-orizzontali all'interno del cavo sinistro**

Il monitoraggio dei fenomeni deformativi superficiali, implementato per le fasi di avanzamento della TBM, come mostrato precedentemente ha riscontrato come costante, un risentimento deformativo con l'avvicinamento della fronte in corrispondenza degli edifici. Tale evidenza, è senza dubbio dovuta ad un "effetto di richiamo" indotto dallo scavo della galleria e trova forti dipendenze con l'entità delle contropressioni utilizzate in fase di avanzamento. In termini di distanza, l'effetto di presubsidenza indotto si riscontra con il fronte a circa 50m rispetto alla progressiva di ubicazione del target di superficie.

Il manifestarsi del fenomeno di presubsidenza a distanze così elevate, potrebbe essere quindi associato ad una fenomenologia estrusiva del cavo, che si riscontra in modo più o meno costante per tutto lo sviluppo della galleria naturale.

Al fine di riconoscere, identificare e quantificare l'eventuale fenomeno estrusivo del cavo, (che giustificerebbe tali influenze deformative superficiali anche a distanze così considerevoli) si è proceduto all'installazione di una strumentazione inclinometrica sub-orizzontale in prossimità degli anelli 427 e 649 della canna SX.

La lunghezza della perforazione eseguita è pari a circa 60m a partire dal paramento destro della canna sinistra, in un tratto della galleria naturale dove la distanza delle due canne è pari a circa 35m.

Il foro è stato eseguito approssimativamente alla quota del piano dei centri della galleria, ed è stato incamiciato con un rivestimento in alluminio per facilitare le misure inclinometriche.

L'insolita funzione dell'inclinometro al fine di definire le componenti estrusive sul fronte, sfrutta la possibilità della strumentazione inclinometrica, di definire le variazioni di spostamento su un piano (in questo caso quello orizzontale), dovute a movimenti o deformazioni del terreno. Questo ha permesso di quantificare l'effetto di richiamo sulla

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 16 di 88

testa di scavo durante l'avanzamento della TBM e l'avvicinamento del fronte di scavo allo strumento di misura.

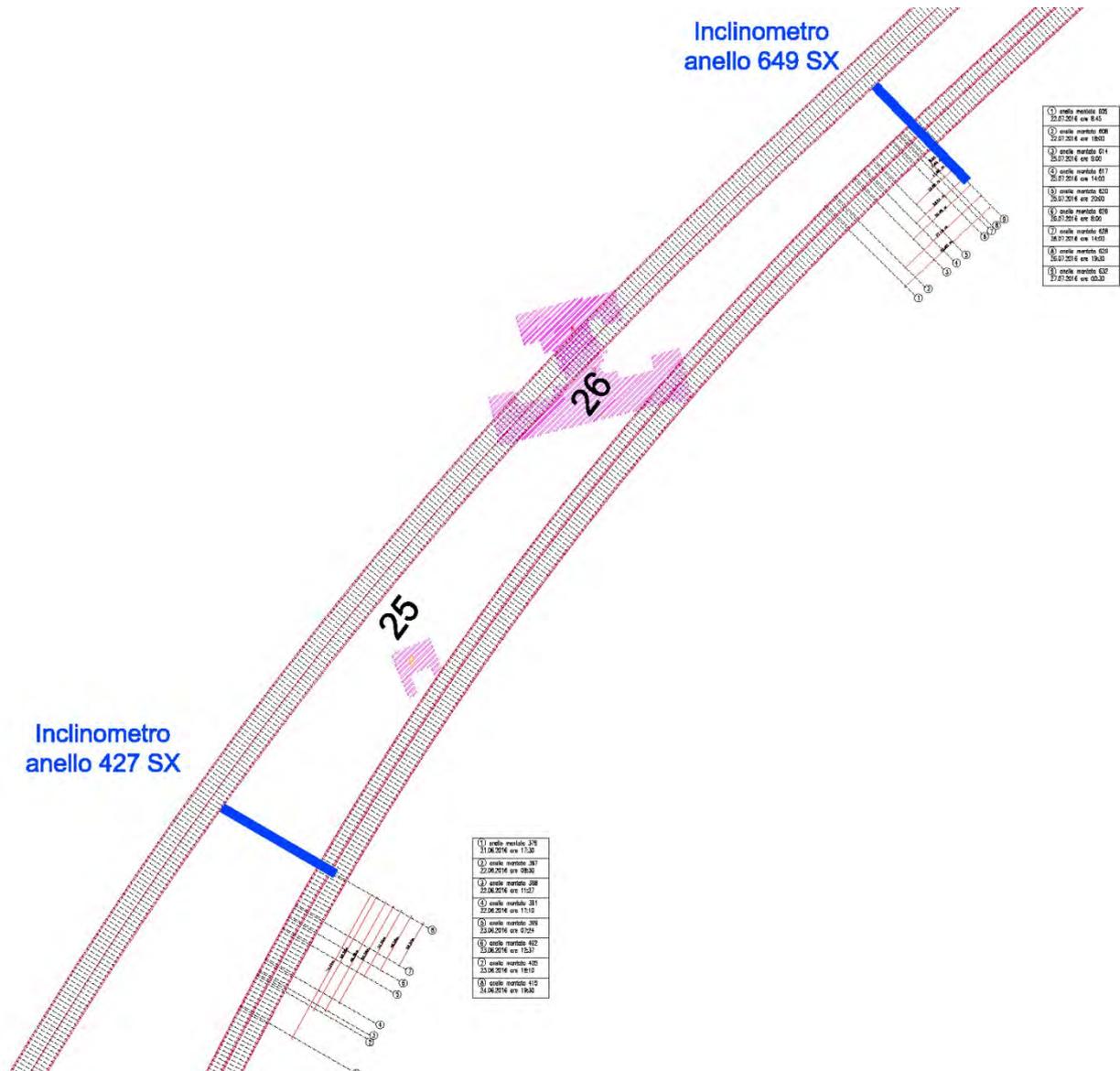


Figura 2.7: stralcio planimetrico con ubicazione inclinometri orizzontali.

La lettura della strumentazione è avvenuta procedendo in armonia con l'avanzamento della TBM e cioè inserendo le sonde inclinometriche all'interno del foro ad intervalli di tempo stabiliti in funzione all'avanzamento della fresa: è stato così possibile definire in

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 17 di 88

rapporto alla distanza del fronte, la deformazione del terreno e quindi l'estrusione associabile all'avanzamento.

Di seguito si riporta l'elaborazione grafica dei dati inclinometrici in funzione della distanza dal paramento destro della canna SX

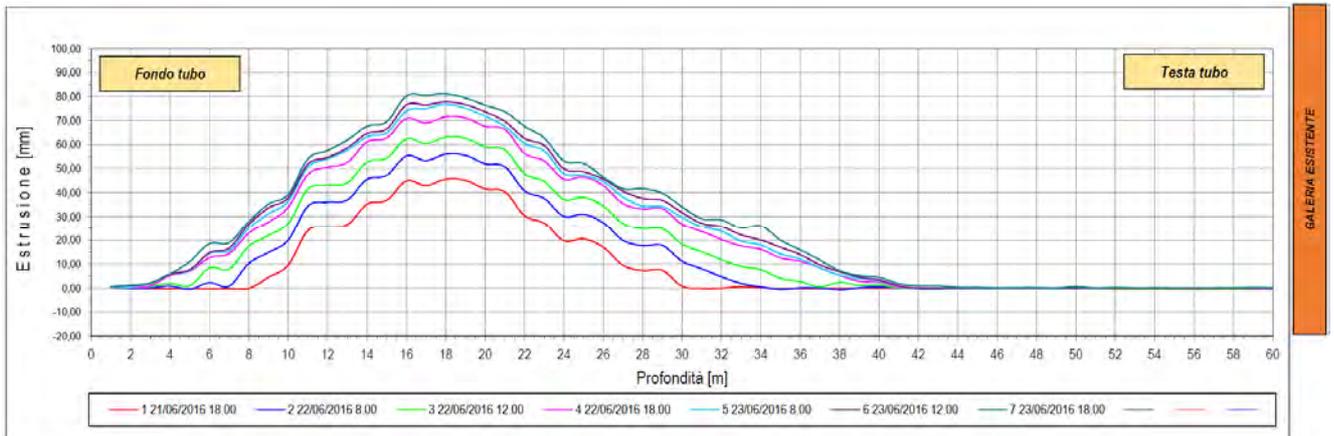


Figura 2.8: risultati deformazione inclinometrica anello 427

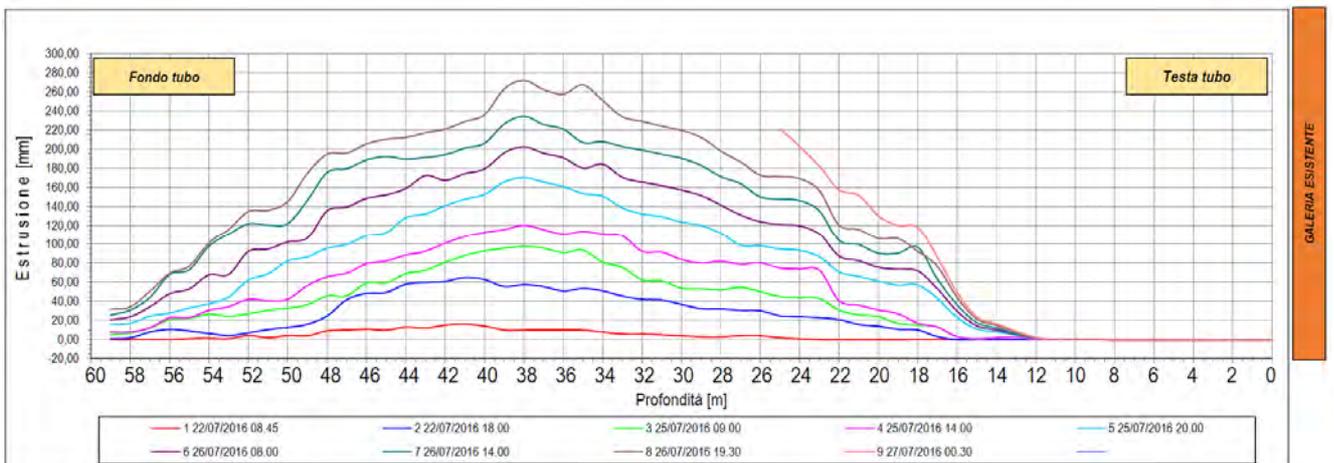


Figura 2.9: risultati deformazione inclinometrica anello 649

Di seguito si riportano le corrispettive distanze del fronte durante le varie misure effettuate di deformazione inclinometrica:

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 18 di 88

VARIANTE TECNICA N.4

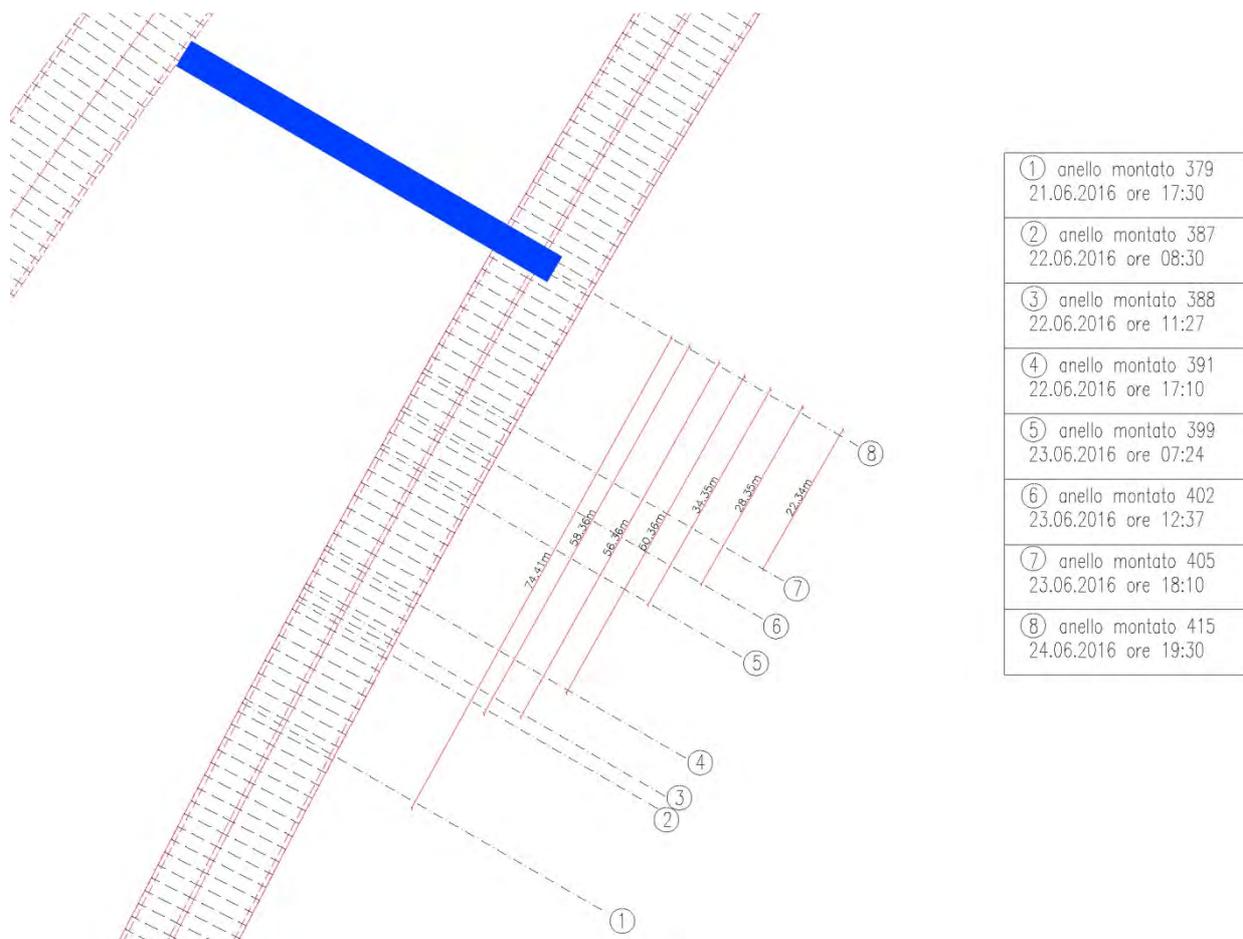


Figura 2.10: distanze del fronte in funzione delle varie misure effettuate – inclinometro 427.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 19 di 88

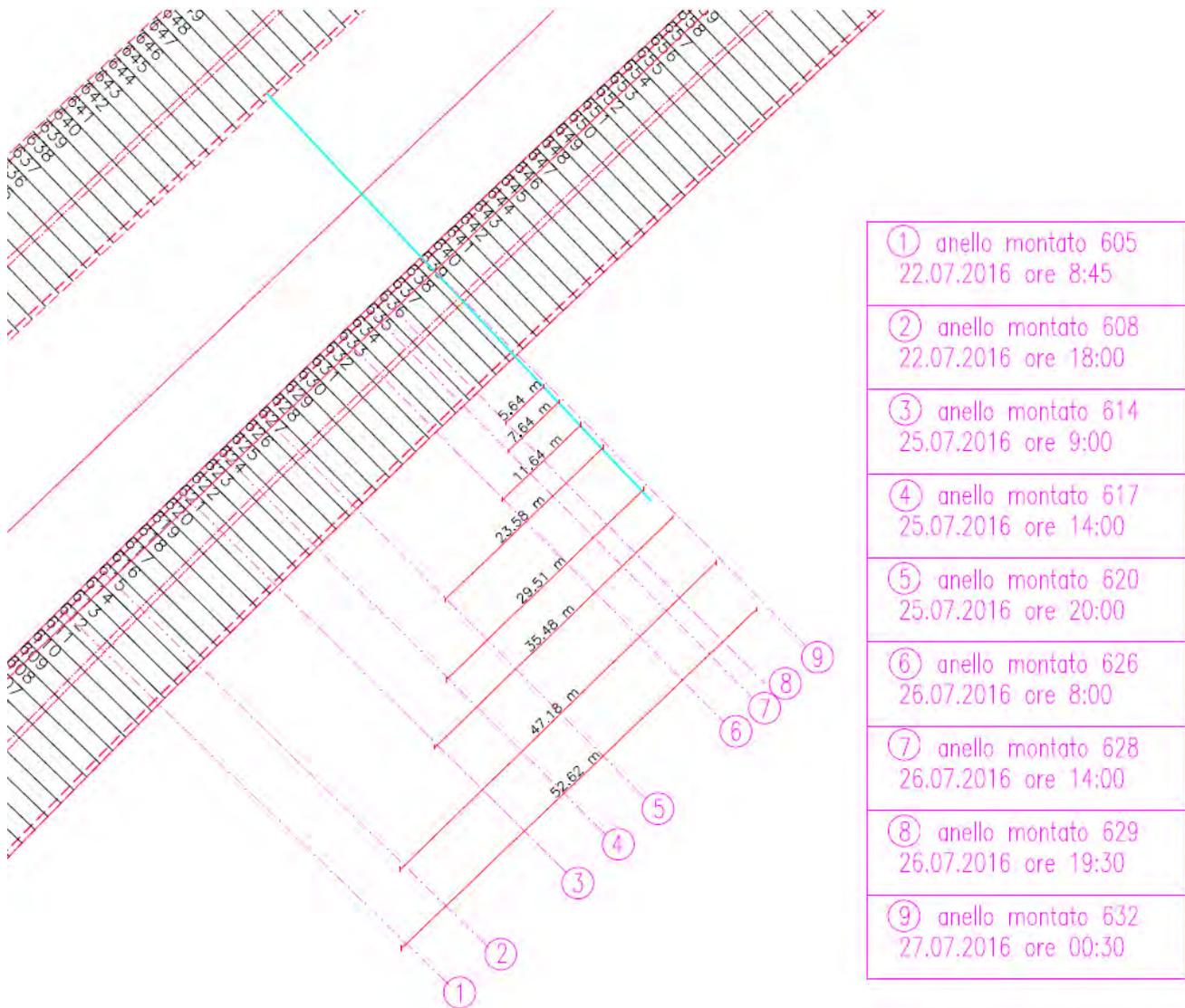


Figura 2.11: distanze del fronte in funzione delle varie misure effettuate – inclinometro 649.

Dai risultati riportati dalle misure inclinometriche in orizzontale in galleria, risultano confermate le evidenze del monitoraggio superficiale. Con una contropressione in chiave pari a 2.4bar, l'inclinometro 427 risente degli effetti di richiamo del fronte ad una distanza di circa 74.5m, con un incremento estrusivo di circa 4.0cm. Con l'innalzamento delle contropressioni al fronte, avvenuto in prossimità dell'anello 649, il risentimento estrusivo si avverte, invece, ad una distanza di circa 50m dal fronte, con spostamenti orizzontali pari a circa 2.0cm.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 20 di 88

### 3. ANALISI DELLE FENOMENOLOGIE DI CARATTERE GEOLOGICO-GEOTECNICO

I dati di monitoraggio mostrati nel capitolo precedente, costituiscono uno dei punti dai quale iniziare una valutazione approfondita sul fenomeno deformativo globale e sulle dinamiche di superficie che si sono verificate successivamente allo scavo delle due canne della galleria naturale Caltanissetta.

In tal senso, al fine di comprendere il disturbo deformativo indotto e la complessità dei delicati equilibri raggiunti al termine dello scavo di ciascuna canna, risulta fondamentale procedere con un'analisi dell'informazione deformativa rivolta alla valutazione di eventuali dipendenze di ordine temporale, indirizzata alla definizione dei tempi di stabilizzazione degli spostamenti di superficie riscontrati dopo il passaggio dei diversi fronti di scavo e che abbia come obiettivo anche la valutazione del potenziale livello di danno indotto sulle preesistenze, sulla base di considerazioni empiriche con riferimento alle evidenze di monitoraggio.

#### 3.1 Stabilizzazione dei fenomeni di subsidenza superficiale

L'evoluzione dei cedimenti superficiali, presenta la classica dipendenza dalla distanza del fronte di scavo: la storia deformativa di ciascun target evidenzia le consuete fasi di pre/post subsidenza, già ampiamente descritte nel capitolo precedente.

Ulteriori opportune valutazioni, sono invece state sviluppate tenendo in considerazione la presenza di eventuali correlazioni temporali del cedimento. Tale correlazione, risulta particolarmente utile nella valutazione dei tempi di stabilizzazione della deformazione di superficie.

Per stabilizzazione, si intende il raggiungimento della fase di equilibrio nelle letture di livellazione topografica, successivamente ad una prima fase contraddistinta dalla presenza di incrementi del cedimento, solitamente associati al sottoattraversamento del fronte di scavo nei pressi del punto di superficie monitorato.

Prendendo come punto di zero, l'istante in cui il fronte ha raggiunto la progressiva di ubicazione del caposaldo di monitoraggio di riferimento, si è infatti tenuto in considerazione l'evoluzione deformativa di ogni singolo target, in funzione del tempo espresso in giorni.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 21 di 88

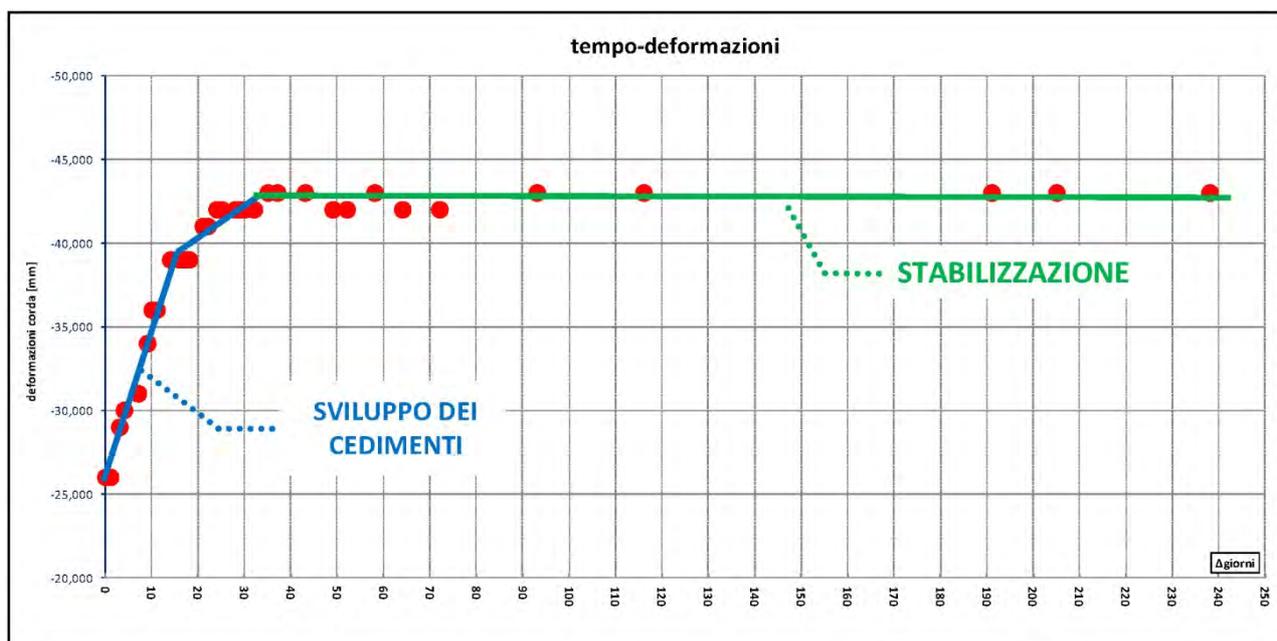


Figura 3.1: Evoluzione del cedimento nel tempo, esempio di fase di sviluppo e stabilizzazione

Per stabilizzazione si intende quindi, il raggiungimento di una fase di equilibrio (Figura 3.1), contraddistinta dall'assenza di significativi incrementi del cedimento, con letture che presentano variazioni confrontabili con l'errore strumentale della stazione totale ( $\pm 2\text{mm}$ ), e che quindi si dispongono lungo un plateau orizzontale, che diventa caratteristica sintomatica del raggiungimento di una condizione stabilizzata.

A tale processo di analisi sono stati sottoposti tutti i target installati sugli edifici, rispettivamente per il sottoattraversamento della canna sinistra e della canna destra.

Complessivamente, per il tunnel sinistro, è stata valutata la storia temporale delle deformazioni di n°135 target, che presentano un tempo di stabilizzazione compreso tra 10 e 30 giorni in circa il 64% delle mire installate.

Il grafico seguente, mostra la distribuzione statistica del tempo di stabilizzazione valutato per i target della canna sinistra. Come si può notare, i dati si presentano ripartiti in modo molto concentrato intorno al valore medio della gaussiana teorica, ed in tutti i casi raramente il cedimento di superficie ha richiesto tempi superiori ai 100 giorni per giungere alla stabilizzazione.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 22 di 88

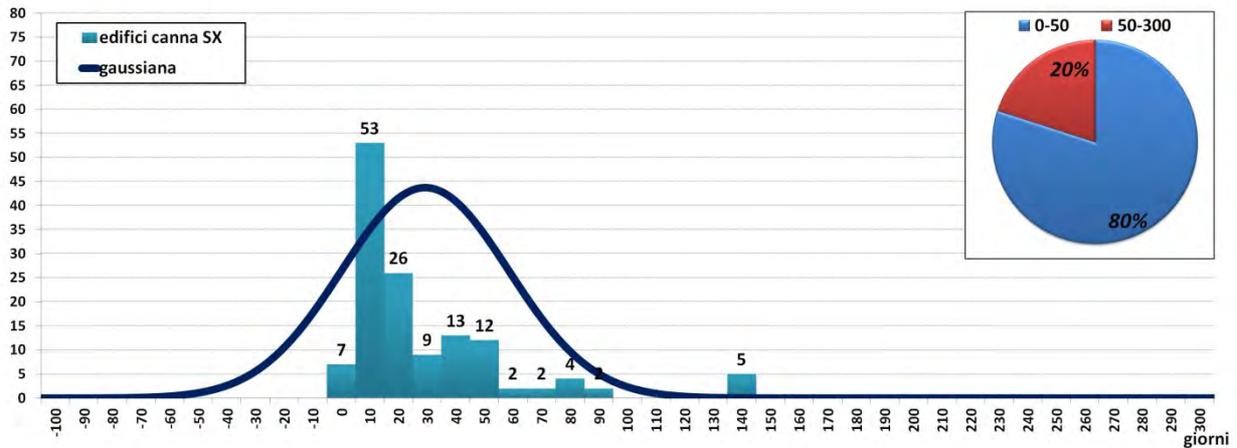


Figura 3.2: tempi per la stabilizzazione dei caposaldi di superficie – canna SX

Discorso ben differente per quanto riguarda il dato topografico rilevato durante la realizzazione della canna destra. Lo scavo della seconda canna, riporta una distribuzione molto più eterogenea dei tempi di stabilizzazione, che mediamente presentano valori di gran lunga superiori rispetto a quelli riscontrati per la canna sinistra. Complessivamente, durante lo scavo della canna destra, sono stati valutati n°240 target di monitoraggio, distribuiti lungo lo sviluppo longitudinale della galleria naturale con un tempo di stabilizzazione che globalmente varia tra i 10 e i 200 giorni circa.

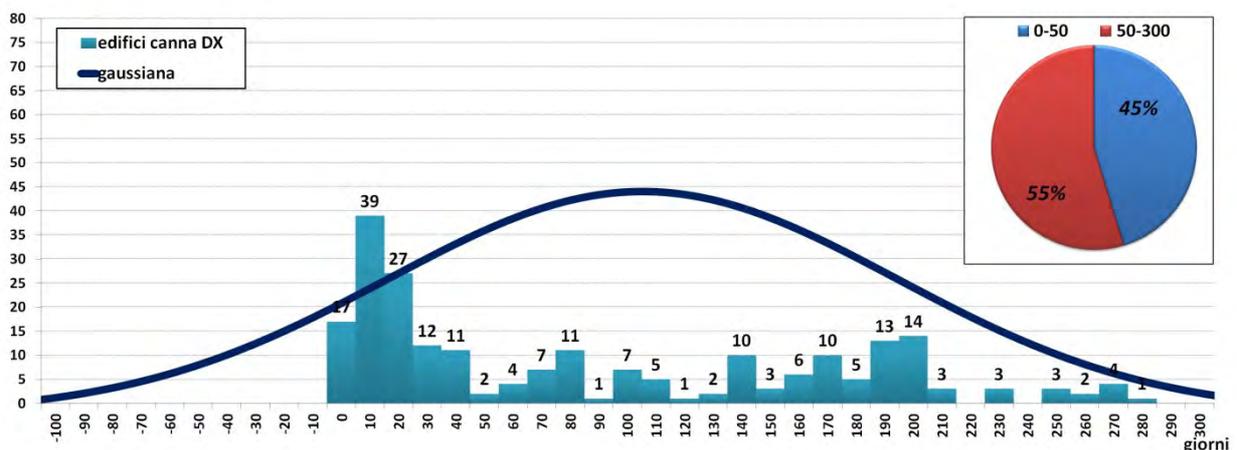


Figura 3.3: tempi per la stabilizzazione dei caposaldi di superficie – canna DX

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 23 di 88

Il primo dato evidente che emerge dall'analisi dei dati riportati è rappresentato dalla latenza con cui in superficie si tende a raggiungere la stabilizzazione dei fenomeni deformativi, successivamente al passaggio del secondo fronte di scavo.

A parità di riferimento temporale, pari a circa 50 giorni, durante i quali in canna SX hanno raggiunto la stabilità deformativa circa l'80% delle mire installate, in canna destra è possibile notare come soltanto il 47% di caposaldi sia stabilizzato.

La plasticizzazione del terreno nell'intorno della canna destra, sembrerebbe sovrapporsi al contributo deformativo indotto dalla prima canna, con possibili interazioni tra i raggi plastici dei due cavi, che giustificerebbero la latenza riscontrata nei tempi di stabilizzazione pervenuta durante la realizzazione della canna destra. In tal senso, non è da escludere che ulteriori stimoli deformativi, potrebbero portare ad ulteriore difficoltà nel raggiungimento della stabilità dei cedimenti, con inevitabili incrementi significativi del cedimento in valore assoluto.

Il ritardo nel processo di equilibrio, infatti, anche se evidenzia tassi evolutivi discretamente bassi dei cedimenti di superficie, si traduce comunque in un aumento del cedimento totale, che potrebbe comportare a ripercussioni anche importanti sulle preesistenti e sugli equilibri globali della superficie.

### **3.1.1 Cedimenti e probabile grado di danneggiamento per gli edifici lungo la GN Caltanissetta.**

Il primo dato che si vuole mostrare, è quello relativo alla distribuzione lungo l'asse della galleria naturale, dei diversi valori di volume perso.

Il volume perso rappresenta il parametro caratteristico con cui è possibile rappresentare e valutare la curva di subsidenza; esso rappresenta la diminuzione del volume rispetto al teorico che si ottiene a seguito dello scavo per effetto della deformazione radiale del cavo.

L'informazione che si ottiene dalla back-analysis, in termini di volume perso, costituisce un dato molto interessante ed aiuta ad individuare in modo abbastanza speditivo le zone in cui il fenomeno di disturbo superficiale sembrerebbe aver assunto caratteristiche del tutto singolari.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 24 di 88

Il volume perso non è direttamente misurabile, ma è valutabile partendo dai valori misurati di cedimento.

Di seguito si riporta le distribuzioni dei volumi persi sia per la canna sinistra che per la canna destra:

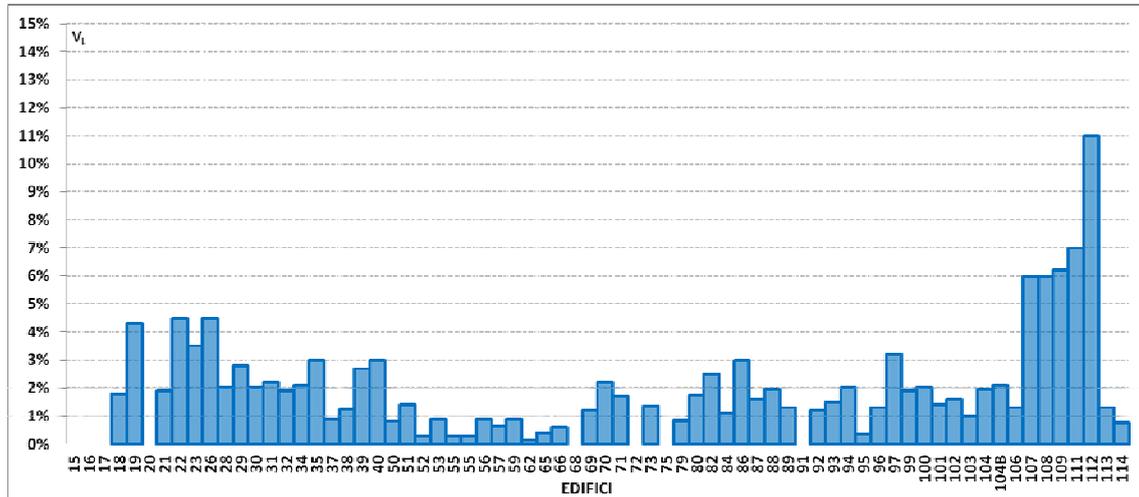


Figura 3.4: distribuzione volumi persi lungo la GN Caltanissetta – canna SX

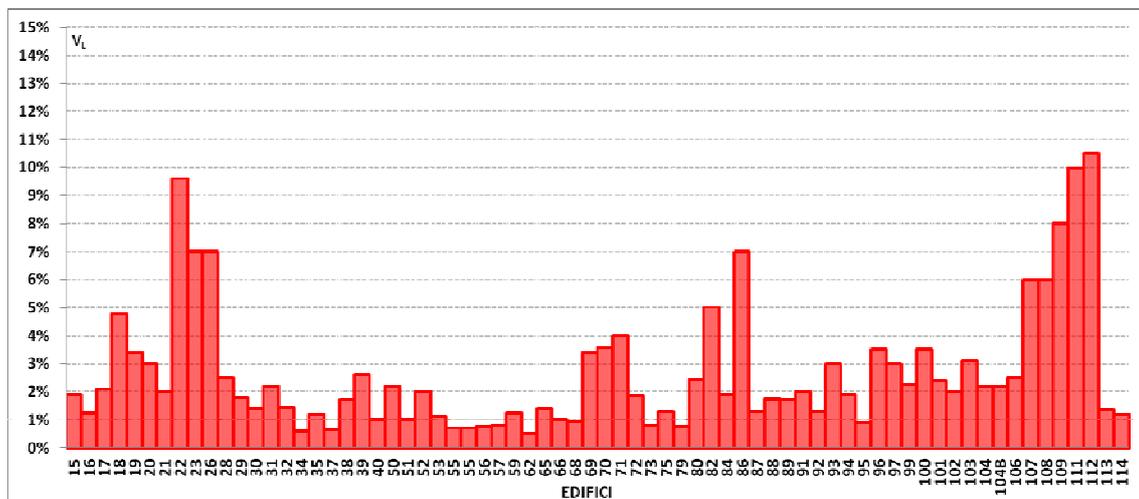


Figura 3.5: distribuzione volumi persi lungo la GN Caltanissetta – canna DX

Il disturbo deformativo maggiore, al quale è possibile associare un maggiore volume perso, si riscontra nelle aree esterne del tracciato rispettivamente vicine agli imbocchi AG e A19 della galleria naturale. Questo andamento si verifica per la canna sinistra ed è presente anche nello scavo di quella destra. Il tratto centrale, invece, anche dopo il

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 25 di 88

passaggio della seconda canna, presenta valori di volume perso mediamente intorno al valore dell'1.5%.

Un'area di estrema singolarità di comportamento è rappresentata sicuramente dalla zona in adiacenza dell'imbocco A19 (**ed. 108-114**), che presenta una risposta deformativa, sin dallo scavo della canna SX, caratterizzata da valori di volume perso considerevoli. Tale tendenza viene confermata e accentuata anche durante lo scavo della seconda canna.

Data l'entità dei volumi persi in gioco e tenuto conto che i parametri di avanzamento della macchina in tale tratta, non hanno subito variazioni degni di nota, tale singolarità di comportamento è senza dubbio imputabile ad un comportamento poco prevedibile del terreno allo scavo, che ha comportato importanti ripercussioni in termini di cedimento superficiale totale.

Discorso completamente analogo, nella zona in corrispondenze degli edifici **21-22-26-40, 68-71** e **81-86**, dove con il passaggio della seconda canna, sono stati riscontrati considerevoli cedimenti di superficie ai quali corrispondono dei volumi persi quanto meno rilevanti e poco compatibili con dinamiche imputabili a problematiche di scavo.

Questo tipo di informazione, evidenzia come le problematiche afferibili al volume perso molto elevato, abbiano interessato delle aree circoscritte e facilmente individuabili lungo il tracciato della Caltanissetta. Tali aree costituiscono senza dubbio zone critiche, che hanno raggiunto un equilibrio, ma che non andrebbero ulteriormente perturbate al fine garantire la persistenza della stabilizzazione raggiunta. Dall'altro lato si evidenzia che anche nelle altre zone risultano valori di volume perso caratterizzati da una forte dispersione considerando la metodologia di scavo, i materiali attraversati e le pressoché costanti coperture. Questa grande variazione dimostra la imprevedibilità in fase progettuale di previsione e allo stesso tempo la impossibilità di agire in modo attivo durante lo scavo per contrastare i fenomeni di subsidenza che sembrano svilupparsi in modo del tutto indipendente dalle azioni operative messe in atto dalla TBM.

Nel seguito si darà invece riscontro alla significativa tendenza evolutiva del livello di danno medio riscontrato sulle preesistenze.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 26 di 88

Nella figura sottostante si riporta il grafico di Burland, con la dispersione delle impronte degli edifici considerati, per lo scavo della canna sinistra e la canna destra. Complessivamente sono state considerate n°149 impronte trasversali lungo tutto il tracciato della GN Caltanissetta.

Dalla sovrapposizione degli effetti, è evidente lo spostamento verso categoria di danno maggiori, con lo scavo della seconda canna.

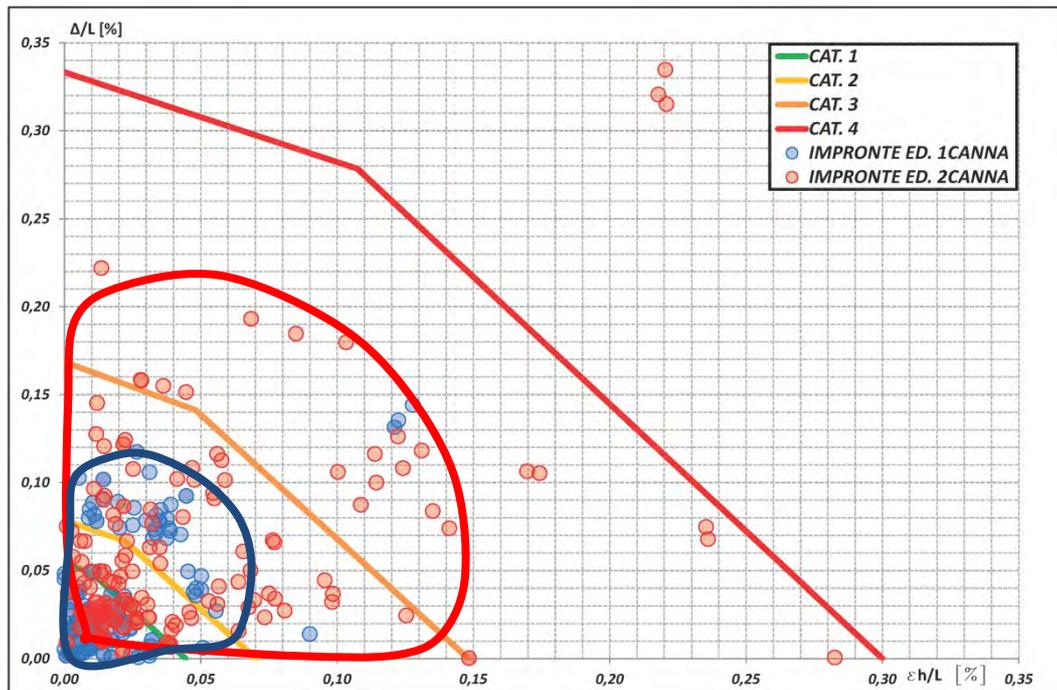


Figura 3.6: sovrapposizione della distribuzione delle impronte preesistenze

Con il passaggio della seconda canna, il potenziale danno medio, che principalmente si attestava tra le categorie 1 e 2, sconfinava in modo considerevole nella categoria 3, con il superamento di 3 edifici che ricadrebbero all'interno della delicata categoria 4-5.

Complessivamente, quindi, la totalità delle impronte analizzate, presentano questa tendenza evolutiva, che ad ogni successivo disturbo tenso-deformativo dell'ammasso porterebbe ad un innalzamento del livello medio di potenziale danno indotti sugli edifici.

Dopo lo scavo della canna sinistra, circa il 70% delle impronte analizzate, ricadeva all'interno di una categoria di potenziale danno compresa tra cat.0 e cat.1, ovvero riconducibili a danni alle strutture lievi e/o trascurabili, questa percentuale scende al 54% successivamente lo scavo del fronte destro.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 27 di 88

Per contro, successivamente allo scavo della seconda canna, la cat. 3 riporta un aumento di circa il 10% e si presenta l'insorgenza di impronte ricadenti in cat.4-5 (2%)

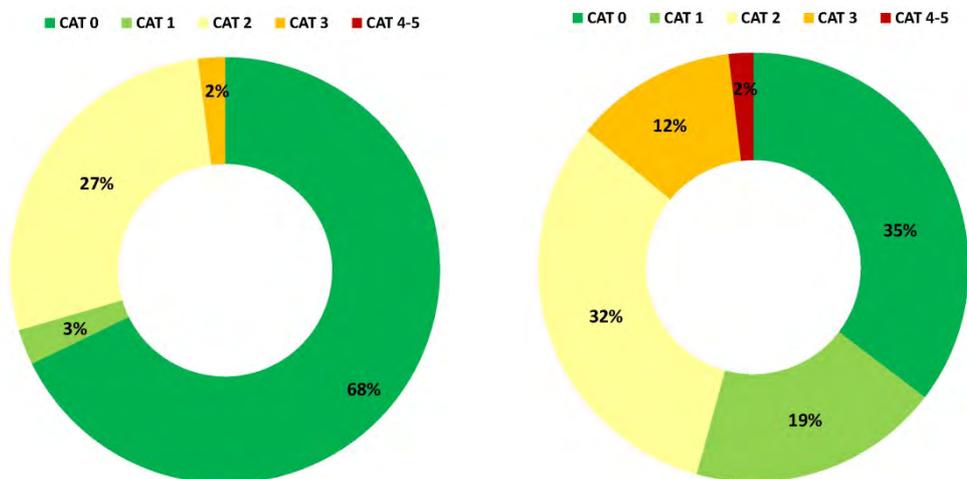


Figura 3.7: percentuale categoria di danno – canna SX e Canna DX

### 3.2 Esclusione di eventuali fenomeni di sovrascavo

Tenuto conto della forte evidenza deformativa superficiale ed in particolare delle singolarità nel comportamento tenso-deformativo dell'ammasso in alcune aree circoscritte della superficie, durante la realizzazione della galleria naturale, sono state eseguite una serie di prove/indagini, volte a eliminare ogni possibile collegamento tra queste singolarità ed eventuali sovrascavi della fresa EPB.

È noto che la galleria in esame, si sviluppa in prevalenza in terreni con comportamento coesivo in condizioni sature. Dal punto di vista geotecnico le due formazioni che caratterizzano la quasi totalità del tracciato (Argille brecciate e, in subordine, Calcari marnosi o Trubi) presentano caratteristiche geotecniche confrontabili in termini di resistenza meccanica e di deformabilità, lo stesso dicasi per le proprietà idrogeologiche.

La maggiore differenziazione di proprietà geotecniche si riscontra in corrispondenza delle zone di disturbo tettonico nelle quali, indipendentemente dalla litologia originaria, si manifesta un brusco decadimento delle caratteristiche meccaniche.

Il quadro idro-geologico complessivo della galleria naturale, seppur caotico e complesso per via delle numerose zone tettonizzate, presenta una certa omogeneità per quanto

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 28 di 88

riguarda l'ammasso attraversato (uniformità che è ancora più evidente se trascurando le differenze in termini di caratteristiche meccaniche). Analizzando esclusivamente la densità delle varie formazioni, nella totalità dei casi si aggira intorno al valore di  $1.95 \text{ ton/m}^3$ .

Proprio la densità del terreno da scavare, costituisce nel corso d'opera di una galleria naturale con scavo meccanizzato, un importante input per il controllo, la gestione e l'eventuale mitigazione di possibili fenomenologie di sovrascavo, che porterebbero a parità di avanzamento effettuato, l'estrazione di maggiori volumi di terreno.

Durante lo scavo in avanzamento della GN Caltanissetta, si è proceduto ad un continuo controllo, in tempo reale, dei pesi estratti di terreno mediante un sistema dotato di bilance dinamiche, che comunicava direttamente con il software di gestione della macchina.

Tale dispositivo, tiene sotto controllo il peso del terreno estratto uscente dalla coclea, che viene poi depositato sul nastro trasportatore per il deposito nelle vasche di giacenza temporanea che si trovano in prossimità dello stacker.

Dato un avanzamento medio per anello pari a circa 2.0m, con un diametro di scavo pari a 15.08 m ca, il volume teorico di terreno coinvolto durante ogni singola spinta risulta pari a circa  $357 \text{ m}^3$ . Considerato il valore di peso di volume di PVT pari a  $1.95 \text{ ton/m}^3$ , si ottiene quindi un valore teorico di peso estratto per anello pari a circa 697ton.

Per ottenere una stima reale dei volumi coinvolti durante lo scavo di un anello, al fine di ottenere un possibile confronto diretto con il valore del parametro macchina della bilancia, si deve tenere in considerazione il volume di condizionante impiegato.

Mediamente il condizionamento del fronte di scavo è avvenuto mediante l'utilizzo di circa  $120 \text{ m}^3$  di acqua ( $75 \text{ m}^3$  acqua di scavo e  $45 \text{ m}^3$  acqua di schiuma) e  $0.6 \text{ m}^3$  di tensioattivo, che sommati al peso di terreno scavato, portano il valore teorico medio di riferimento dello smarino per singolo anello, al valore di 818 ton circa (*valori in rosso nei seguenti grafici*).

Di seguito si riporta il grafico di comparazione, anello per anello, tra peso teorico e peso estratto, che tiene in considerazione i volumi di condizionante utilizzato, sia per la canna sinistra sia per gli anelli scavati della canna destra.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 29 di 88

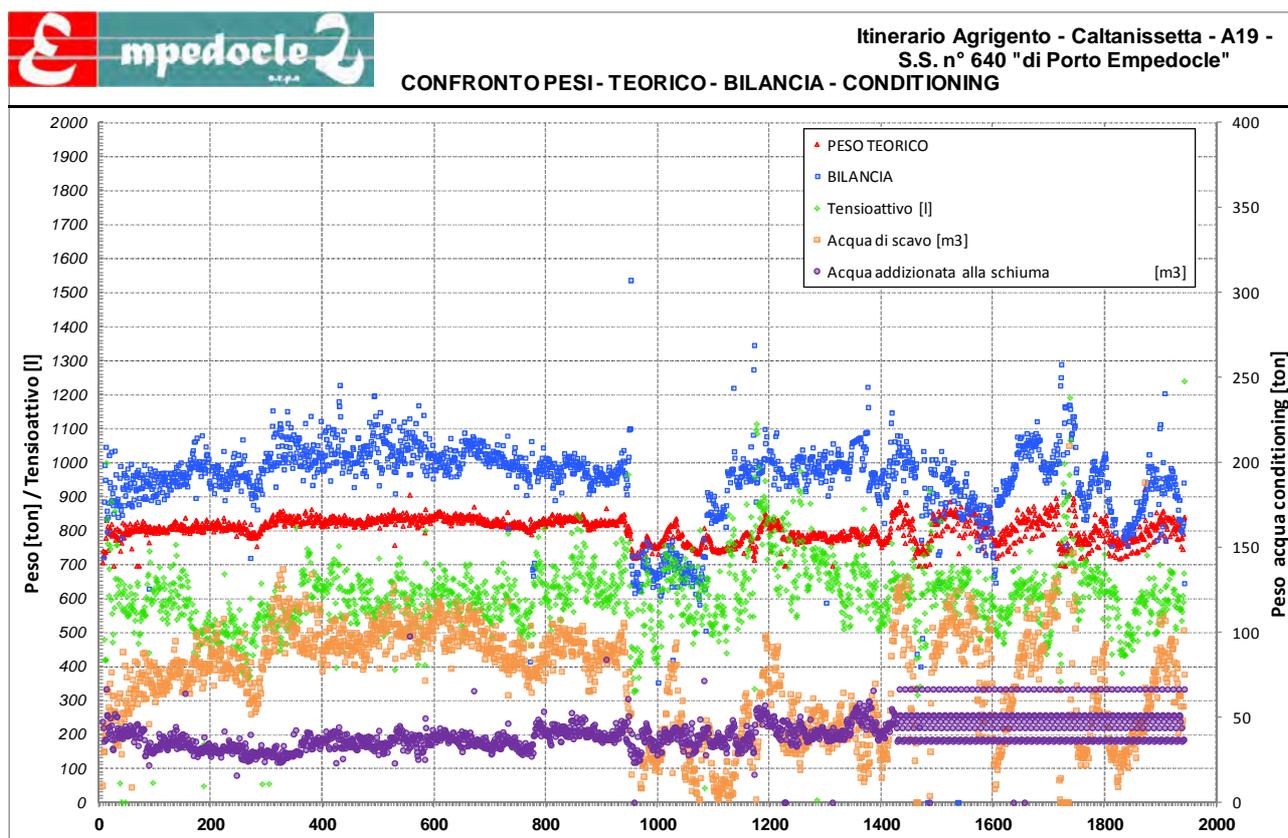


Figura 3.8: confronto tra peso estratto bilancia e teorico e conditioning canna SX

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 30 di 88

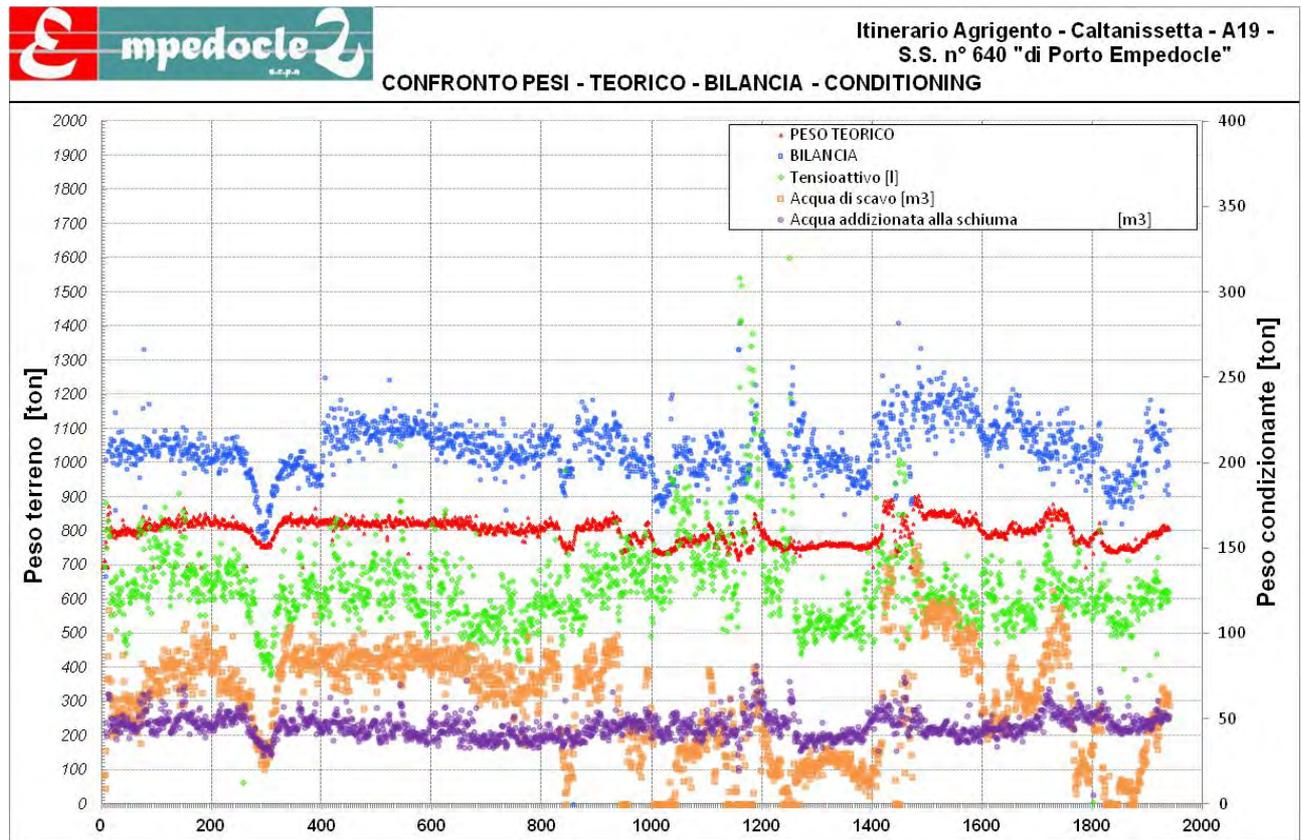


Figura 3.9: confronto tra peso estratto bilancia e teorico e conditioning anelli canna DX

Dai grafici è evidente la discrepanza tra i valori di peso estratto rilevato dalla bilancia della TBM (*valori in blu*) ed il corrispettivo valore di peso teorico .

Al fine di annullare possibili errori strumentati di misurazione delle bilance, numerosi controlli sono stati condotti, lungo lo scavo della galleria naturale, fondamentalmente adottando due diverse metodologie di verifica:

1. *Taratura del sistema “bilancia” tramite l'utilizzo di pesi noti (catene);*
2. *Confronto tra il valore del “pesato” registrato dalla macchina, relativo ad un singolo anello, con il peso rilevato sui mezzi di movimentazione dello smarino (bumper), al netto della massa veicolare.*

Tutti i controlli effettuati, hanno riscontrato una certa congruenza ed efficacia delle pesate di macchina, pertanto tale valore può essere considerato come indicativo dei pesi estratti durante lo scavo di un anello. Nella fattispecie, il valore medio del peso estratto per anello relativo allo scavo realizzato è di circa 1050 ton ad anello.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 31 di 88

Nei grafici riportati precedentemente le variazioni presenti tra teorico e “pesato”, risultano essere sistematici e presenti in tutti gli anelli scavati, ad esclusione delle zone di attraversamento della formazione dei trubi **TRB** e dei calcari **GTL** (anelli 950-1100 , 1500-1600 e 1820-1870 canna sx e 290-320 canna dx), in cui il valore riscontrato sulla bilancia della TBM si allinea verosimilmente al teorico.

Per il caso della galleria Caltanissetta la contemporaneità e la sistematicità dei diversi fenomeni qui di seguito riportati, tendono a suggerire la necessaria esclusione della presenza del fenomeno del sovrascavo:

- La differenza tra peso teorico e peso estratto è abbastanza sistematico per tutti gli anelli scavati in TRV, mentre in prossimità della zona di attraversamento dei trubi o dei calcari, vi è una repentina diminuzione dei valori di peso registrati, nonostante tutti i parametri macchina e la metodologia di avanzamento non subisca variazioni degne di nota;
- Quando non si utilizza l'escursione dei cutter presenti sulla corona perimetrale della testa, come in questo caso, il fenomeno del sovrascavo è tendenzialmente un fenomeno puntuale e raramente sistematico nel caso scavo dove avviene l'applicazione di contropressione al fronte. Raramente ha una connotazione sistematica, ma sicuramente qualora l'avesse non sarebbe associabile alla formazione geologica di attraversamento.
- L'eventuale sovrascavo stimato pari a circa 200-250 ton, per ciascun anello, non sarebbe compatibile con i valori di cedimento superficiale in termini di volume perso riscontrati con il monitoraggio (20-25% circa).
- Le pressioni ed i volumi di retro iniezione registrati, fanno intendere che non si verificano sovraprofili causa instabilità del cavo. A conferma di tale assunzione, ci si avvale anche dei valori di volume iniettato dalla 13<sup>a</sup> linea di iniezione, installata a 5 anelli di distanza dallo scudo, che registra volumi iniettati di grouting fino a rifiuto ( 20bar ) non superiori al m<sup>3</sup>. In altre parole, nel nostro caso l'iniezione secondaria – attività indispensabile per il riempimento di vuoti al contorno dello scavo in condizioni di sovrascavo – fornisce esito negativo (assenza dei vuoti da riempire).

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 32 di 88

### **3.2.1 Campagna integrativa indagini ed approfondimento della conoscenza dei parametri geotecnici delle argille**

Durante la fase di perforazione e prelievo, diverse sono le cause di disturbo arrecato al terreno. Infatti, durante la fase di perforazione, l'estrazione del materiale causa una riduzione dello stato di sforzo sotto il foro, entro una certa zona, con tendenza quindi al rigonfiamento o al refluitamento.

Tale fenomeno è graduale e dipende dal tempo, è pertanto essenziale evitare che trascorra un lungo intervallo di tempo tra la fine della perforazione ed il campionamento, e l'analisi delle caratteristiche meccaniche del terreno in laboratorio, al fine di evitare che tali misure siano soggette ad errori dovuti al disturbo e al rigonfiamento del campione.

In tal senso, la presenza della galleria naturale predispone una finestra operativa che offre la possibilità di annullare di fatto la problematica legata all'eccessiva profondità di carotaggio nei terreni argillosi. L'accessibilità fornita dal tunnel, ovviamente non disponibile durante le indagini di PVT, garantisce l'accesso alla profondità di 130-140m, senza grossi ritardi tra il tempo di perforazione e quello di estrazione del provino.

L'idea è stata quella di effettuare dei carotaggi direttamente dalla galleria, per l'estrazione di campioni indisturbati con il fine di minimizzare gli effetti di disturbo della perforazione riconducibili esclusivamente ai fenomeni funzione del tempo, quali rigonfiamento e refluitamento, e determinare il valore effettivo di peso di volume relativo alla conduzione quanto più simile a quella relativa all'attraversamento della TBM durante lo scavo in avanzamento.

In prossimità dell'anello 450, della canna sinistra della GN Caltanissetta, è stato eseguito un foro verticale verso il basso a carotaggio continuo della profondità di circa 10.0 m per campionare specificamente la formazione argillosa TRV.

Sono stati prelevati numero 3 campioni a diverse profondità:

- Campione **C1** profondità di battuta **9.17 – 9.29 m**;
- Campione **C2** profondità di battuta **9.74 – 9.84 m**;
- Campione **C1** profondità di battuta **10.64 – 10.74 m**;

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 33 di 88

VARIANTE TECNICA N.4

<b>CAMPIONE #C1 profondità 9,17 -9,29</b>		
<b>tara</b>	$B_s$	1,179 Kg
	$\Phi_{est}$	89,5 mm
<b>diametro</b>	$\Phi_{int}$	84,5 mm
	spess.	2,5 mm
	$L_{FUSTELLA}$	367 mm
<b>Lunghezza</b>	$L_{VUOTO FUSTELLA}$	245 mm
	$L_{CAMPIONE}$	122 mm
<b>Peso Campione + Fustella</b>	$B_s$	2,737 Kg
<b>Peso Campione</b>	$B_s$	1,558 Kg
<b>determinazione <math>\gamma</math></b>	<b>2,28</b>	<b>ton/m<sup>3</sup></b>

<b>CAMPIONE #C2 profondità 9,74 -9,84</b>		
<b>tara</b>	$B_s$	1,594 Kg
	$\Phi_{est}$	89,5 mm
<b>diametro</b>	$\Phi_{int}$	84,5 mm
	spess.	2,5 mm
	$L_{FUSTELLA}$	367 mm
<b>Lunghezza</b>	$L_{VUOTO FUSTELLA}$	255 mm
	$L_{CAMPIONE}$	112 mm
<b>Peso Campione + Fustella</b>	$B_s$	3,031 Kg
<b>Peso Campione</b>	$B_s$	1,437 Kg
<b>determinazione <math>\gamma</math></b>	<b>2,29</b>	<b>ton/m<sup>3</sup></b>

<b>CAMPIONE #C3 profondità 10,64 -10,74</b>		
<b>tara</b>	$B_s$	1,645 Kg
	$\Phi_{est}$	89,5 mm
<b>diametro</b>	$\Phi_{int}$	84,5 mm
	spess.	2,5 mm
	$L_{FUSTELLA}$	367 mm
<b>Lunghezza</b>	$L_{VUOTO FUSTELLA}$	271 mm
	$L_{CAMPIONE}$	96 mm
<b>Peso Campione + Fustella</b>	$B_s$	2,891 Kg
<b>Peso Campione</b>	$B_s$	1,246 Kg
<b>determinazione <math>\gamma</math></b>	<b>2,31</b>	<b>ton/m<sup>3</sup></b>

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 34 di 88

Il valore del peso di volume in situ così ottenuto è pari a circa  $2.30 \text{ ton/m}^3$ , decisamente maggiore rispetto al valore di quella media adottata in PVT pari a  $1.95 \text{ ton/m}^3$ .

La metodologia di prova utilizza, minimizza il disturbo dovuto alla fenomenologia legata al tempo associabile alle argille, pertanto il valore ottenuto può essere considerato come un valore prossimo alle condizioni riscontrabili durante la fase di scavo in avanzamento della TBM.

In questo modo, considerando il volume di scavo coinvolto durante l'avanzamento di un singolo anello, pari a circa  $357 \text{ m}^3$ , ad esso corrisponderà un valore pari a circa 821 ton, che se sommati alle 120 ton del condizionante, portano ad un totale pari a circa 940 ton.

Peso di volume : $1.95 \text{ ton/m}^3$			Peso di volume : $2,30 \text{ ton/m}^3$		
superficie di scavo	$A_{\text{scavo}}$	$178,5 \text{ m}^2$	superficie di scavo	$A_{\text{scavo}}$	$178,5 \text{ m}^2$
lunghezza anello	$L$	$2 \text{ m}$	lunghezza anello	$L$	$2 \text{ m}$
volume terreno ad anello	$V_{\text{scav.}}$	$357 \text{ m}^3$	volume terreno ad anello	$V_{\text{scav.}}$	$357 \text{ m}^3$
Peso terreno singolo anello	$P_{\text{anello}}$	$696,15 \text{ ton}$	Peso terreno singolo anello	$P_{\text{anello}}$	$821,1 \text{ ton}$
Peso condizionante	$P_{\text{cond.}}$	$120 \text{ ton}$	Peso condizionante	$P_{\text{cond.}}$	$120 \text{ ton}$
Peso teorico ad anello	$P_{\text{teorico}}$	$816 \text{ ton}$	Peso teorico ad anello	$P_{\text{teorico}}$	$941 \text{ ton}$
Peso medio misurato in macchina per anello	$P_{\text{bilancia}}$	$1050 \text{ ton}$	Peso medio misurato in macchina per anello	$P_{\text{bilancia}}$	$1050 \text{ ton}$
$\Delta$ riscontrato	$\Delta \text{ Peso}$	$234 \text{ ton}$	$\Delta$ riscontrato	$\Delta \text{ Peso}$	$109 \text{ ton}$
Volume perso corrispondente	$V_{\text{perso}}$	<b>22%</b>	Volume perso corrispondente	$V_{\text{perso}}$	<b>10%</b>

Figura 3.10: confronto differenze in termini di peso per differenti pesi di volume

Considerando 940 ton come peso medio di terreno estratto per un anello, le differenze tra teorico e "pesato" si riducono fino ad avere un delta pari a circa il 10%, differenza più contenuta ma pur sempre poco congruente con il dato superficiale dove il volume perso è mediamente di  $1.0 \div 1.5\%$ . In tal senso, non si deve però trascurare la forte fenomenologia estrusiva, ampiamente descritta nei capitoli precedente, la quale comporta dei refluenti di terreno all'interno della camera di scavo, tali da annullare del tutto questo ulteriore 10% di differenza riscontrato.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 35 di 88

## 4. IL COMPORTAMENTO ATTESO

La previsione dei cedimenti in superficie e degli spostamenti al fronte indotti dallo scavo viene effettuata mediante il codice di calcolo agli elementi finiti tridimensionali Plaxis 3D Tunnel 2.4

Lo scopo delle presenti analisi è innanzitutto di ricercare, mediante analisi a ritroso, i valori dei parametri geomeccanici che meglio simulano il comportamento registrato al fronte e in superficie durante lo scavo. A seguito di questa fase di taratura si è simulato lo scavo del bypass per valutarne gli effetti in termini di subsidenze.

### 4.1 Modello di calcolo

#### 4.1.1 Generalità

Il modello 3D è stato costruito mediante l'estrusione di una sezione rappresentativa, in corrispondenza della progressiva 14+246 con riferimento all'asse SX. Tale sezione è caratterizzata da una distanza planimetrica di 35.75m tra le due canne e da una copertura in calotta di circa 120m. La falda si trova a 10m dal piano campagna.

Le dimensioni del modello di calcolo sono state definite in modo tale da posizionare i vincoli (estremità del modello) lontano dall'area di influenza dello scavo.

Il modello di calcolo ha pertanto un'estensione in direzione laterale, oltre la galleria, pari a circa 135m. La lunghezza del modello, in direzione longitudinale parallela all'asse della galleria, è stata definita in modo tale da includere l'intero bacino di subsidenza.

Sono state considerate le seguenti macrofasi:

- canna sx:230m circa scavo e rivestimento in un'unica fase assumendo un volume perso pari all'1%,
- Canna sx:114m circa scavo e rivestimento a step di 2m in modo da simulare l'avanzamento
- Canna dx:230m circa scavo e rivestimento in un'unica fase assumendo un volume perso pari all'1%,
- Canna dx: 114m circa scavo e rivestimento a step di 2m in modo da simulare l'avanzamento.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 36 di 88

La lunghezza di 80m circa è stata definita così da poter considerare una sezione trasversale di riferimento che si trovi ad almeno 1 diametro davanti al fronte e a 3 diametri dietro al fronte lungo la tratta che simula l'avanzamento con TBM. La sezione esaminata si trova a circa 20m dal primo step di avanzamento e le fasi iniziali di scavo non hanno influenza su di essa.

Le considerazioni relative ai cedimenti e le deformazioni fanno riferimento alla tratta del modello di 114m.

Il modello è stato sviluppato in funzione delle seguenti 77 fasi di calcolo:

- Fase 0: carico geostatico in presenza della falda;
- Fase 1: scavo e rivestimento della prima tratta di galleria di lunghezza pari a 230m circa (canna dx e sx);
- Fase 2: avanzamento della fresa e scavo dei primi 2m in presenza dello scudo tronco-conico e della contro-pressione al fronte (canna sx);
- Fasi 3-7: avanzamento della fresa a step di 2.0m fino alla fine dello scudo (canna sx);
- Fase 8: avanzamento della fresa di 2.0m e installazione del primo anello di rivestimento (canna sx);
- Fasi 9-39: avanzamento della fresa a step di 2.0m con installazione del rivestimento definitivo;
- Fase 40: avanzamento della fresa e scavo dei primi 2m in presenza dello scudo tronco-conico e della contro-pressione al fronte (canna dx);
- Fasi 41-45: avanzamento della fresa a step di 2.0m fino alla fine dello scudo;
- Fase 46: avanzamento della fresa di 2.0m e installazione del primo anello di rivestimento (canna dx);
- Fasi 47-77: avanzamento della fresa a step di 2.0m con installazione del rivestimento definitivo (canna dx);
- Fasi 78-83: scavo del by-pass con avanzamenti di 2m e realizzazione del sostegno di prima fase a 2m dal fronte. Lo scavo procede dalla canna sinistra verso la canna destra.

Il modello di calcolo è riportato nelle figure seguenti.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 37 di 88

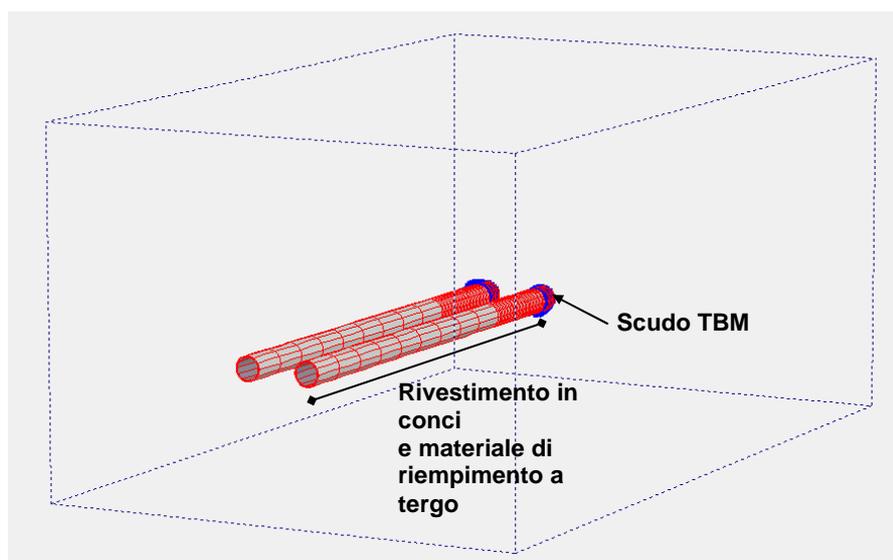
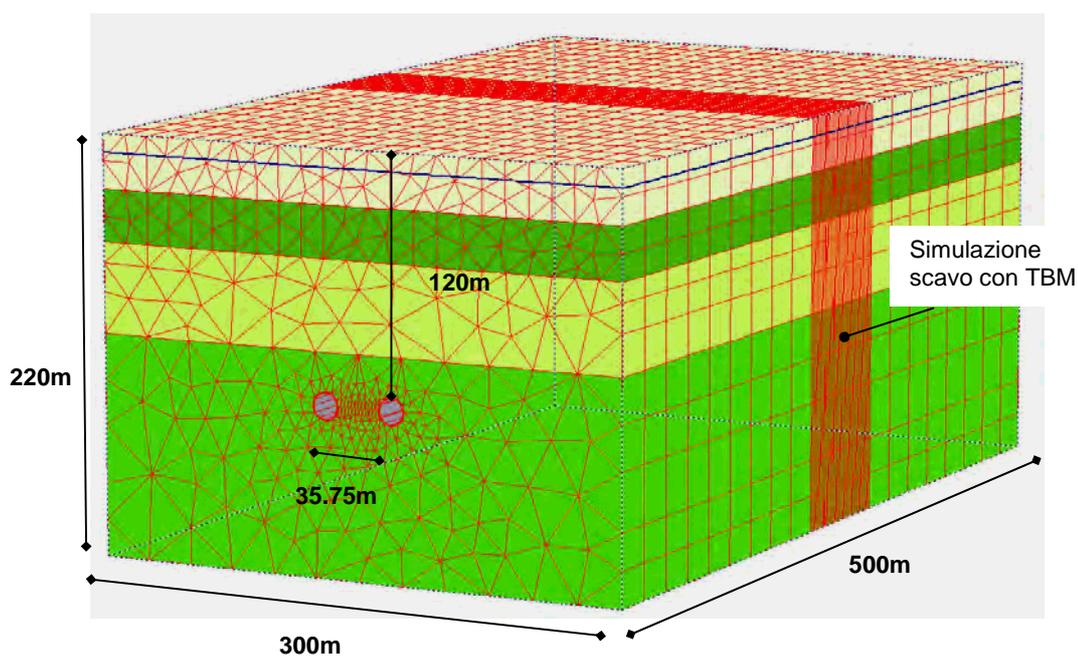
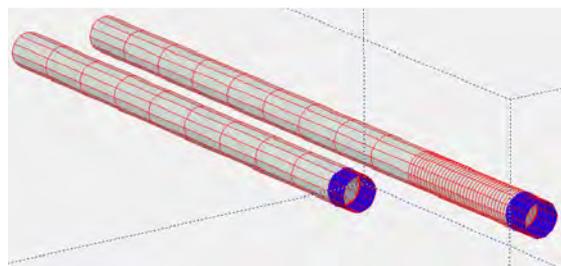
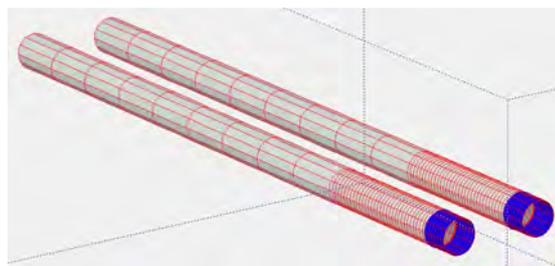


Figura 4.1: modello di calcolo agli elementi finiti implementato con Plaxis 3D Tunnel2.4

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 38 di 88



Fase 45: scavo e completamento della prima canna e avanzamento TBM per la seconda canna



Fase 76: scavo e completamento delle due canne

Figura 4.2: modello di calcolo agli elementi finiti implementato con Plaxis 3D Tunnel2.4

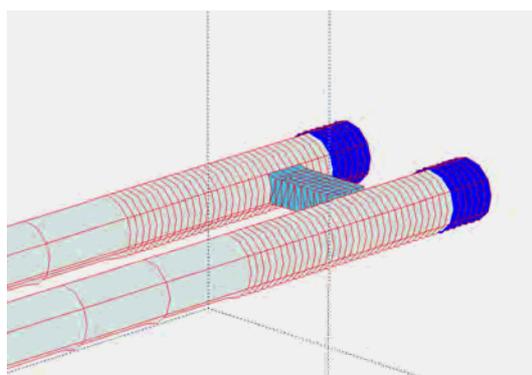


Figura 4.3: Fasi 78-83: scavo e installazione del sostegno di prima fase del by-pass

#### 4.1.1 Elementi strutturali

Lo scudo è schematizzato nel modello di calcolo mediante elementi bidimensionali tipo "piastra" ai quali è stata assegnata una legge di comportamento elastica lineare definita dal modulo di Young dell'acciaio (spessore 7cm). Per simulare la perdita di volume dovuta alla conicità della TBM si applica un parametro (contraction) che, nel piano prescelto, impone la riduzione del diametro della sezione scavata sul bordo della quale sono state installate le piastre. Il parametro da introdurre indica in percentuale il rapporto tra l'area "persa" e l'area iniziale della sezione. Per il caso in esame, lungo lo scudo, si ha una variazione del diametro di 9cm corrispondente ad una variazione percentuale della sezione dell'1.19%. Ad ogni avanzamento della fresa (2.0m) occorre pertanto applicare un fattore di riduzione dello 0.198% alle 6 sezioni dello scudo.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 39 di 88

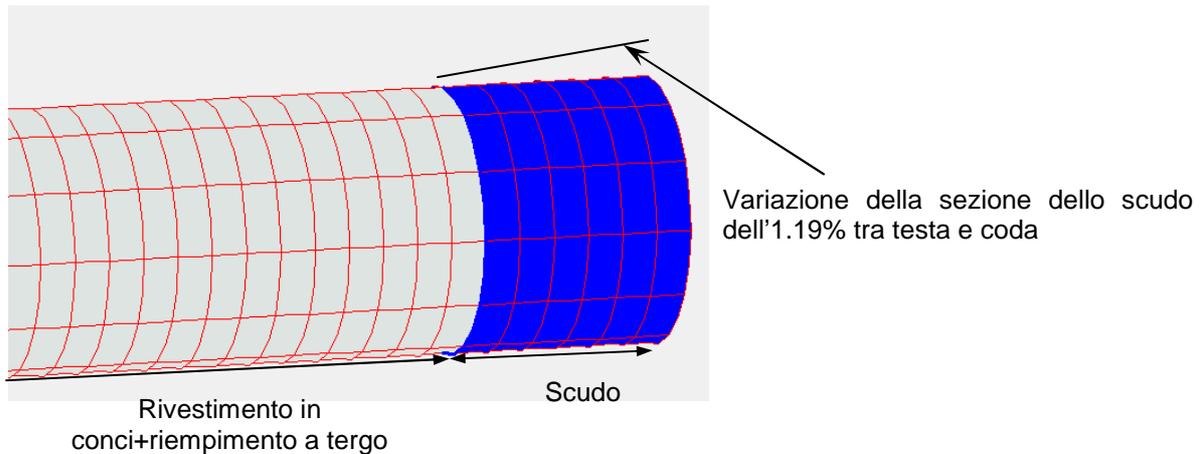


Figura 4.4: valori di "contraction" per simulare la conicità dello scudo

Il rivestimento definitivo in conci prefabbricati e il riempimento a tergo dei conci che va a saturare il vuoto anulare tra il profilo di scavo e il rivestimento definitivo sono stati modellati con elementi finiti volumetrici ai quali è stata assegnata una legge di comportamento elastica lineare definita da un modulo elastico di 35220MPa, in conformità alla relazione di calcolo della "Variante tecnica migliorativa". Per il riempimento a tergo dei conci è stato utilizzato un modulo di 500MPa.

Il sostegno di prima fase installato a seguito dello scavo del bypass è stato simulato come un volume pieno di geometria pari a quella dello scavo riempito con un materiale elastico equivalente il cui modulo è stato definito mediante la seguente equazione:

$$E_{eq} = s \cdot E / (r \cdot (1 - \nu))$$

Dove:

s è lo spessore equivalente del sostegno di prima fase

r è il raggio equivalente della sezione di scavo

Es è il modulo equivalente del sostegno di prima fase (centine + calcestruzzo proiettato)

ν è il coefficiente di Poisson del sostegno di prima fase

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 40 di 88

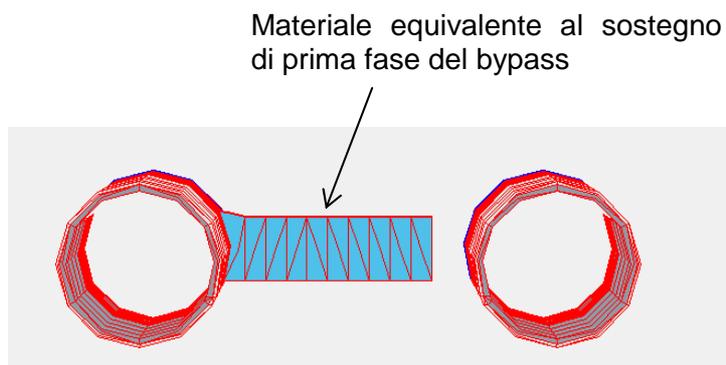


Figura 4.5: materiale equivalente che simula il sostegno di prima fase del bypass

#### 4.1.2 Stratigrafia di riferimento e legge di comportamento del terreno

Nella figura seguente si riporta il profilo stratigrafico utilizzato nel modello di calcolo geotecnico.

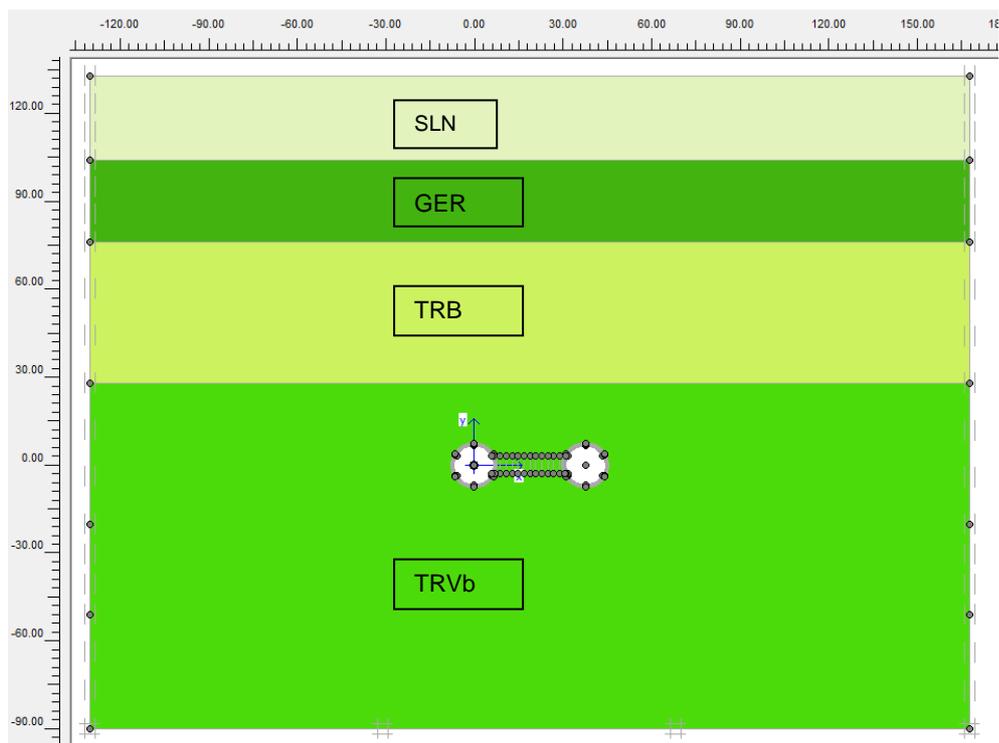


Figura 4.6: stratigrafia di riferimento

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 41 di 88

La legge di comportamento (criterio di rottura di Mohr Coulomb) degli elementi tridimensionali che simulano il terreno è stata assunta di tipo elasto plastica ideale (valori di picco coincidenti con i valori residui).

I parametri geotecnici introdotti nel modello sono stati modificati rispetto ai valori di progetto in modo da ottenere un campo di spostamenti, a seguito dello scavo della galleria, confrontabile con i valori registrati in sito.

Tabella 4.1: parametri geotecnici

Unità geotecnica	c' [kPa]	$\phi'$ [°]	C <sub>u</sub> [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	v [-]
Sabbie di Lanari (SLN)	5	20	-	20	30	0.3
Argille marnose di Geracello (GER)	-	-	50	23	70	0.3
Trubi pliocenici (TRB) indisturbati ed ad alta copertura	-	-	200	23	70	0.3
Argille brecciate plioceniche (TRVb) indisturbate	-	-	300	23	80	0.3

Dove:

- $\gamma$ : peso di volume
- E: modulo di Young
- v: coefficiente di Poisson
- $\phi'$ : angolo di resistenza al taglio
- c': coesione efficace
- C<sub>u</sub>: coesione non drenata

Il coefficiente di spinta a riposo è stato assunto pari a 1.

Le analisi sono state eseguite per condizioni non drenate.

#### 4.1.3 Carichi

Al fronte è stata applicata una contro-pressione media di 360kPa, come indicato nella Relazione geomeccanica della Variante tecnica migliorativa (Sezione 3). La pressione è stata applicata al fronte con una distribuzione lineare variabile con la profondità e proporzionale al peso di volume del materiale all'interno della camera di scavo (assunto pari a 16kN/m<sup>3</sup>).

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 42 di 88

## 4.2 Risultati delle analisi 3D

Nel presente capitolo si riportano i risultati delle analisi numeriche in termini di spostamenti indotti dallo scavo della galleria e dal successivo scavo del bypass. Nella figura seguente è indicata la sezione di riferimento per la valutazione dei risultati (Sezione A). Essa si trova a circa 5Ø dopo l'inizio della simulazione dello scavo e rivestimento con TBM e 5Ø dal termine della tratta.

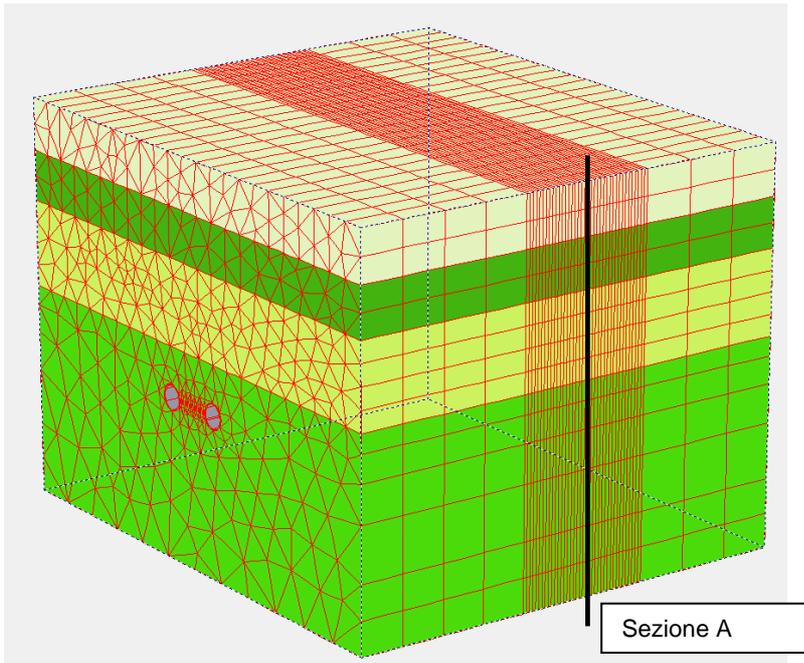


Figura 4.7: sezione di riferimento per l'analisi dei risultati (Sezione A)

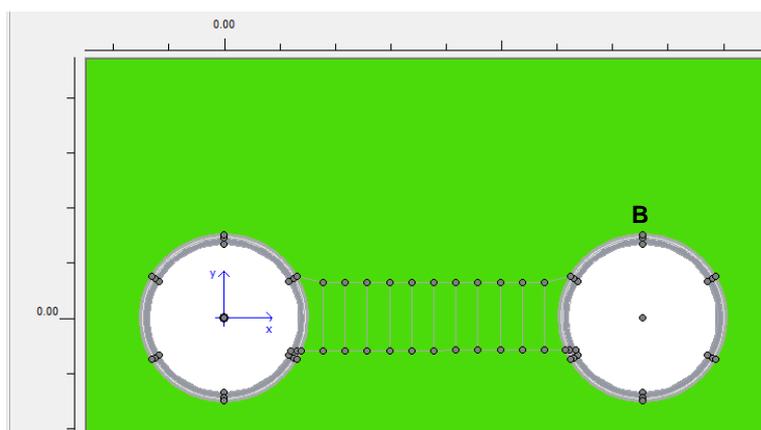
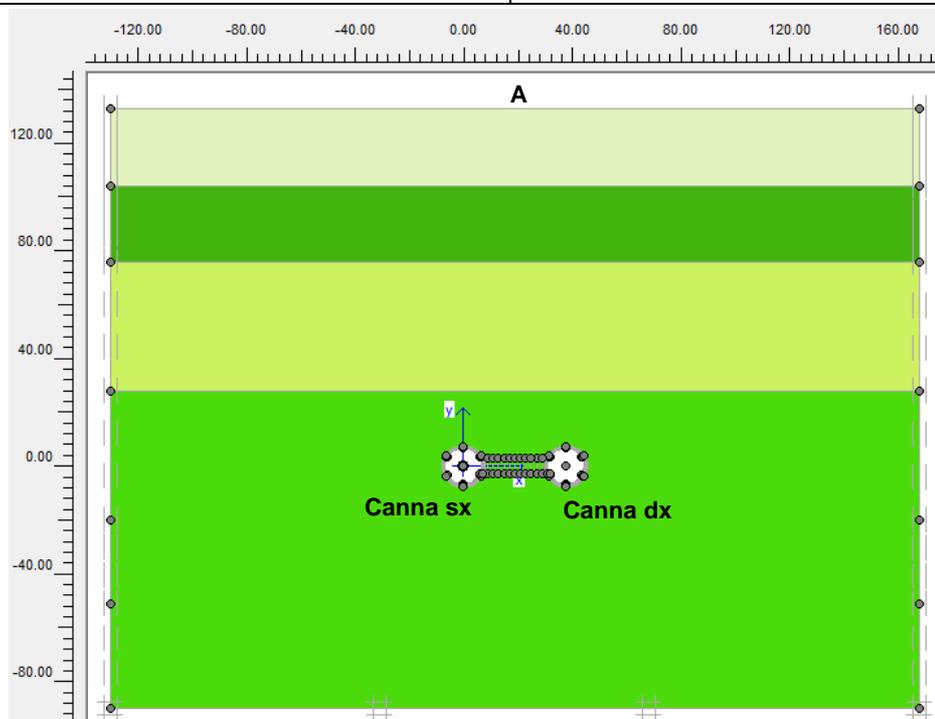
I principali risultati estrapolati dai modelli di calcolo sono riassunti nella tabella seguente nella quale sono indicati gli spostamenti che si verificano a seguito della realizzazione della galleria, dopo il passaggio del fronte di scavo di entrambe le canne rispetto alla sezione di riferimento.

Dai risultati riportati nel seguito si evince che gli spostamenti ottenuti variando la deformabilità dei terreni interessati dallo scavo sono del tutto simili a quelli registrati, pertanto, in tale contesto che riproduce la effettiva risposta dell'ammasso roccioso, è stato simulato lo scavo del bypass carrabile.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 43 di 88

Tabella 4.2. risultati delle analisi in termini di spostamenti verticali in superficie, in chiave di calotta ed estrusione al fronte (Sezione A – Fronte delle due canne lontano dalla sezione di riferimento >3Ø)

Spostamento verticale nodo A [cm]	Spostamento verticale nodo B [cm]
5	24



Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 44 di 88

Nelle figure seguenti si illustrano, all'avanzare del fronte di scavo, i cedimenti in superficie, gli spostamenti in chiave di calotta della galleria e l'estrusione al fronte.

Le subsidenze in superficie risentono del passaggio del fronte di scavo a più di 60m circa prima e dopo la sezione di riferimento.

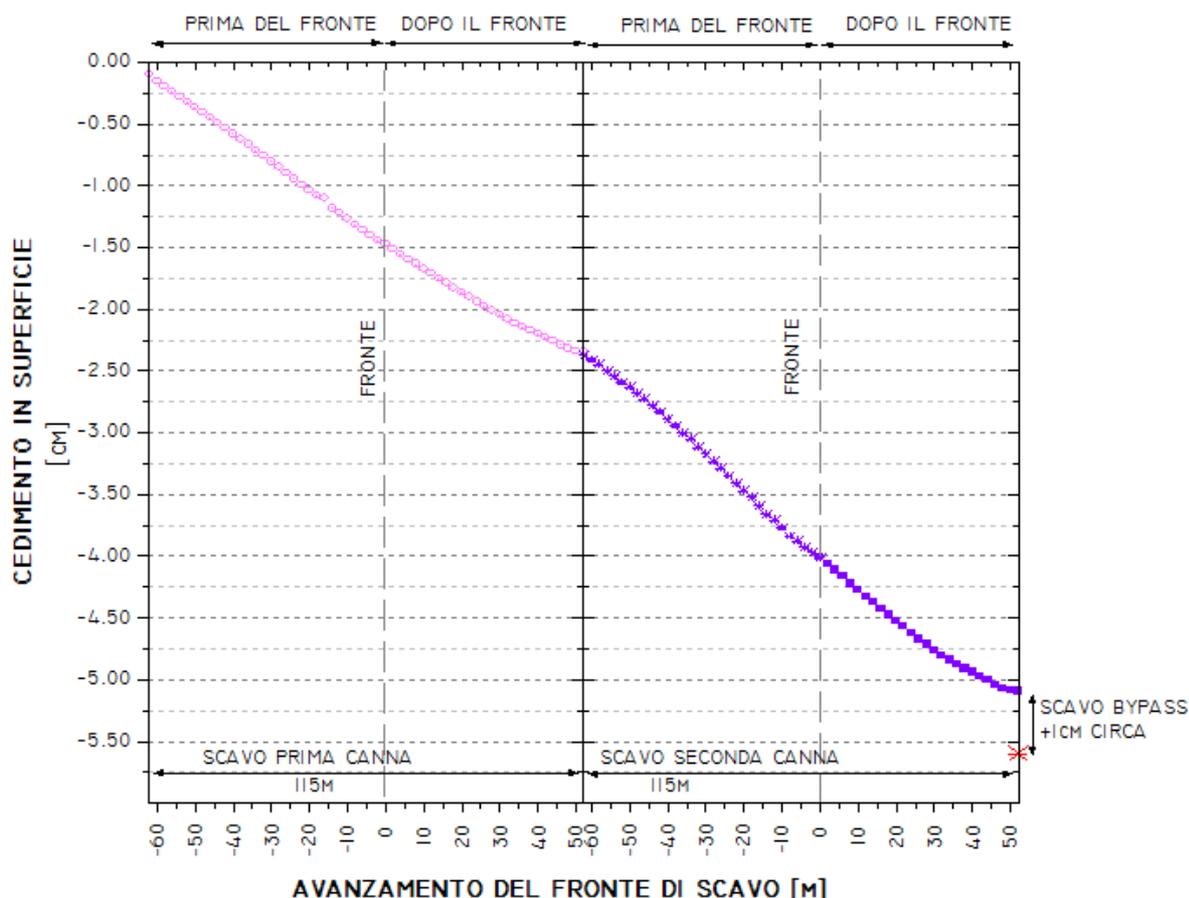


Figura 4.8: cedimenti in superficie all'avanzare del fronte di scavo (nodo A)

Nel grafico sopra riportato si evidenzia anche l'incremento dei cedimenti in superficie dovuti allo scavo del by-pass corrispondente a circa 1cm.

Nella figura seguente si confrontano le subsidenze di calcolo, in fase di realizzazione della galleria, con alcuni valori di subsidenza ottenuti dal monitoraggio in superficie. Si osserva che i cedimenti attesi, ottenuti variando i parametri di deformabilità dei materiali interessati dallo scavo, sono confrontabili con i valori registrati.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 45 di 88

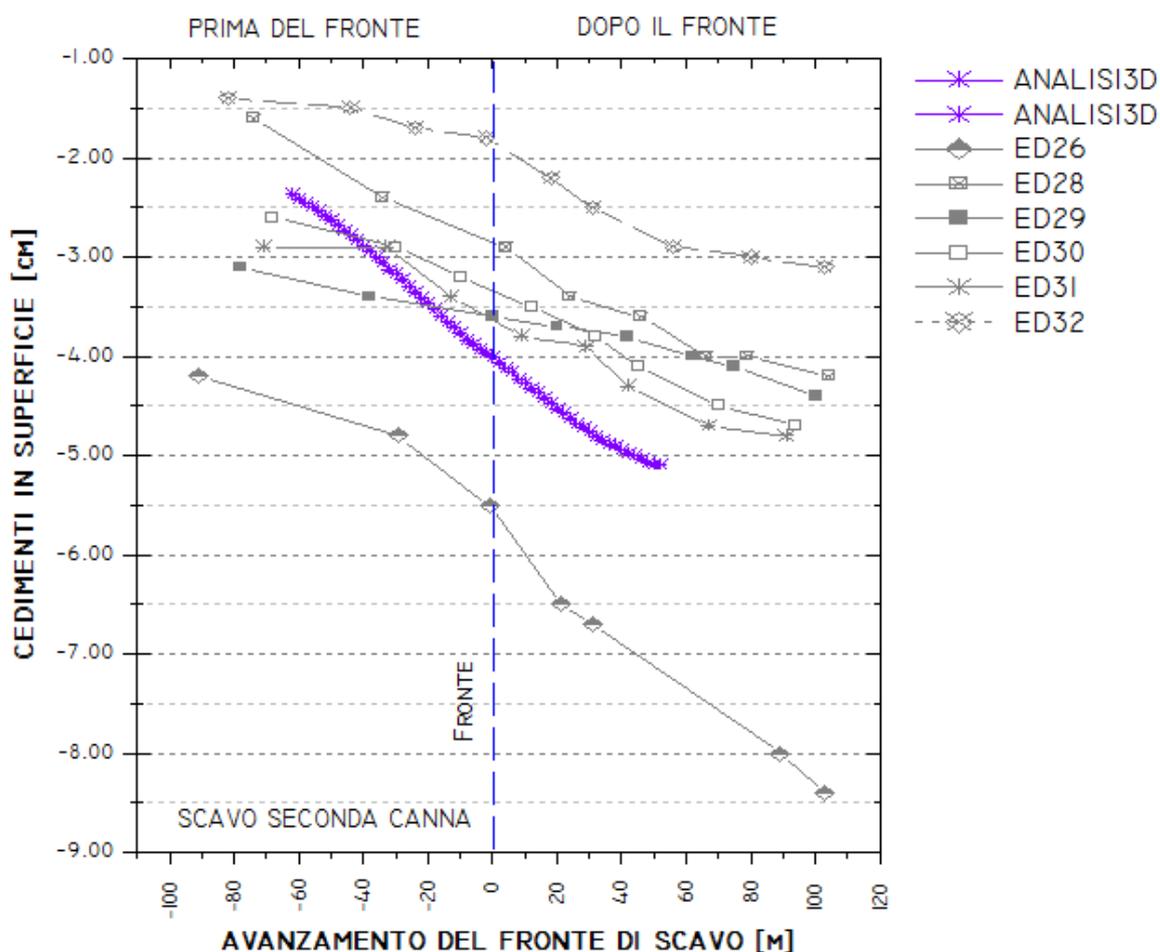


Figura 4.9: cedimenti in superficie all'avanzare del frontedi scavo della canna dx (nodo A)

Nella figura seguente si riportano gli spostamenti verticali in chiave di calotta all'avanzare dello scavo della canna dx.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 46 di 88

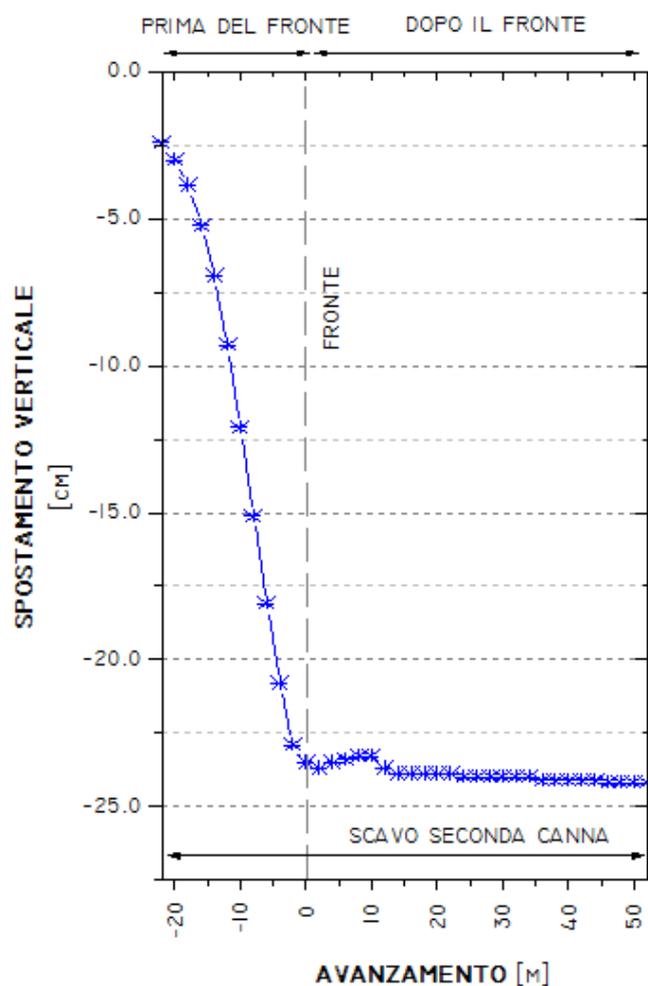


Figura 4.10: cedimenti in chiave di calotta all'avanzare del fronte di scavo della canna dx (nodo B)

Nella figura seguente si riportano i valori di estrusione del fronte all'avanzare dello scavo della canna dx. Il confronto tra i valori ottenuti dall'analisi numerica ed i valori registrati dall'inclinometro 649 evidenzia una buona approssimazione della simulazione di calcolo rispetto alla effettiva risposta del materiale scavato.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 47 di 88

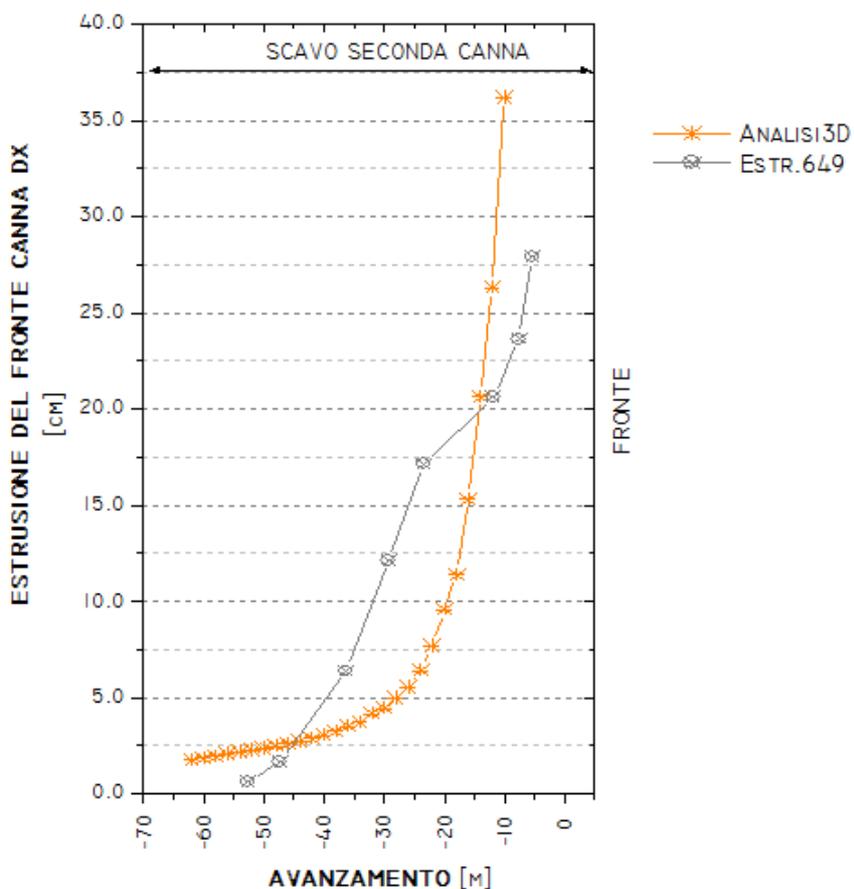


Figura 4.11: estrusione del fronte all'avanzare dello scavo della canna dx

Nelle figure seguenti si riporta la distribuzione degli spostamenti indotti in superficie durante lo scavo del bypass.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 48 di 88

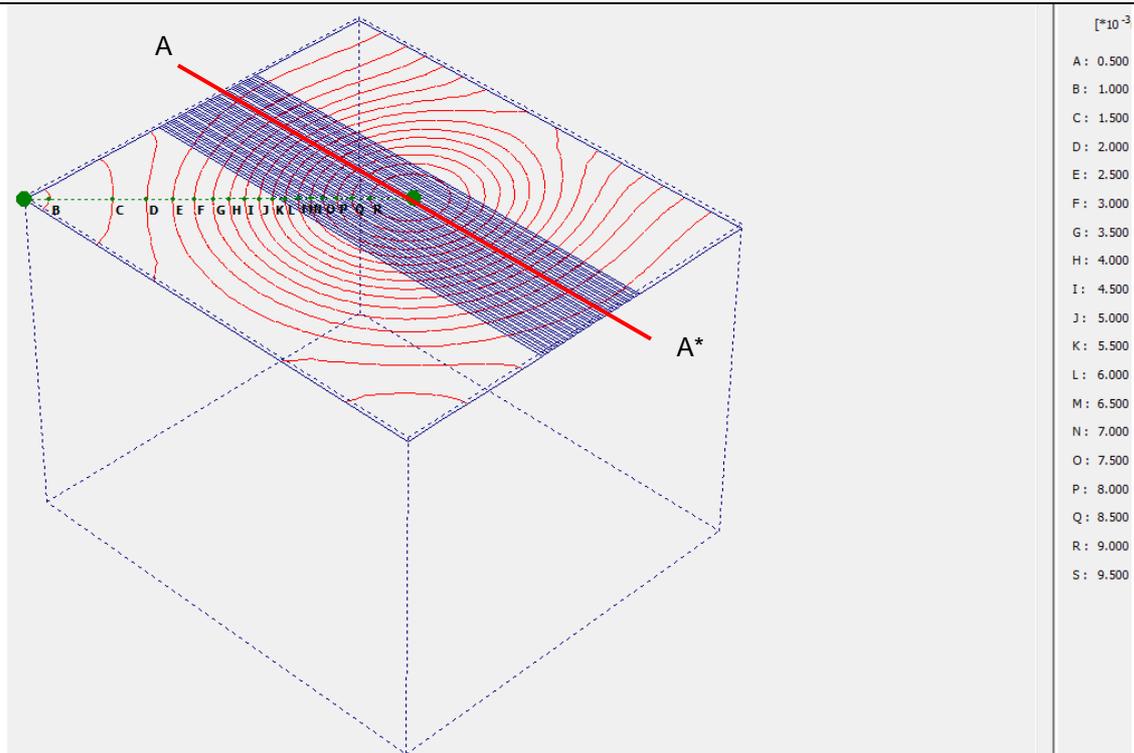
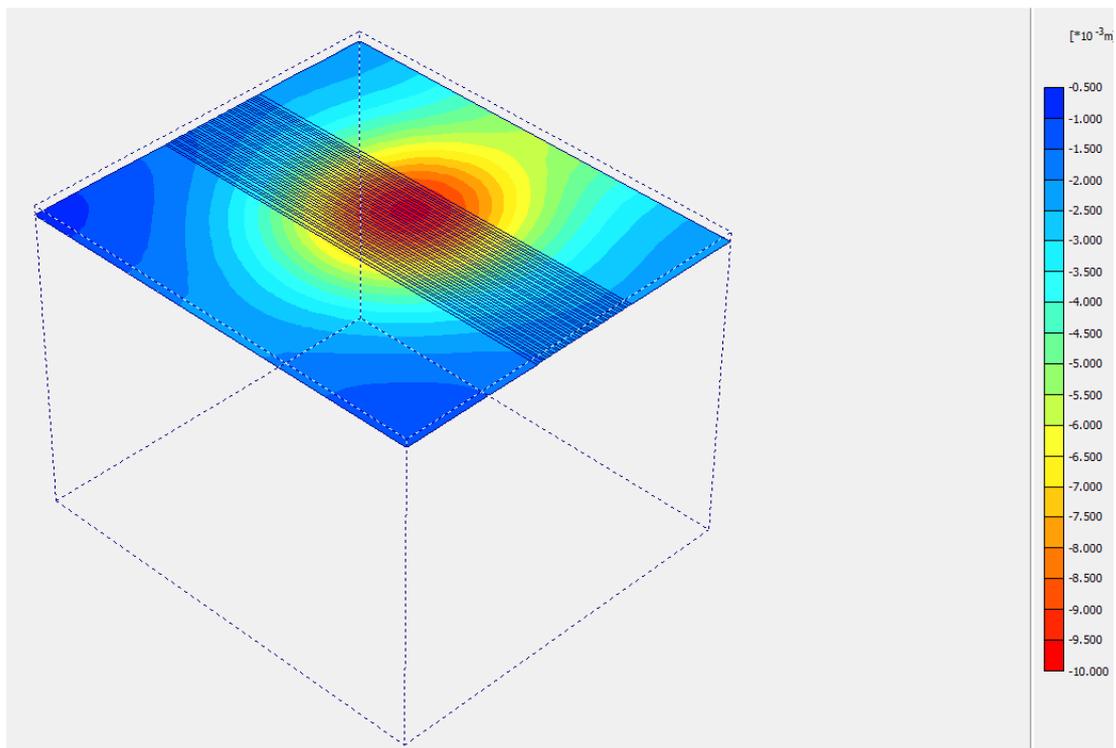
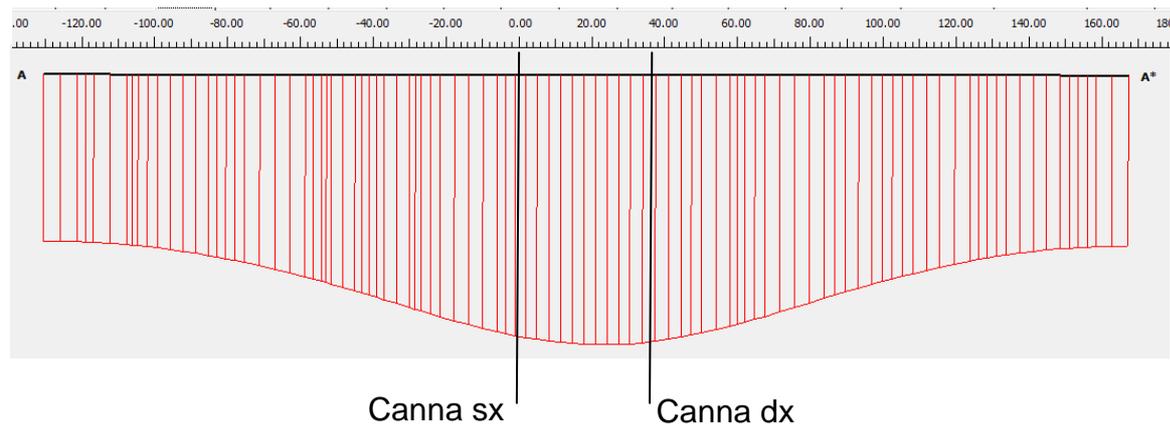


Figura 4.12: subsidenze in superficie dovute allo scavo del bypass carrabile

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 49 di 88

Nelle figure seguenti si confronta, in sezione posta in asse al bypass, l'andamento delle subsidenze dovute allo scavo della galleria e allo scavo del bypass (valore incrementale).

Sezione A-A\* Subsidenza al termine dello scavo delle gallerie (fronte più di  $3\phi$  dalla sezione di scavo): max 5cm



Sezione A-A\* Subsidenza dovuta allo scavo del bypass: max 1cm

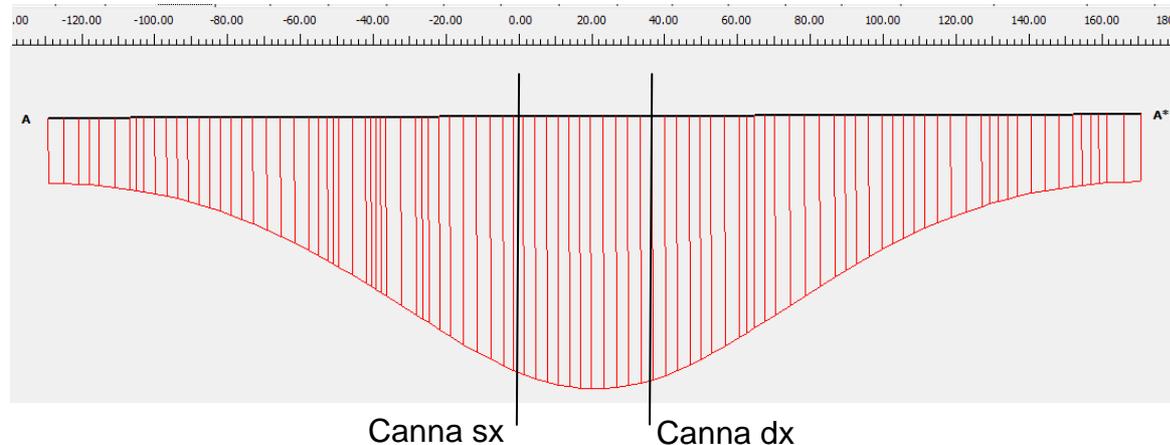


Figura 4.13: subsidenze in superficie

Nella figura seguente si riporta la distribuzione degli spostamenti dovuti allo scavo del bypass alla quota della calotta della galleria.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 50 di 88

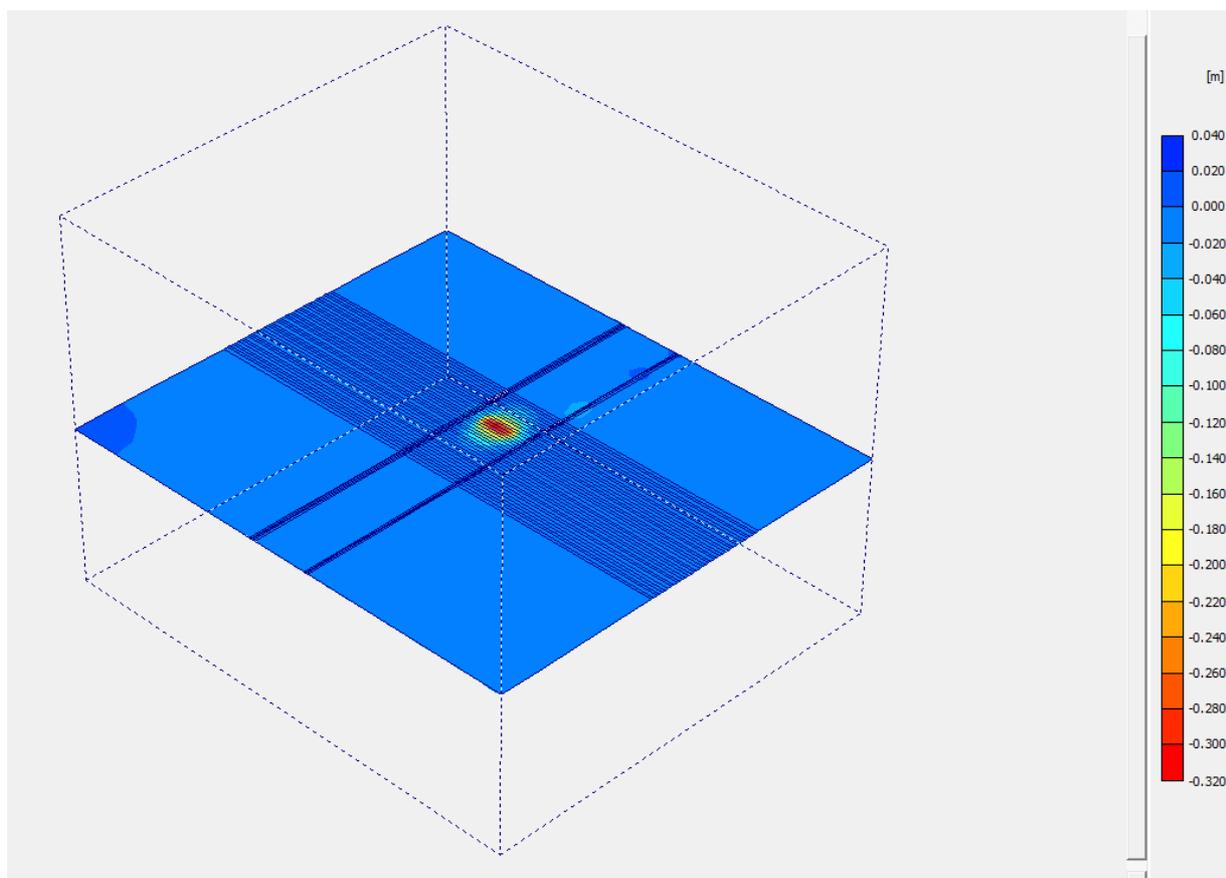


Figura 4.14: spostamenti verticali a quota calotta galleria dovute allo scavo del bypass carrabile a quota calotta galleria

Nelle figure seguenti si riportano gli spostamenti verticali dovuti allo scavo del bypass nelle sezioni in asse alle due canne della galleria. Lo scavo inizia dalla canna sinistra e procede verso la canna destra pertanto in corrispondenza della canna sinistra si registrano i massi spostamenti a causa della sovrapposizione degli effetti dovuti ai successivi step di scavo.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 51 di 88

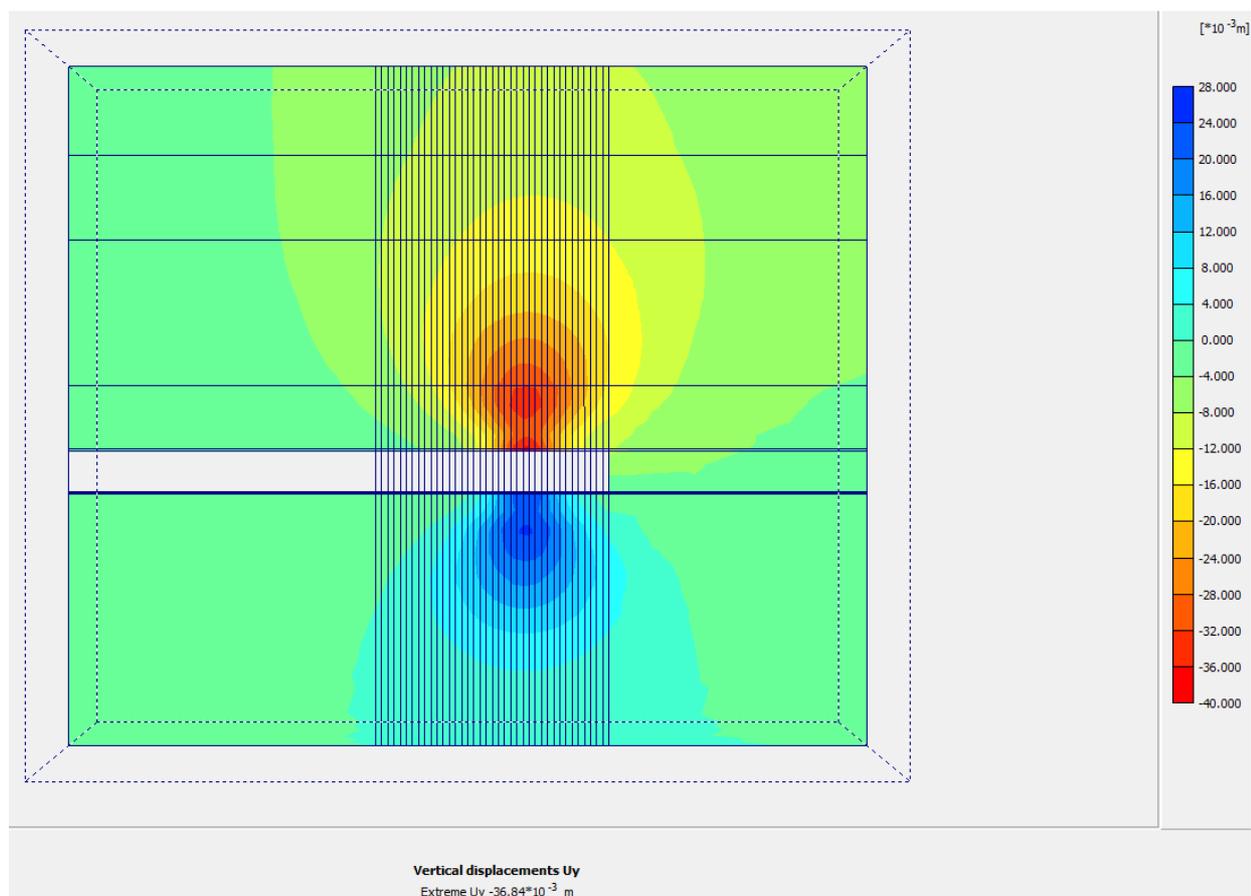


Figura 4.15: spostamenti verticali dovuti allo scavo del bypass carrabile in asse canna sx

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 52 di 88

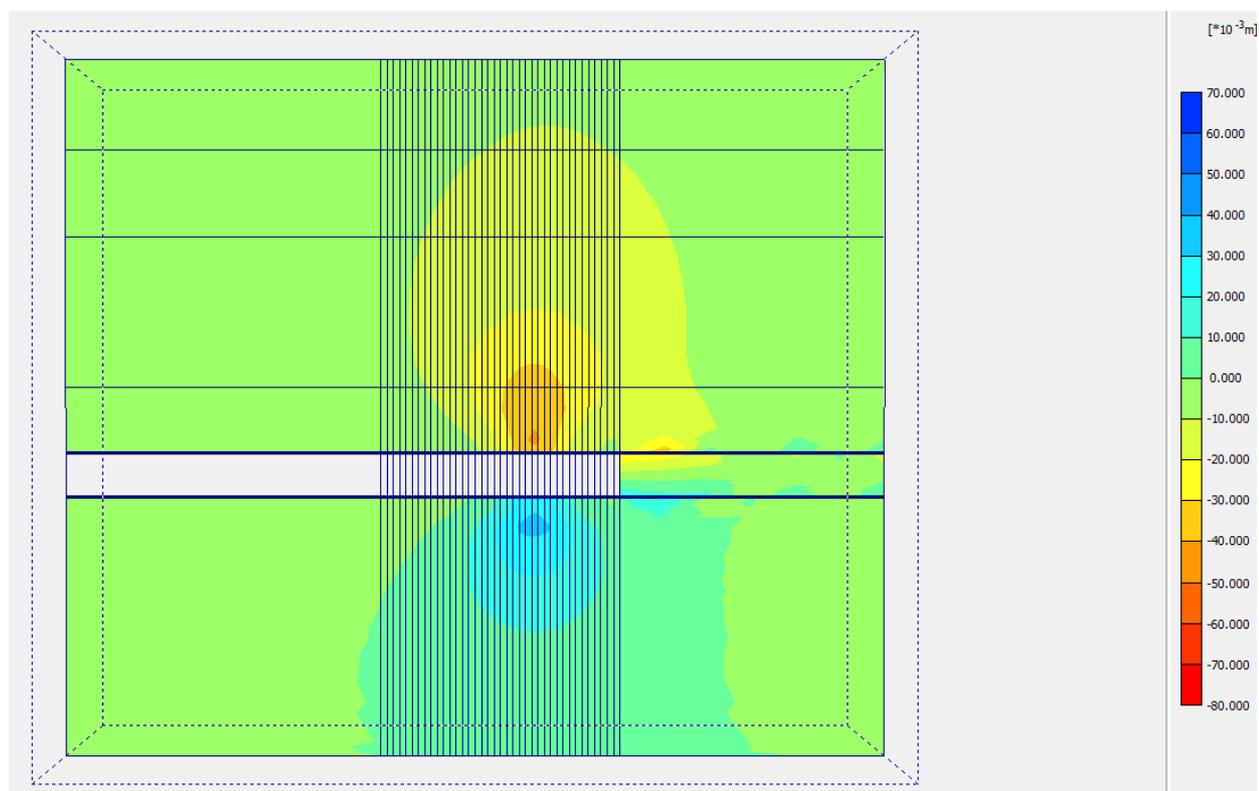


Figura 4.16: spostamenti verticali dovuti allo scavo del bypass carrabile in asse canna dx

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 53 di 88

### 4.3 Osservazioni

La prima fase delle analisi sopra riportate ha riguardato, mediante analisi a ritroso, la definizione dei parametri di deformabilità dell'ammasso roccioso che consentono di ottenere una risposta in termini di subsidenze compatibile con i valori registrati in sito. Gli spostamenti reali sono stati ottenuti riducendo i valori dei moduli elastici dei materiali interessati dallo scavo rispetto ai valori di progetto, così come indicato nella tabella seguente.

Tabella 4.3: confronto tra i parametri di deformabilità dell'ammasso roccioso impiegati nell'analisi a ritroso e nel progetto

Unità geotecnica	E [MPa]	E progetto [MPa]
Sabbie di Lanari (SLN)	30	100
Argille marnose di Geracello (GER)	70	100
Trubi pliocenici (TRB) indisturbati ed ad alta copertura	70	240
Argille brecciate plioceniche (TRVb) indisturbate	80	130

Come si evince dalla tabella sopra riportata i moduli elastici compatibili con la effettiva risposta dell'ammasso roccioso non rientrano negli intervalli di valori definiti nel progetto.

La seconda fase delle analisi è stata finalizzata alla previsione delle subsidenze in superficie che si manifestano a seguito dello scavo del bypass, considerando i parametri dell'ammasso ottenuti dalla back-analysis.

I risultati hanno indicato incrementi delle subsidenze in superficie di circa 1cm. E' dunque evidente che la sovrapposizione dello scavo del bypass con le aree che hanno già manifestato una criticità deformativa in fase di scavo della galleria non è compatibile.

Nelle figure seguenti si confrontano i grafici di Burland con le impronte degli edifici prima e dopo lo scavo del bypass per gli edifici ritenuti più critici (edificio 26, e da 37 a 53). Dall'analisi dei risultati emerge che gli edifici che si trovano in condizioni di criticità dopo lo scavo della galleria peggiorano la loro condizione e, in alcuni casi, passano alla categoria di danno più gravosa. Questa considerazione risulta particolarmente chiara osservando il grafico sottostante.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 54 di 88

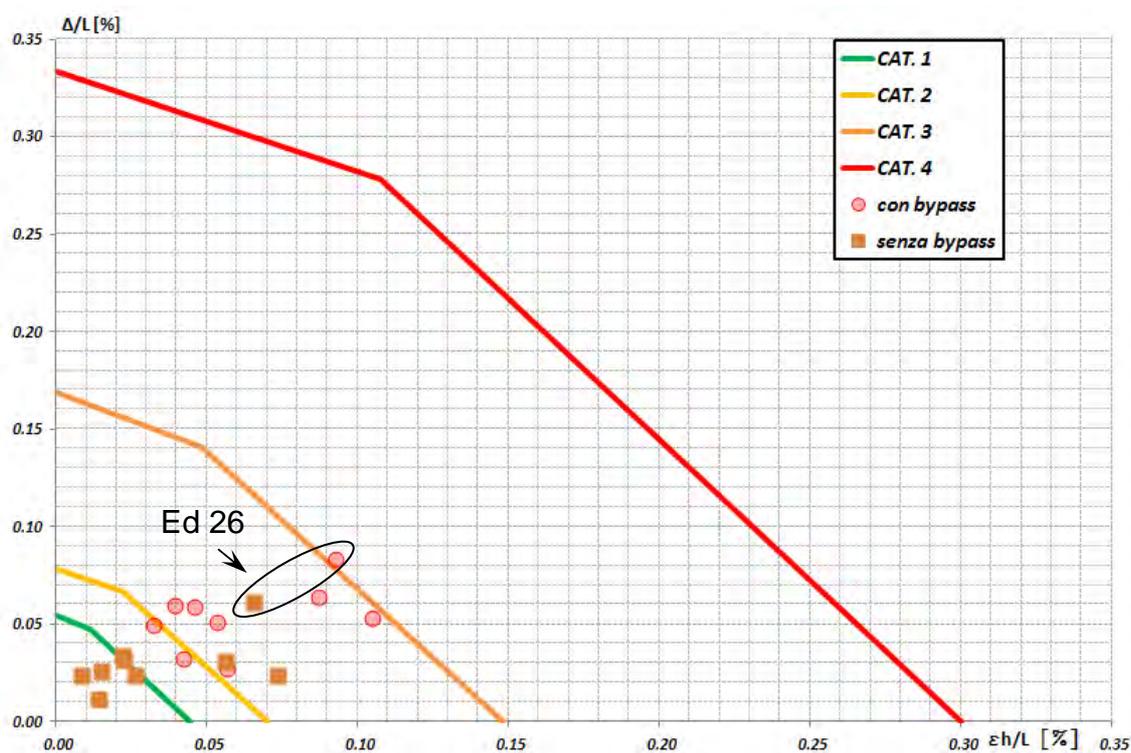


Figura 4.17: grafico di Burland con la dispersione delle impronte degli edifici ubicati nelle aree sensibilmente critiche a seguito dello scavo delle due canne della galleria e del successivo scavo del bypass

Di seguito si riportano invece le classi di danno che si ottengono per i gruppi di edifici prossimi ai bypass (con la posizione di PVT), considerando chiaramente la presenza del bypass ed una area di influenza avente un raggio di 150m. Le pk indicate si riferiscono alla canna DX.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 55 di 88

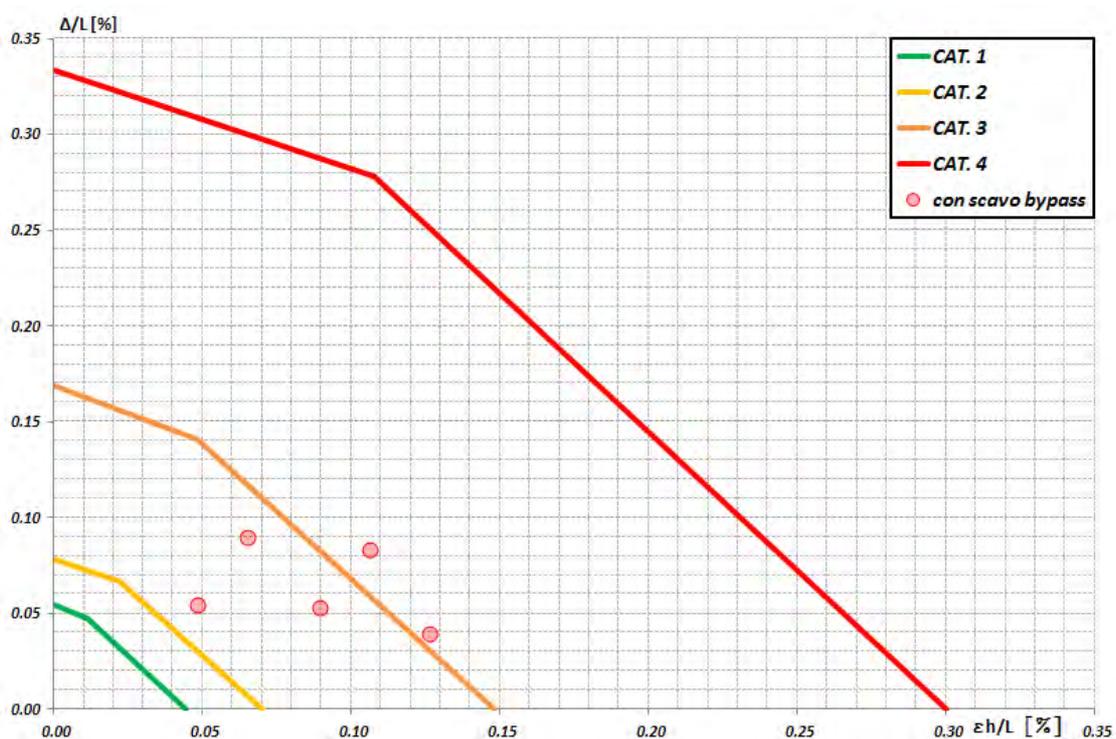


Figura 4.18: grafico di Burland per il bypass a pk 13+501.33 (edifici 15,16,17,18,19)

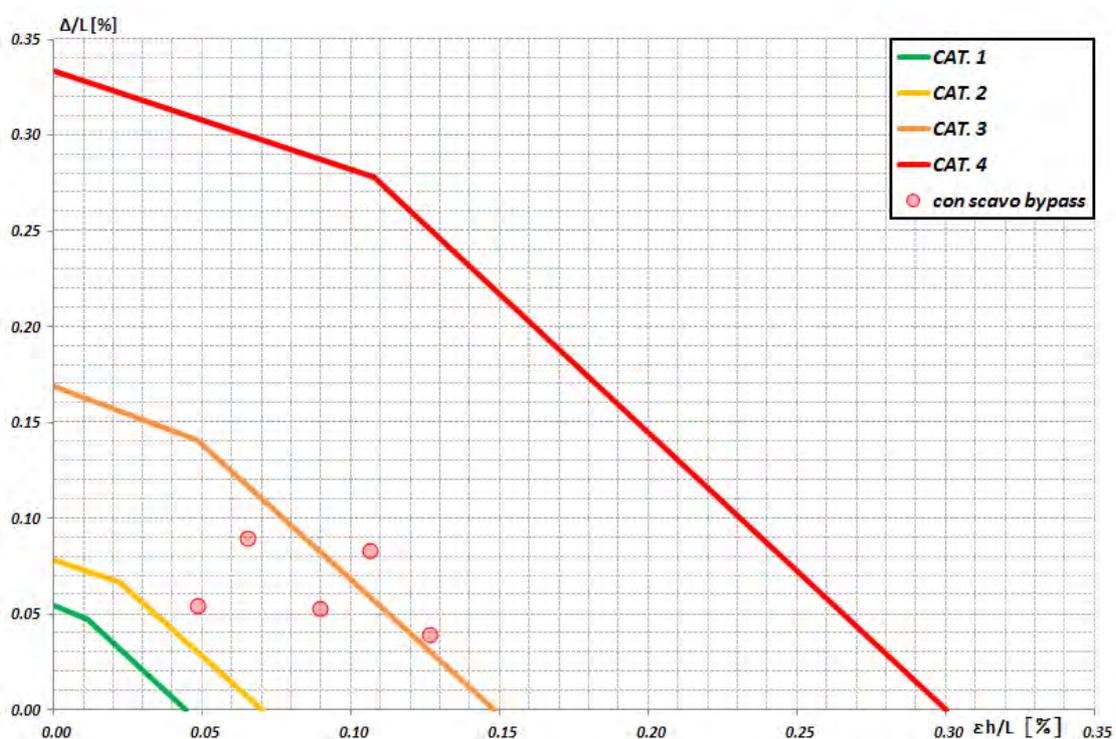


Figura 4.19: grafico di Burland per il bypass a pk 13+795.56 (edifici 20,21,22,23)

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 56 di 88

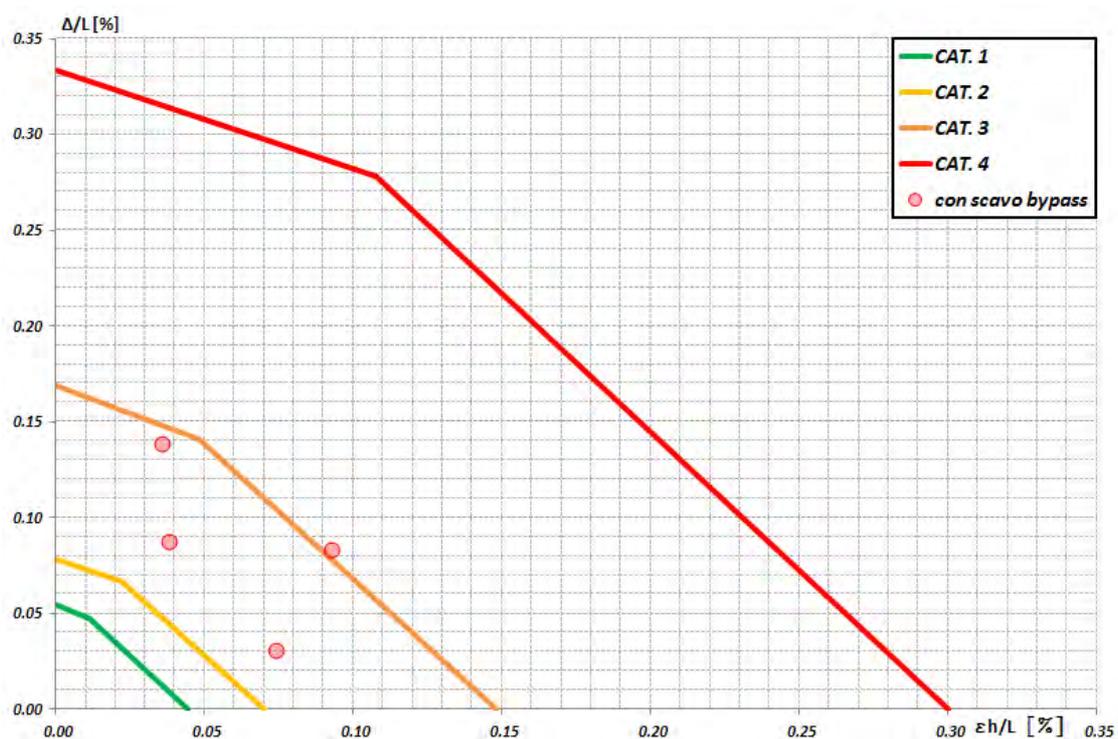


Figura 4.20: grafico di Burland per il bypass a pk 14+086.56 (edifici 26,28,29,30)

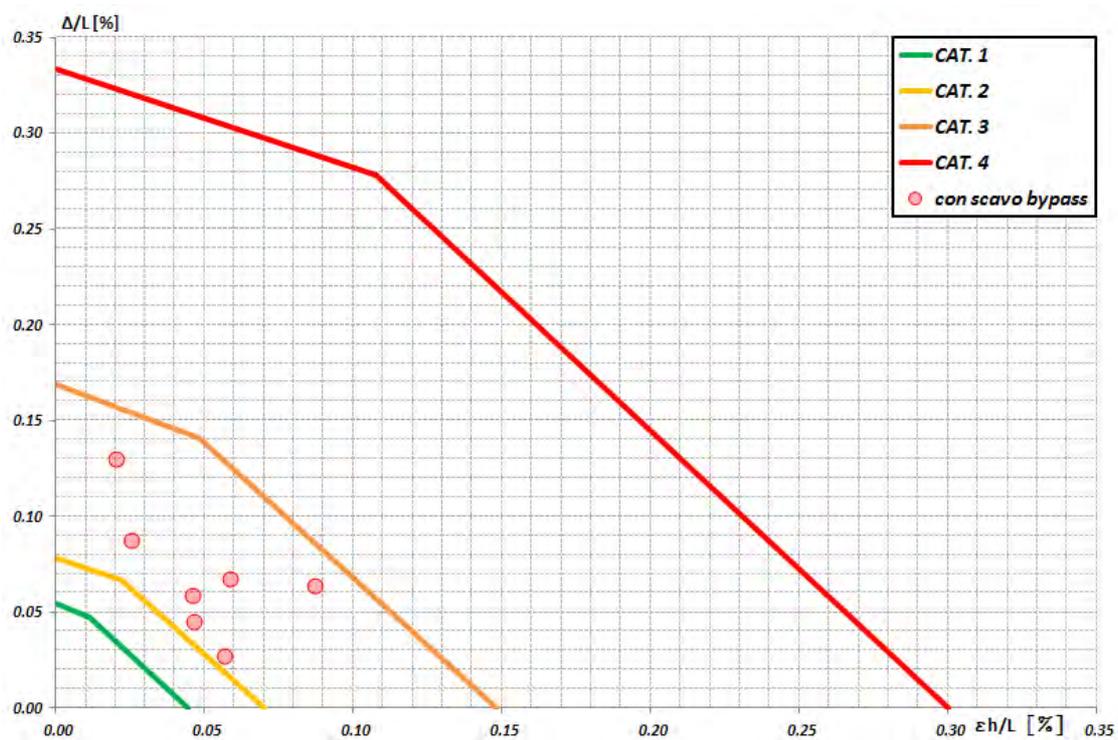


Figura 4.21: grafico di Burland per il bypass a pk 14+381.09 (edifici 31,32,34,35,37,38,39)

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 57 di 88

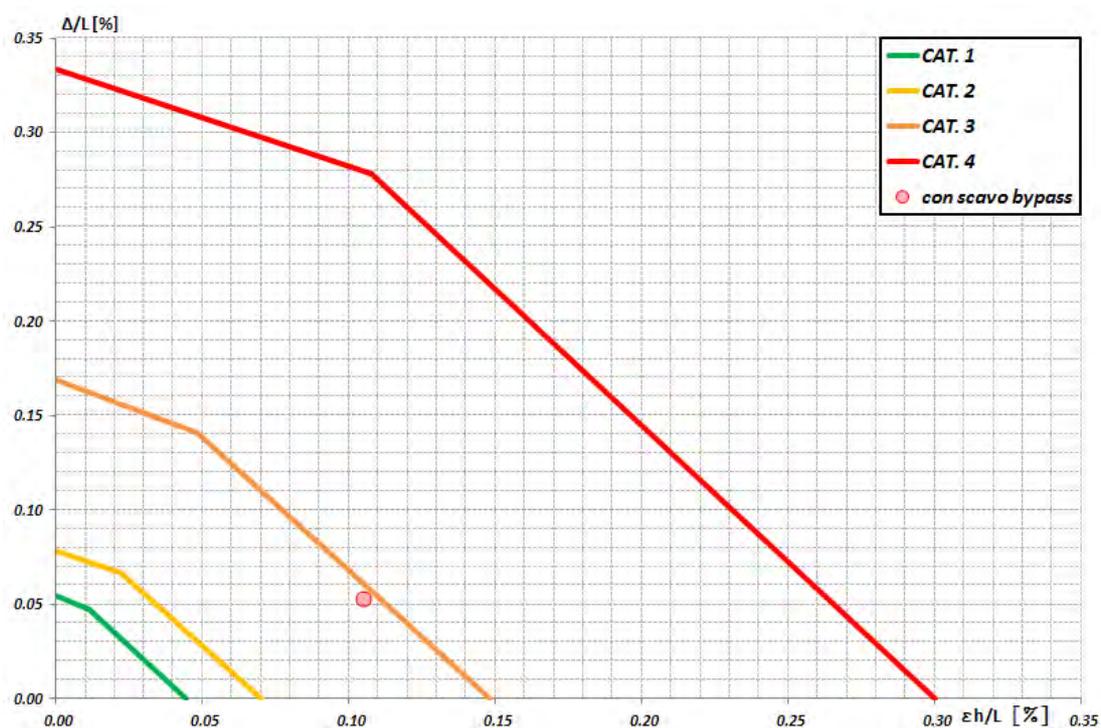


Figura 4.22: grafico di Burland per il bypass a pk 14+681.09 (edificio 40)

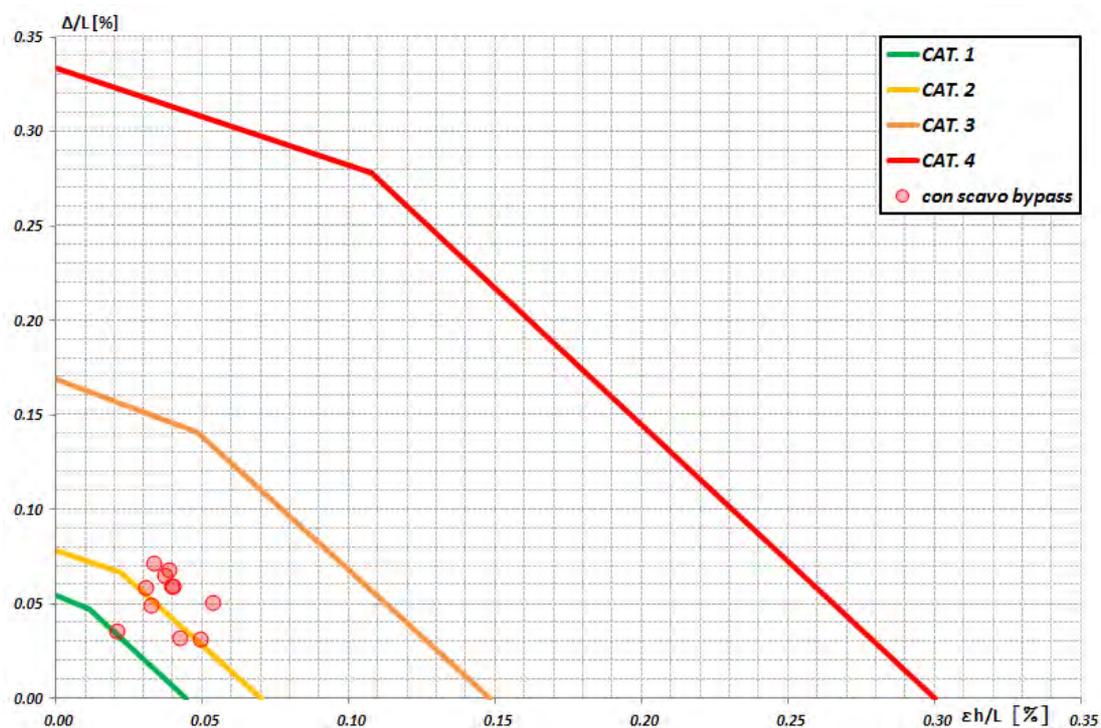


Figura 4.23: grafico di Burland per il bypass a pk 14+981.09 (edifici 50,51,52,53,54,55,56,57,59,62,65)

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 58 di 88

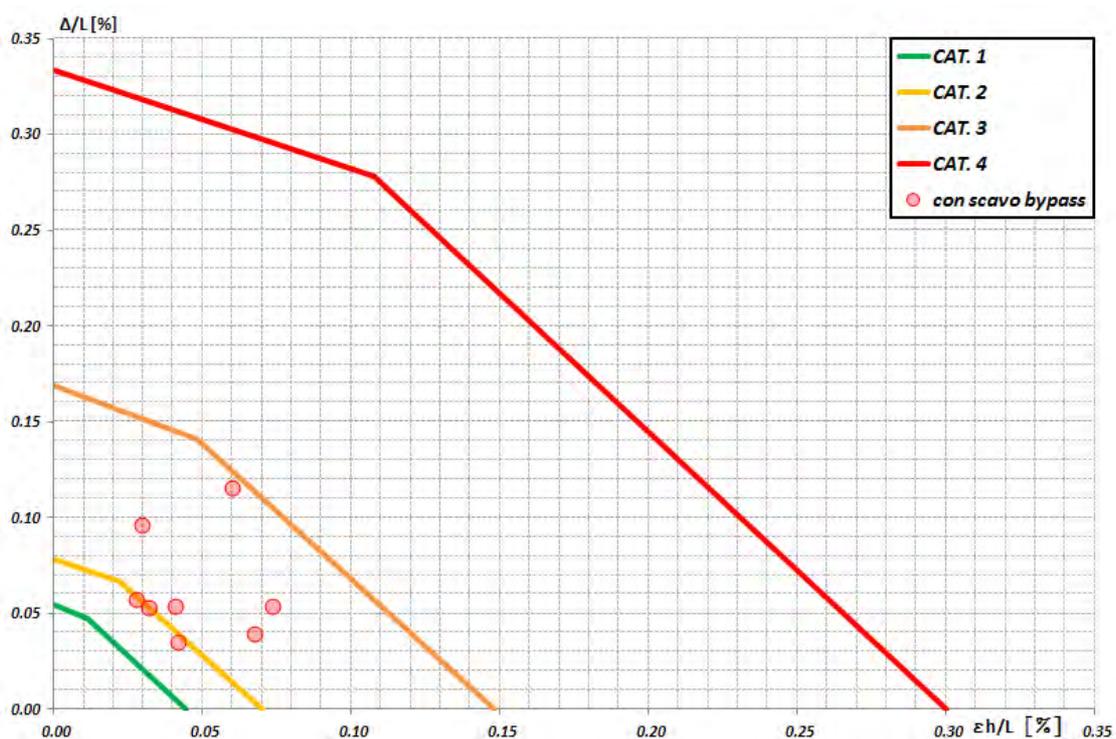


Figura 4.24: grafico di Burland per il bypass a pk 15+281.09 (edifici 66,68,69,70,71,72,73,75)

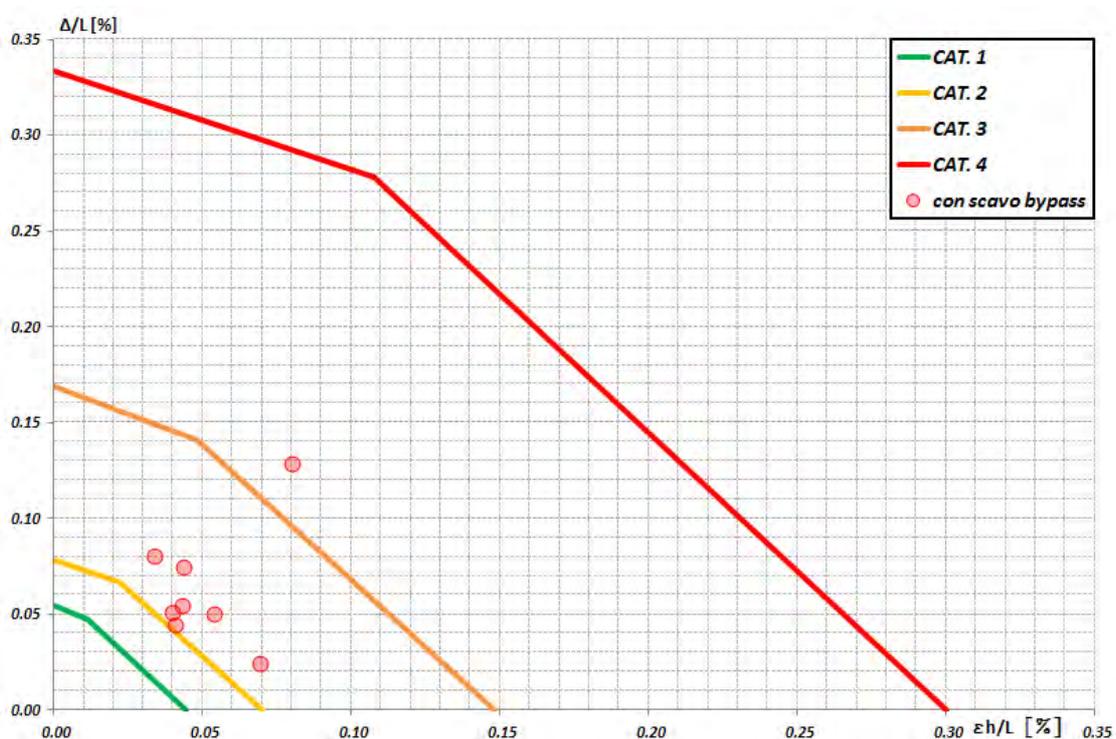


Figura 4.25: grafico di Burland per il bypass a pk 15+281.09 (edifici 79,80,82,84,86,87,88,89)

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 59 di 88

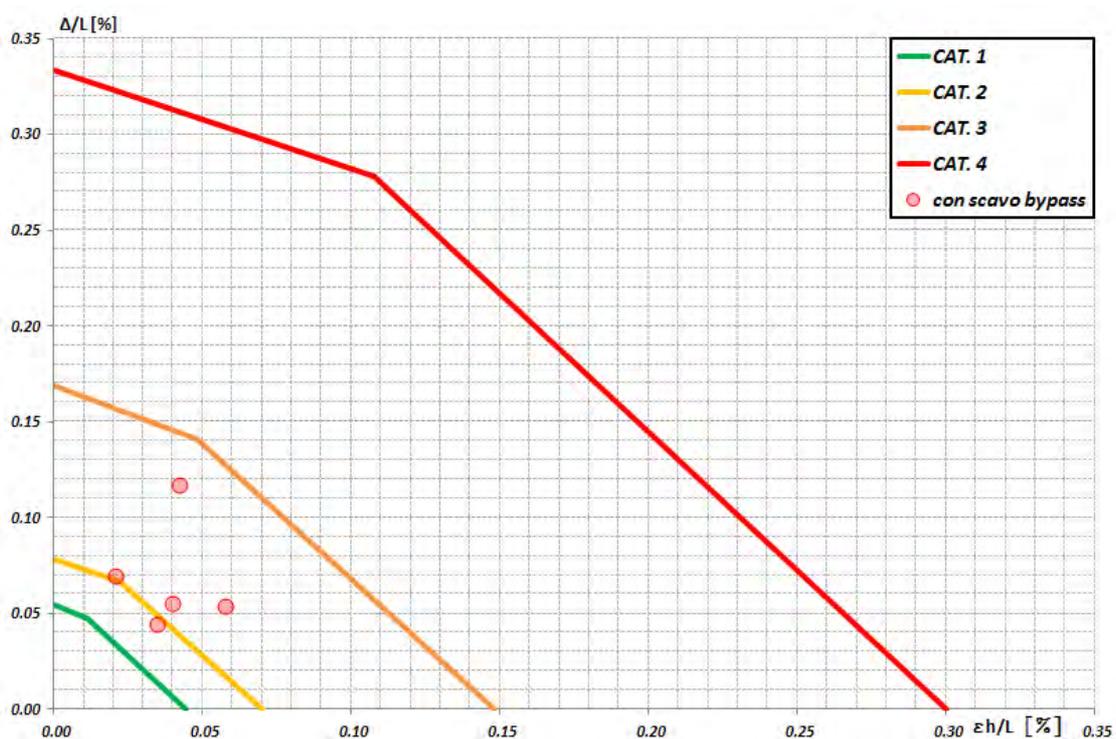


Figura 4.26: grafico di Burland per il bypass a pk 15+881.09 (edifici 91,92,93,94,95)

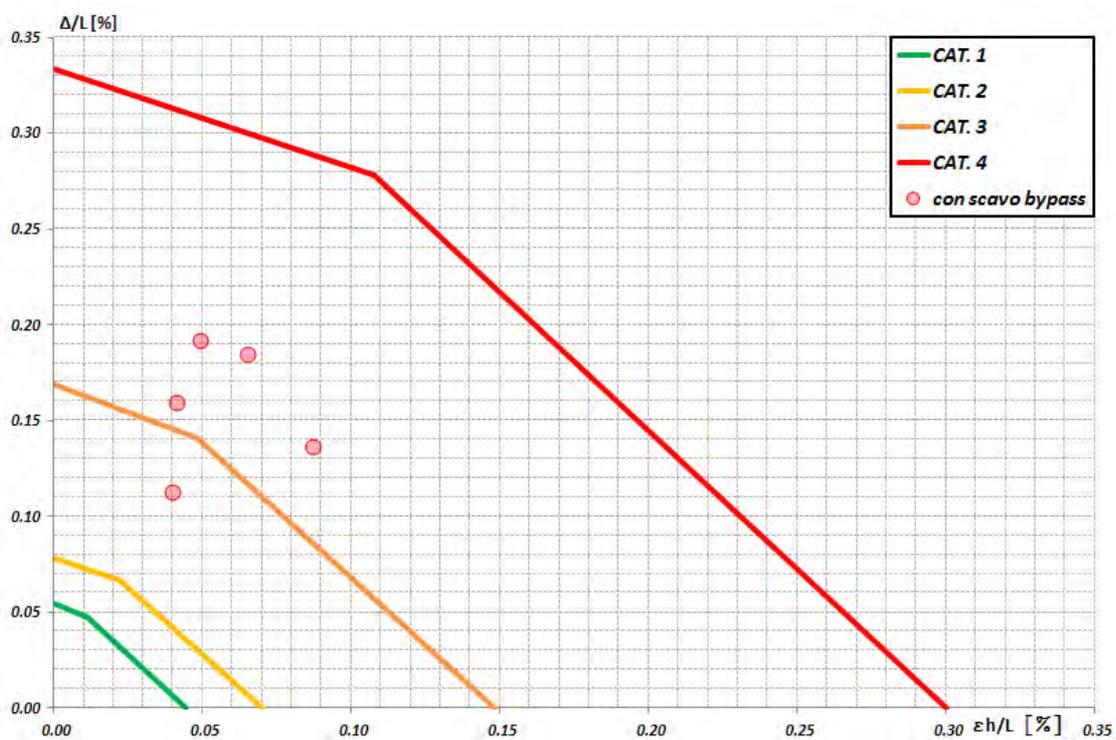


Figura 4.27: grafico di Burland per il bypass a pk 16+181.09 (edifici 96,97,99,100,101)

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 60 di 88

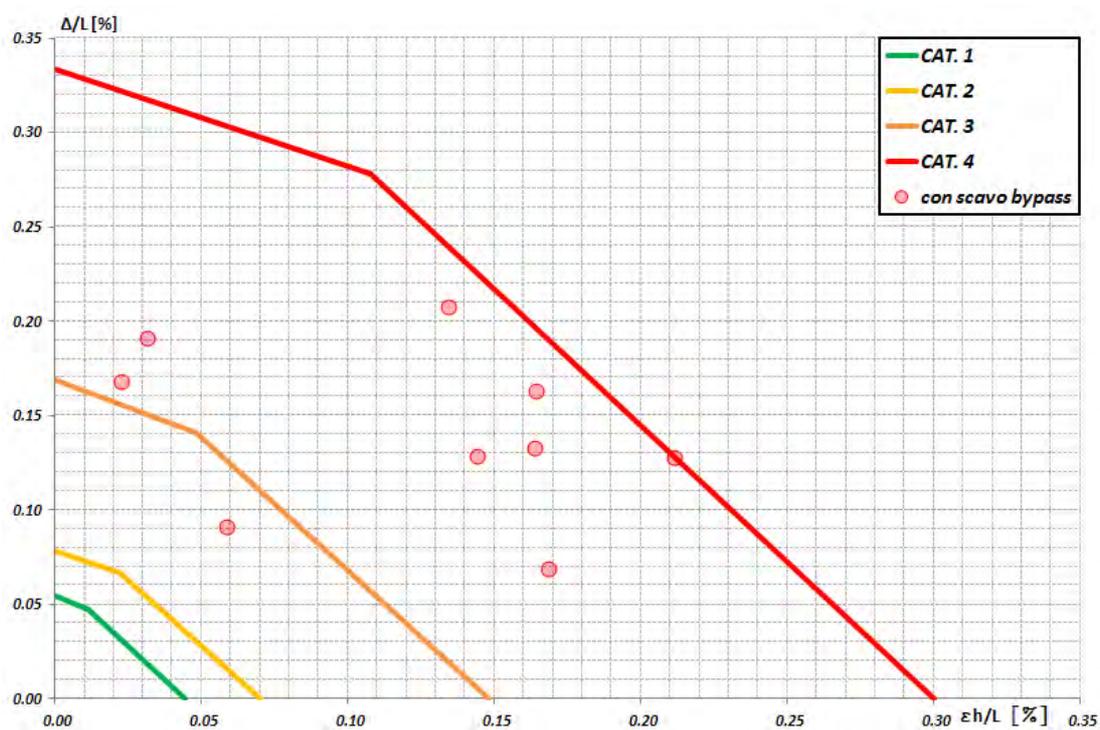


Figura 4.28: grafico di Burland per il bypass a pk 16+481.09 (edifici 102,103,104,104B,106,107,108,109,111)

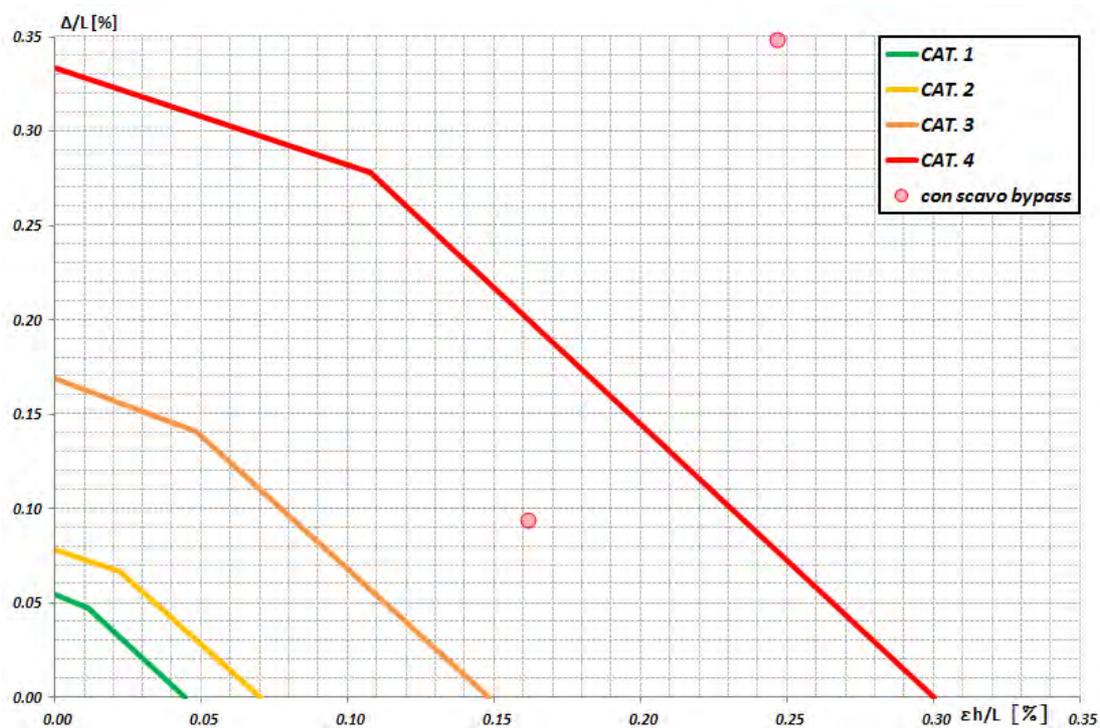


Figura 4.29: grafico di Burland per il bypass a pk 16+781.09 (edifici 112,113)

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 61 di 88

Dai grafici precedenti, valutati a partire dal cedimento calcolato in presenza dei bypass, si osserva che le classi di danno sono elevate, con alcuni edifici che si posizionano addirittura in categoria 4/5 (danni elevati con conseguenti importanti lavori di riparazione). Considerando che, in fase di PVT, i valori attesi sono stati superati dai valori effettivamente misurati in sito, è possibile che tale riscontro si verifichi anche con lo scavo dei bypass (in particolare nelle zone più critiche) con ulteriore aggravio degli effetti deformativi sugli edifici esistenti.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 62 di 88

## 5. CONCLUSIONI

Nei precedenti capitoli si riporta una sintesi dei dati di monitoraggio rilevati durante lo scavo; in particolare si evidenziano gli alti cedimenti in superficie caratterizzati da una alta variabilità del volume perso lungo il tracciato, del tutto non associabile alle modalità di avanzamento. Si evidenzia un comportamento deformativo del terreno durante lo scavo caratterizzato da una influenza che si estende ad una distanza di 5 diametri a tergo del fronte.

Questi riscontri sono del tutto imprevisi a livello di comportamento. Solo sulla base dei dati raccolti post scavo, per una sezione specifica, si è tentato tramite un modello numerico tridimensionale di simulare quanto è stato riscontrato.

Solo adottando parametri molto più scadenti è stato possibile simulare il comportamento osservato. In questo contesto si dovrà sottolineare che ci sono, lungo il profilo, sezioni che hanno avuto dei cedimenti ancora più elevati e questo introduce delle incertezze sulla possibilità di modellizzare e quindi prevedere le conseguenze dello scavo dei bypass.

Per questi motivi, nei capitoli successivi, sono state definite delle zone critiche, corrispondenti a tutte quelle tratte in cui si hanno avuto valori di cedimenti che superano quelli attesi da modello. In queste zone sarà indispensabile evitare di localizzare i bypass per evitare una ulteriore perturbazione dello stato deformativo raggiunto.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 63 di 88

## 6. IL PROGETTO DEI BY PASS DELLA GN CALTANISSETTA DI PVT

Gli attraversamenti tra due canne di una galleria naturale, come nel caso della GN Caltanissetta, costituiscono la misura di sicurezza predisposta per consentire l'esodo degli utenti e dei mezzi in caso di soccorso/emergenza e/o per lavorazioni straordinarie da effettuare all'interno della galleria.

Coerentemente con la normativa DM 5.11.2001 "Norme geometriche e funzionali per la costruzione delle strade" (cap.§ 4.1.2), il progetto di variante della galleria Caltanissetta prevede la disposizione dei collegamenti trasversali tra le due canne, con interasse pari a 300m per i by pass pedonali e interasse 900m per quelli carrabili.

In funzione di tali distanze, complessivamente il progetto prevede quindi la realizzazione di n°9 attraversamenti pedonali del diaframma di terre no tra le canne e n°4 attraversamenti carrabili.

Tabella 6-1: Progressive di ubicazione di progetto di variante dei by pass pedonali (B.P.P) e carrabili (B.P.C.)

BY PASS PEDONALI B.P.P.		BY PASS PEDONALI B.P.P.	
1 B.P.P.	13+202	1 B.P.C.	13+795
2 B.P.P.	13+501	2 B.P.C.	14+681
3 B.P.P.	14+084	3 B.P.C.	15+581
4 B.P.P.	14+381	4 B.P.C.	16+481
5 B.P.P.	14+981		
6 B.P.P.	15+281		
7 B.P.P.	15+881		
8 B.P.P.	16+181		
9 B.P.P.	16+781		

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 64 di 88

VARIANTE TECNICA N.4

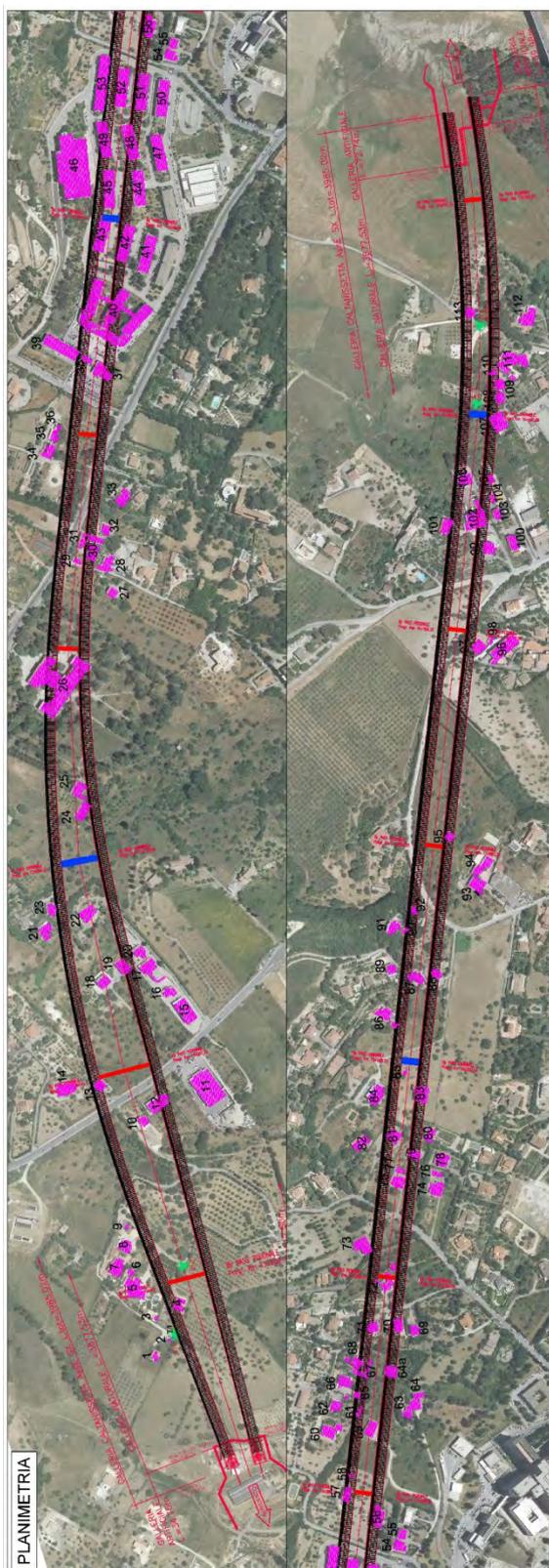


Figura 6.1: planimetria con ubicazione bypass di PVT

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 65 di 88

Il PVT prevede che i by-pass vengano realizzati con metodo di scavo tradizionale previo consolidamento del fronte e del contorno di scavo. Le fasi esecutive principali, per entrambe le tipologie di by-pass, sono le seguenti:

- ancoraggio dei conci adiacenti alla zona di innesto ove deve essere asportato il rivestimento esistente;
- esecuzione del consolidamento al fronte;
- esecuzione del consolidamento al contorno;
- scavo di avanzamento;
- collocazione dei sostegni di prima fase;
- getto di arco rovescio e murette;
- posa dell'impermeabilizzazione;
- getto del rivestimento definitivo.

L'ancoraggio dei conci verrà realizzato mediante elementi tubolari auto perforanti  $\varnothing 76\text{mm}$  e spessore di 6mm cementati in foro con miscele cementizie.

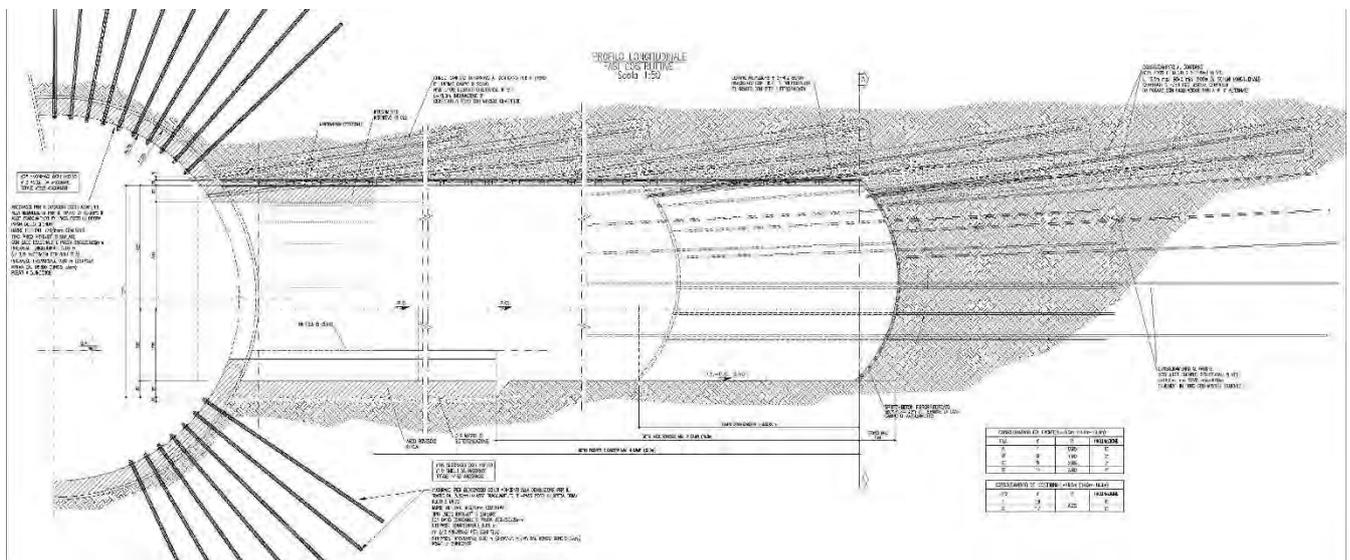


Figura 6.2: profilo costruttivo per i by pass di progetto

In particolare per i by-pass carrabili i sostegni di prima fase sono costituiti dai seguenti elementi:

<p>Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A                  Nome file v_3569-00 relazione geotecnica                  giustificativa rev.b</p>	<p>Titolo: Galleria Caltanissetta  <b>Relazione Geotecnica                  giustificativa</b></p>	<p>Data: Febbraio 2019                  Pagina 66 di 88</p>
--	--	---

- consolidamento al fronte mediante n°35±10% elementi strutturali in vetroresina di lunghezza pari a 16.0m e sovrapposizione minima pari a 8.0m, cementati in foro con miscele cementizie;
- consolidamento al contorno mediante n°35±10% elementi strutturali in vetroresina di lunghezza pari a 16.0m e sovrapposizione minima pari a 8.0m, cementati in foro con miscele cementizie, inclinati di 6°-9° alternati;
- centine metalliche e calcestruzzo proiettato rinforzato con fibre in polipropilene ed armato con rete elettrosaldata.

Il rivestimento definitivo dei by-pass carrabili ha uno spessore di 60 cm in calotta e 60cm in arco rovescio.

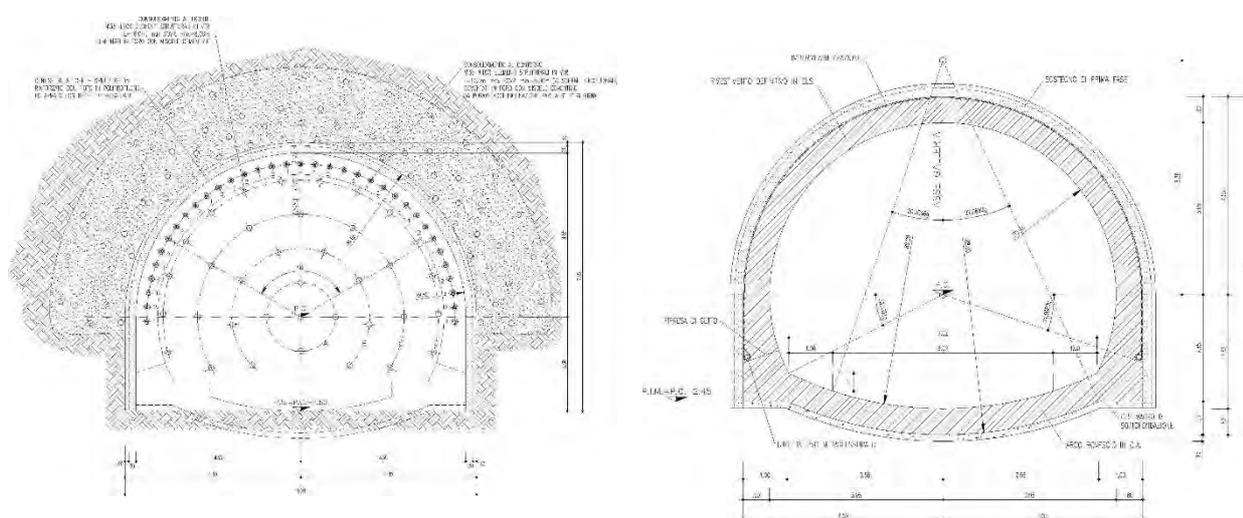


Figura 6.3: sezioni tipo e carpenteria by pass carrabili

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 67 di 88

La sezione dei by-pass pedonali è costituita invece dai seguenti elementi:

- consolidamento al fronte mediante n°17(±10%) elementi strutturali in vetroresina di lunghezza pari a 16.0m e sovrapposizione minima pari a 8.0m cementati in foro con miscele cementizie;
- consolidamento al contorno mediante n°22(±10%) elementi strutturali in vetroresina di lunghezza pari a 16.0m e sovrapposizione minima pari a 8.0m cementati in foro con miscele cementizie;
- centine metalliche HEB160/1m(±20%).

Il rivestimento definitivo dei by-pass pedonali ha uno spessori di 50cm in calotte 60cm in arco rovescio.

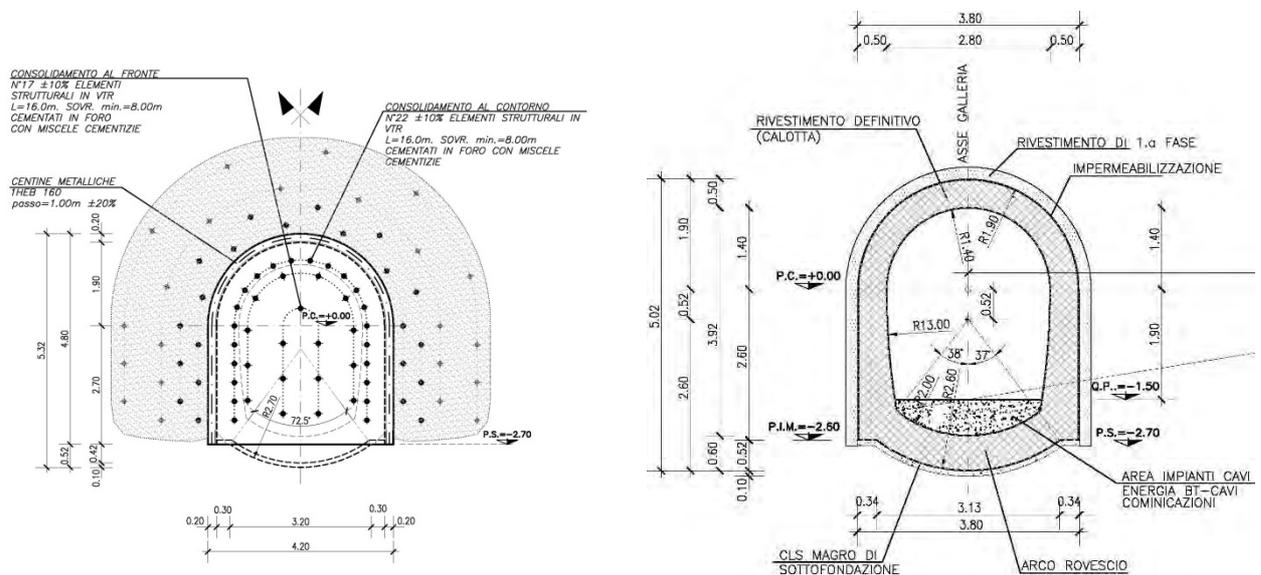


Figura 6.4: sezioni tipo e carpenteria by pass pedonali

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 68 di 88

## 6.1 Contestualizzazione della distribuzione planimetrica dei by pass della GN Caltanissetta

Il contesto tenso-deformativo della galleria naturale Caltanissetta, così come mostrato nei capitoli precedenti, riscontra, successivamente al passaggio del secondo fronte di scavo, il raggiungimento di uno stato di equilibrio sia all'interno del cavo che in superficie.

Il conseguito equilibrio ha però evidenziato l'insorgenza di significative singolarità soprattutto per quanto attiene i cedimenti di superficie.

Risulta quindi opportuno, alla luce dei cedimenti riscontrati e del complesso equilibrio raggiunto, contestualizzare il posizionamento planimetrico dei by pass di progetto, al fine di evidenziare possibili criticità di ubicazione.

Per una corretta analisi, sono state riportate in planimetria le aree di superficie caratterizzate da maggior cedimento/volume perso e laddove, successivamente al passaggio della seconda canna, si è registrato un notevole incremento dei tempi necessari al raggiungimento della stabilizzazione delle deformazioni.

In tal senso sono state definite lungo il tracciato della GN Caltanissetta, n° 7 aree sensibilmente critiche:

- **Area ED#18-23** – contrassegnata da valori elevati di volume perso/cedimento.
- **Area ED#26** – “ex clinicaDubini”, edificio sensibile in quanto struttura ricettiva ASL, contrassegnata da valori di cedimento elevato
- **Area ED#40-45** – compendio immobiliare CEFPASS, struttura ricettiva con riscontrati elevati valori di cedimento.
- **Area ED#68-71** – contrassegnata da valori elevati di volume perso/cedimento.
- **Area ED#80-86** – contrassegnata da valori elevati di volume perso/cedimento.
- **Area ED#107-114** – contrassegnata da valori elevati di volume perso/cedimento
- **Area Pozzi** – presenza di elevati battenti idraulici.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 69 di 88

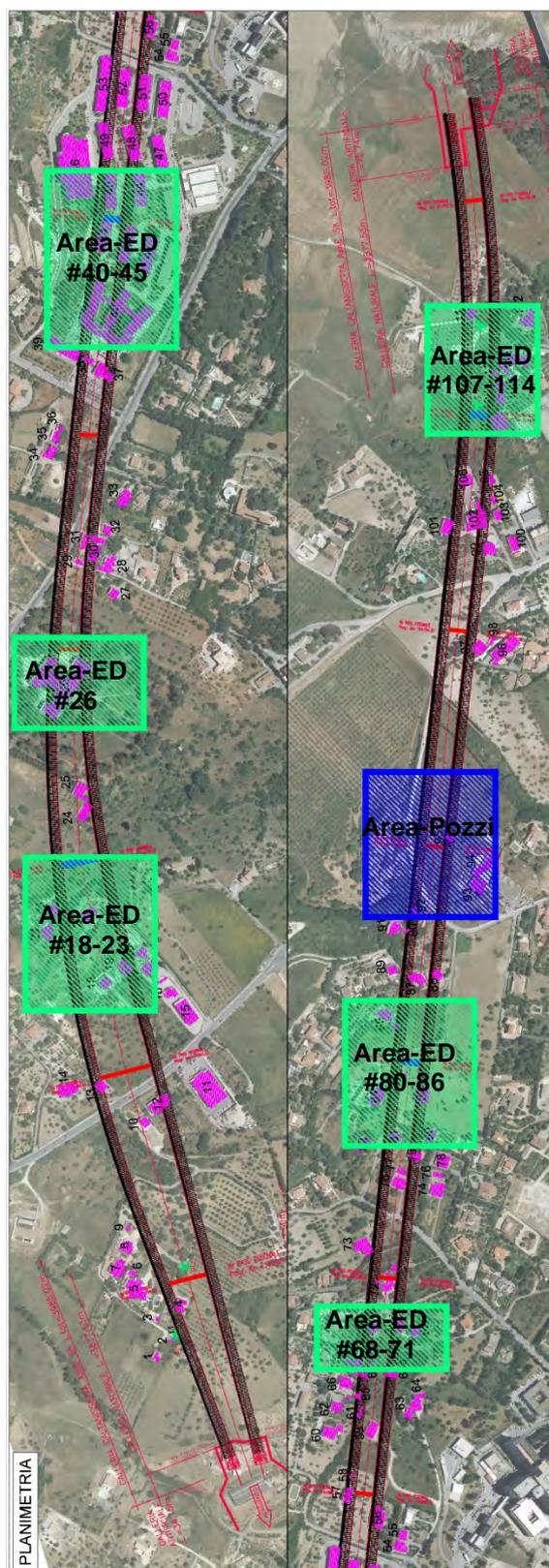


Figura 6.5: planimetria con ubicazione bypass di PVT – zone critiche

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 70 di 88

Dalla planimetria si evince che quasi il 50% degli attraversamenti previsti in progetto di variante, risulterebbero all'interno di zone contrassegnate come critiche.

In particolare il 100% dei by pass carrabili, che presentano quindi la maggiore sezione di scavo da realizzare, ricadrebbero all'interno delle zone critiche.

È evidente dunque, che il posizionamento dei by pass, così come previsto nel progetto di variante, alla luce delle evidenze riscontrate durante il corso d'opera della galleria, presenta importanti sovrapposizioni con le aree definite "critiche". La realizzazione dei by pass in tali aree, comporterebbe una perturbazione locale dell'equilibrio raggiunto, con ripercussioni di difficile previsione sulla superficie e sulle preesistenze, ma che in caso di conferma della tendenza evolutiva riscontrata tra la prima e la seconda canna, porterebbe ad un incremento significativo del cedimento in superficie, al quale si può associare un sempre crescente potenziale danno sugli edifici esistenti.

<i>Cod. elab.:</i> 125GN204GN02ZRH000A	<i>Titolo:</i> Galleria Caltanissetta	<i>Data:</i> Febbraio 2019
<i>Nome file</i> v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa <b>rev.b</b>	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	<i>Pagina</i> 71 di 88

## 7. PROPOSTA DI VARIANTE

Sovrapponendo l'ubicazione dei by pass di Progetto di Variante, con le aree critiche evidenziate nel capitolo precedente, scaturisce l'esigenza di predisporre un riposizionamento degli attraversamenti della GN Caltanissetta funzionale all'eliminazione delle interferenze tra i by pass e le suddette aree critiche.

Se l'obiettivo primario del riposizionamento deve essere quello di mantenere imperturbata la condizione di equilibrio raggiunta nelle zone ad alta connotazione deformativa al fine di evitare ulteriori incrementi dei cedimenti, risulta comunque necessario analizzare l'insieme delle possibili soluzioni e le alternative operative che se implementate possano portare ad una complessiva minimizzazione del disturbo indotto lungo tutto il tracciato della GN Caltanissetta.

A tal fine, si tiene a precisare che le modifiche progettuali che verranno descritte di seguito, si basano fondamentalmente sull'applicazione di tre differenti criteri, pensati con l'obiettivo comune di rendere minimi gli effetti destabilizzanti dello scavo dei by pass, anche in quelle zone dove il passaggio della seconda canna ha fatto registrare fenomeni deformativi meno rilevanti.

I criteri sui quali si basa la proposta di modifica sono:

- **Criterio di rimodulazione planimetrica degli interventi** – si prevede la diminuzione degli interventi da realizzare lungo lo sviluppo longitudinale della galleria naturale. In questo modo si intende apportare il minimo "disturbo" possibile all'equilibrio di superficie raggiunto (*recepimento del Decreto Legislativo n°264 del 5 Ottobre 2006 "Attuazione della Direttiva 54/2004/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete autostradale transeuropea"*).
- **Criterio tensionale** - modifica della modalità di attacco dell'anello in conci ed introduzione di una struttura di cerchiaggio interno in grado di rendere minime le variazioni di tensione lungo il rivestimento definitivo, anche successivamente al taglio dei conci.
- **Criterio deformativo** – modifica dello schema di consolidamento ed introduzione di un rivestimento di prima fase provvisto di arco-puntone. L'obiettivo è quello di accelerare i tempi realizzativi di scavo di ciascun by pass in modo da minimizzare in termini di tempo il disturbo indotto adottando una sezione di scavo molto rigida.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 72 di 88

## 7.1 Rimodulazione planimetrica degli attraversamenti

Le considerazioni che stanno alla base del criterio di rimodulazione planimetrica adottato, partono dal presupposto che realizzare un numero minore di interventi di attraversamento, significherebbe apportare di conseguenza un minore disturbo all'equilibrio deformativo globale raggiunto in tutta l'area di interesse della galleria naturale Caltanissetta.

Il riposizionamento dei by pass, inoltre, tiene in considerazione le aree con elevata connotazione deformativa al fine di eliminare ogni possibile sovrapposizione con esse.

Il riferimento normativo che consente la proposta di modifica dell'ubicazione planimetrica dei by pass, è la direttiva 2004/54/CE "*requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale trans europea*", recepita in Italia dal Decreto Legislativo n°264 del 5 Ottobre 2006 "*Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale trans europea*".

Al cap. § 2.3.8 del D.lgs 264/06 si stabilisce infatti che "*se vi sono uscite di emergenza, la distanza tra due di esse non deve superare i **500m***" e successivamente al par. §2.4.1 "*nelle gallerie a doppio fornici, se i fornici si trovano allo stesso livello, o quasi, devono essere previste almeno ogni **1500m** delle gallerie trasversali adatte ai veicoli dei servizi di pronto intervento*".

È inoltre da tenere in considerazione che con la legge n°71 del 24 Marzo 2012, art. 53 "*allineamento alle norme europee della regolazione progettuale delle infrastrutture ferroviarie e stradali e disposizione in materia di gallerie stradali*" viene stabilito il concetto dell'over design, attraverso il concetto "*non possono essere applicati alla progettazione e costruzione delle nuove gallerie stradali e autostradali nonché agli adeguamenti di quelle esistenti, parametri e standard tecnici e funzionali più stringenti rispetto a quelli previsti dagli accordi e dalle norme dell'Unione Europea*".

L'exkursus normativa illustrato, rende concreta ed applicabile da un punto di vista normativo la possibilità di diminuzione degli interventi di attraversamento tra le due canne della galleria Caltanissetta. Per ulteriori approfondimenti e riferimenti normativi, nonché al dettaglio del livello di sicurezza della galleria naturale, si rimanda all'elaborato specifico "*Analisi di Rischio della galleria naturale Caltanissetta*".

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 73 di 88

Considerando quindi un'interdistanza massima tra le uscite di emergenza pedonali pari a 500m e 1500m per le uscite di emergenza carrabili, così come previsto dal D.lgs 264/06, il numero minimo degli interventi da realizzare passerebbe a n°9 (7 pedonali e 2 carrabili).

La presenza di aree con riscontrata criticità deformativa comporta un'ulteriore redistribuzione dei by-pass da predisporre, in modo da annullare qualsiasi sovrapposizione tra le opere di attraversamento e le zone di superficie evidenziate. Questo porta un incremento per quanto riguarda il numero dei by pass pedonali, che nella distribuzione planimetrica proposta salgono a n°7, mentre i by pass carrabili rimangono n°2.

Tabella 7-1: Progressive di ubicazione dei by pass

N°	TIPO	carreggiata SX	carreggiata DX
1	B.P.P	Progr. Km 13+417.33	Progr. Km 13+426.12
2	B.P.P	Progr. Km 13+915.63	Progr. Km 13+910.33
3	B.P.C	Progr. Km 14+415.33	Progr. Km 14+401.93
4	B.P.P	Progr. Km 14+913.33	Progr. Km 14+899.93
5	B.P.P	Progr. Km 15+190.49	Progr. Km 15+177.09
6	B.P.C	Progr. Km 15+675.49	Progr. Km 15+662.09
7	B.P.P	Progr. Km 15+975.49	Progr. Km 15+962.09
8	B.P.P	Progr. Km 16+275.49	Progr. Km 16+262.09
9	B.P.P	Progr. Km 16+675.49	Progr. Km 16+667.43

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 74 di 88



Figura 7.1: planimetria con ubicazione bypass di PVT – zone critiche

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 75 di 88

## 7.2 Struttura di Attacco dei Conci

Per la limitazione degli inevitabili effetti di rilassamento tensionale successi alla fase di taglio dei conci del rivestimento in opera, si prevede di sostituire l'intervento di chiodatura di progetto previsto per la realizzazione dei by pass, con una struttura in carpenteria metallica. Il compito di tale struttura sarà quello di effettuare un vero e proprio "cerchiaggio interno" degli anelli al contorno della zona di taglio, al fine di far rimanere quantomeno invariato il quadro tensionale globale del rivestimento definitivo anche successivamente alle operazioni di taglio dei conci.

La struttura di sostegno temporanea è costituita da una base in calcestruzzo di classe C28/35, sagomata inferiormente per consentire il passaggio degli impianti, su cui sono collegate 6 centine costituite da 2HEM500 accoppiate connesse alla traversa principale, realizzata in forma scatolare mediante due piatti verticali laterali sagomati secondo la curvatura del rivestimento della galleria, due piatti verticali costituenti l'anima centrale e due piatti, superiore e inferiore, disposti in direzione radiale alla galleria e che completano la struttura scatolare. La struttura è posta in carico tramite 10 martinetti per scaricare completamente il rivestimento in conci prefabbricati della galleria e consentire la stabilità del sistema durante il taglio dei conci per la realizzazione dell'apertura propedeutica alla costruzione del by-pass. Completano il telaio in carpenteria metallica le traverse di collegamento realizzate in profilati HEM500. Inoltre sono predisposti rinforzi metallici per le 4 centine centrali in corrispondenza della traversa principale scatolata. La struttura metallica è collegata al rivestimento della galleria tramite una bullonatura sistematica realizzata con bulloni M30.

Gli elementi costituenti il telaio in carpenteria metallica sono realizzati in acciaio S355.

Tale struttura è stata pensata per essere adattata sia allo scavo dei bypass pedonali che di quelli carrabili. Infatti, mentre per i bypass pedonali è sufficiente adottare una di queste strutture, per quelli carrabili è necessario accostarne due con alcune modifiche da effettuarsi sull'anello al fine di adattarne l'apertura e rinforzare gli elementi metallici centrali.

Infine una cornice calandrata permanente sarà posizionata all'interno dell'apertura realizzata nel rivestimento della galleria per la sola realizzazione dei bypass pedonali. Tale

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 76 di 88

struttura è costituita da due elementi curvi posizionati inferiormente e superiormente e due elementi verticali che chiudono la sagoma, gli elementi di questa struttura sono disposti secondo la curvatura della galleria.

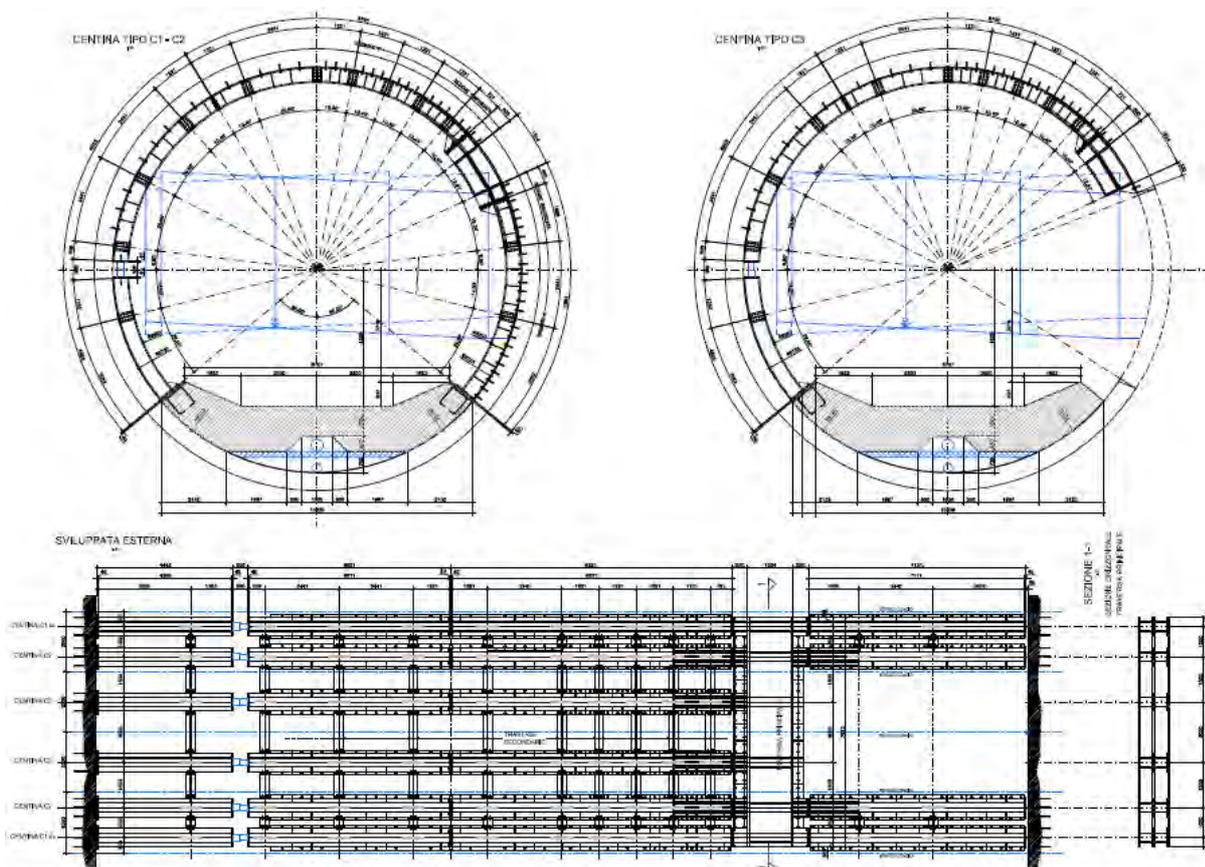


Figura 7.2: carpenteria della struttura di sostegno temporanea a portale.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 77 di 88



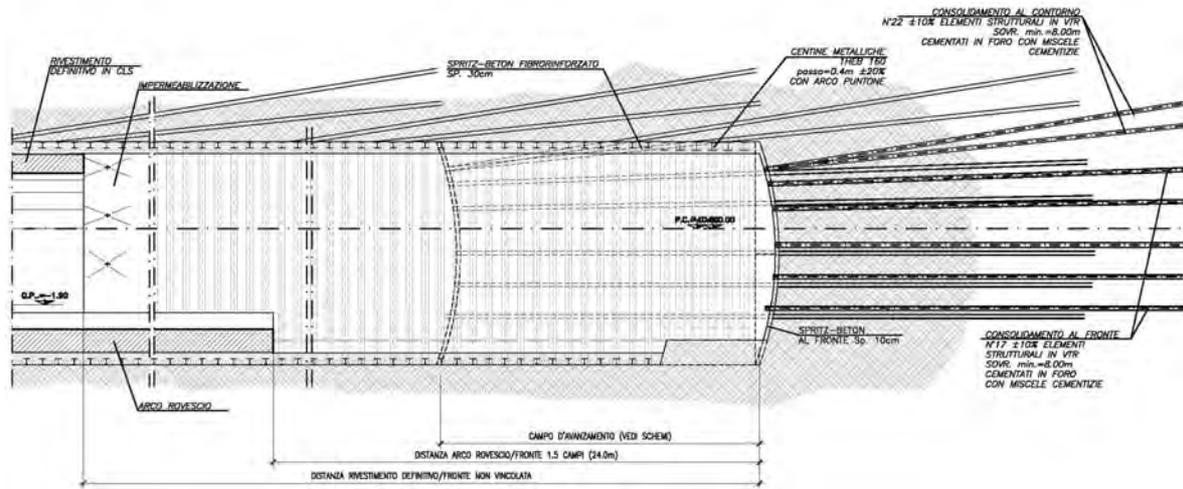


Figura 7.4: sezione tipo bypass pedonale – sezione corrente longitudinale – scavo e consolidamento

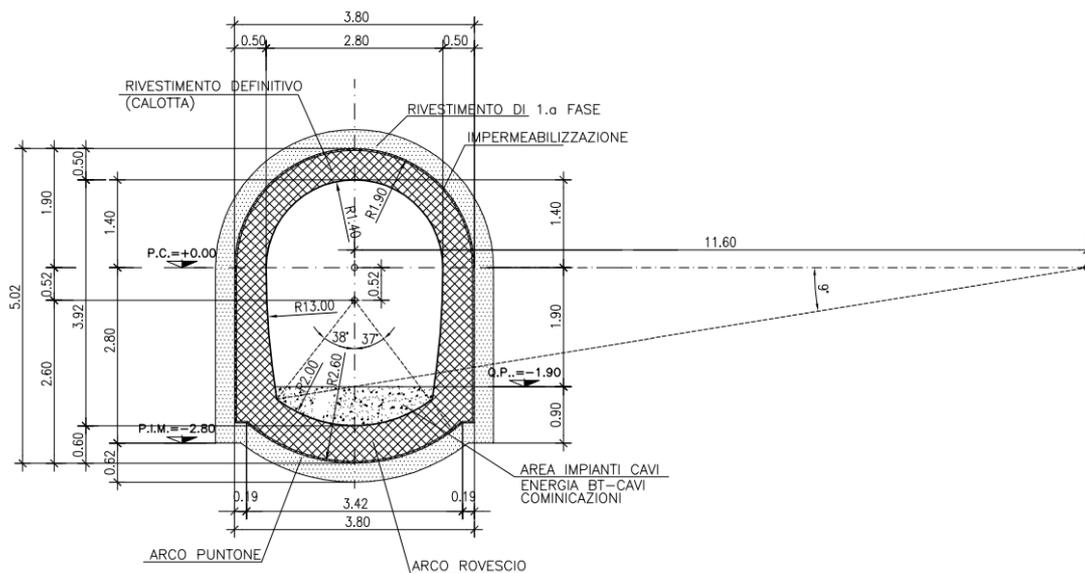


Figura 7.5: sezione tipo bypass pedonale – sezione corrente – carpenteria rivestimento definitivo

Il collegamento tra la galleria principale di linea e il bypass pedonale sezione corrente avverrà mediante un allargo, ossia una sezione simile a quella della sezione corrente con dimensione di scavo maggiore. Le dimensioni di scavo di questa sezione sono definite a

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 79 di 88

partire dalla posizione della struttura metallica esterna e dalle dimensioni e posizioni specifiche dei conci esistenti della canna SX della galleria Caltanissetta.

Questa sezione è costituita da:

- consolidamento dalla galleria Caltanissetta mediante n°55 elementi strutturali in VTR, di lunghezza variabile da 9m a 27m, cementati in foro con miscele cementizie. In funzione della distanza tra le due canne, sono previsti 3 schemi di consolidamento.
- Sostegno di prima fase costituito da centine HEB160, passo 35cm/ ± funzione del monitoraggio e arco puntone. Il cls proiettato fibrorinforzato avrà spessore di 30cm.
- Rivestimento definitivo in c.a. dello spessore di 235cm in calotta e 160cm in arco rovescio.
- Il rivestimento definitivo prevede un impermeabilizzazione full-round al contorno di esso.

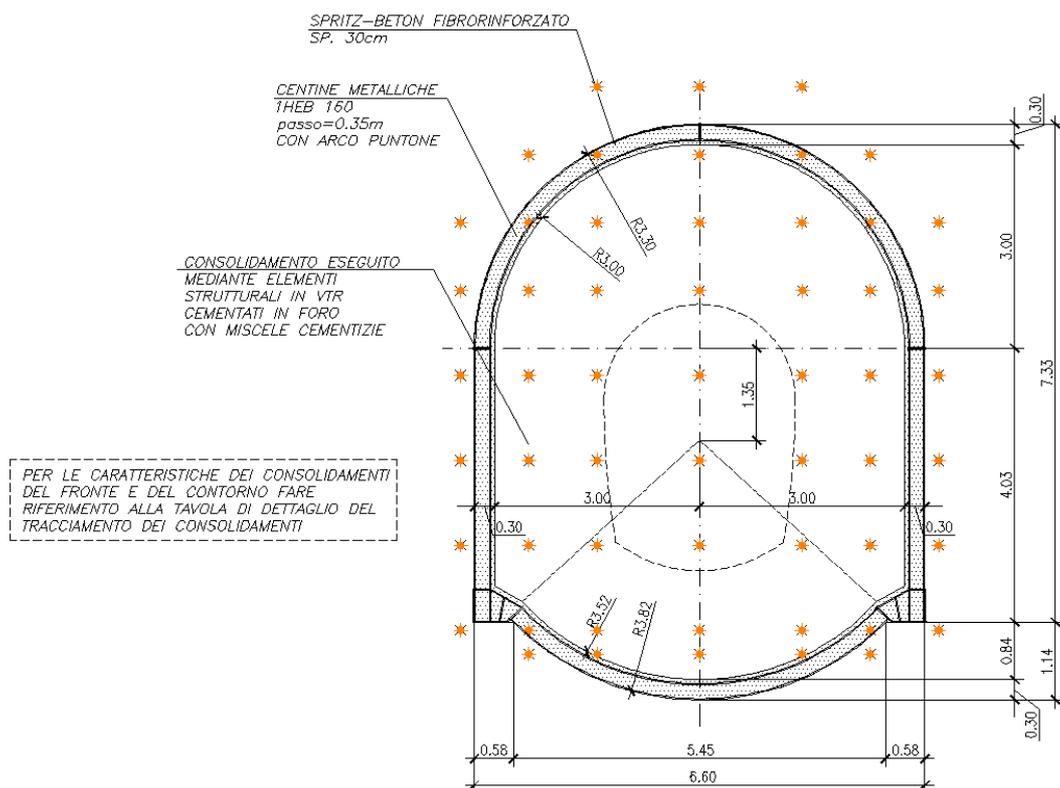


Figura 7.6: sezione tipo bypass pedonale – sezione di allargo – scavo e consolidamento

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 80 di 88

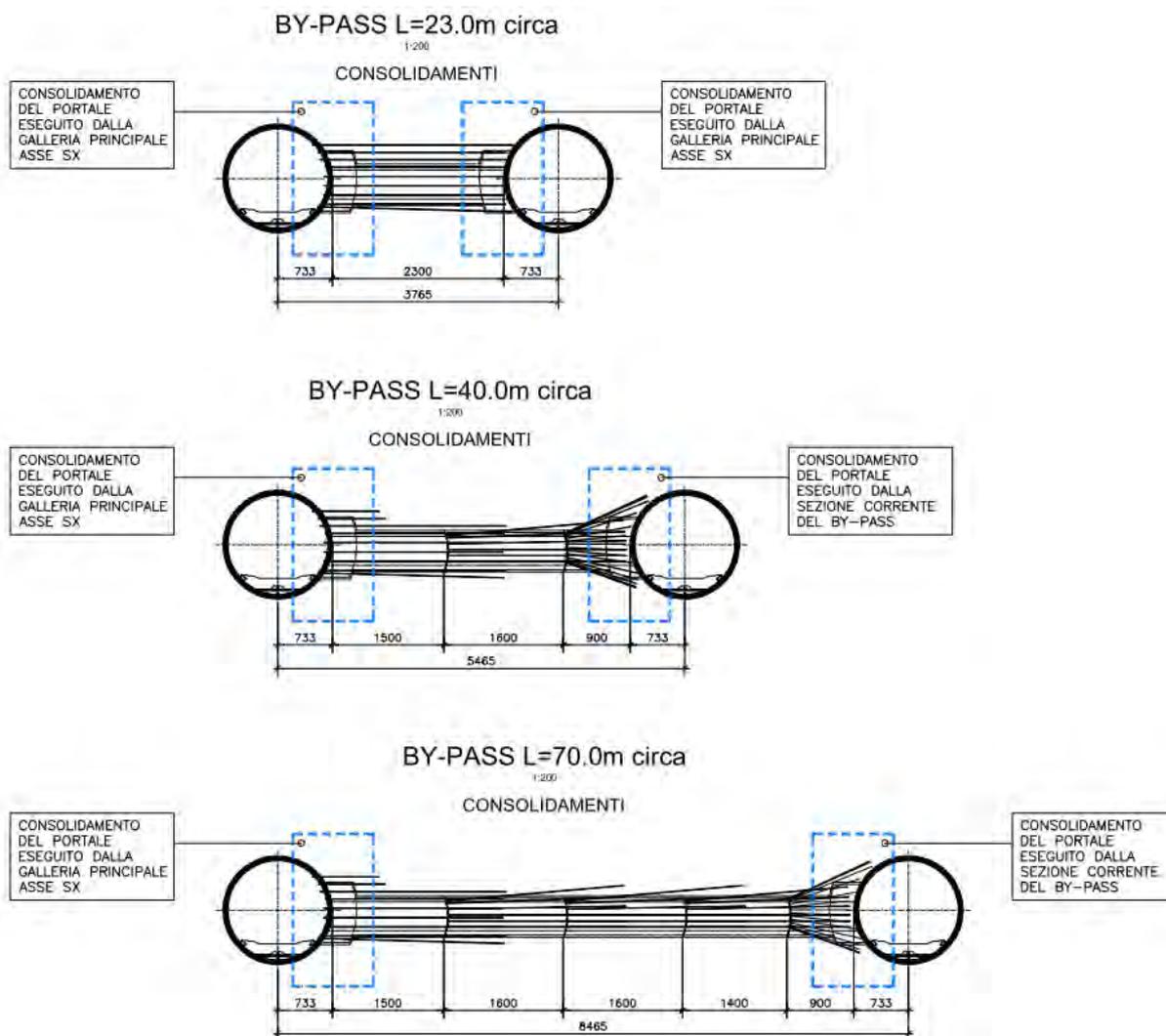


Figura 7.7: sezione tipo bypass pedonale – sezione longitudinale di allargò – schemi tipologici per i consolidamenti

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 81 di 88

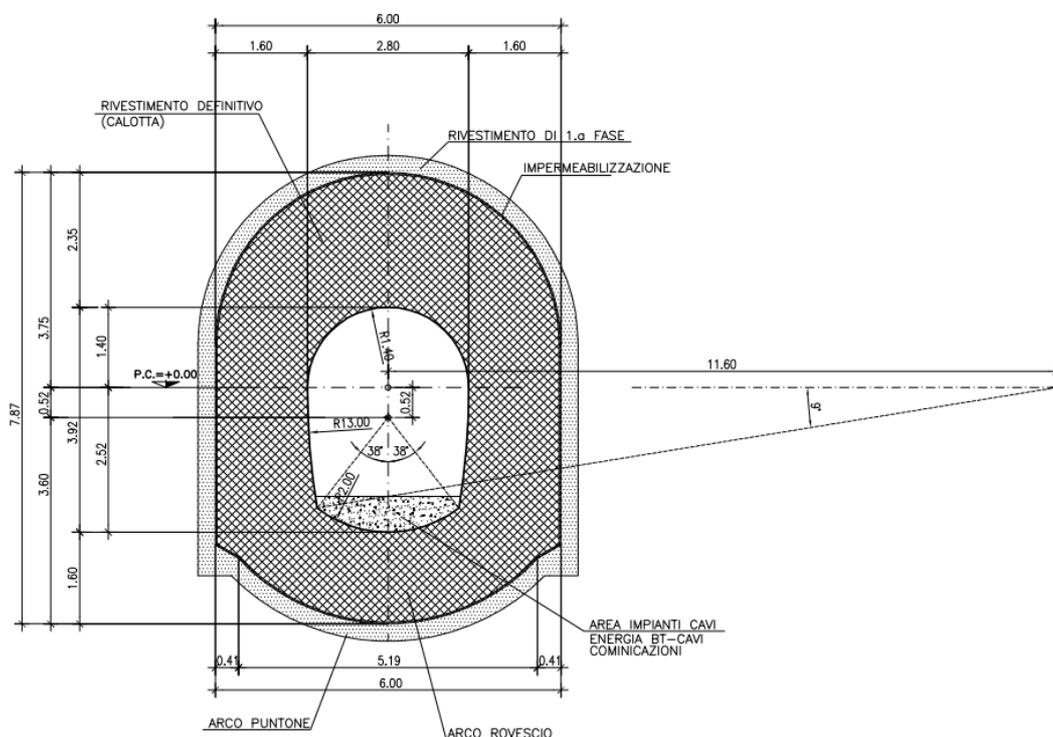


Figura 7.8: sezione tipo bypass pedonale – sezione di allargato – carpenteria rivestimento definitivo

La sezione allargata, denominata sezione portale, si estende solo per 2.68m oltre alla galleria principale in direzione perpendicolare allo sviluppo della galleria Caltanissetta.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 82 di 88

## 7.4 Schema di scavo e consolidamento dei by pass carrabili

Per limitare gli effetti deformativi indotti dallo scavo dei bypass carrabili, la sezione di scavo corrente prevede:

- consolidamento del fronte mediante n°36 elementi strutturali in VTR, L=16m, sovrapposizione 8m, cementati in foro con miscele cementizie.
- Consolidamento al contorno con n°35±10% elementi strutturali in VTR, L=16m, cementati in foro con miscele cementizie.
- Sostegno di prima fase costituito da centine HEB300, passo 70cm±20% e arco puntone. Il cls proiettato fibrorinforzato avrà spessore di 35cm.
- Rivestimento definitivo in c.a. dello spessore di 60cm in calotta e 70cm in arco rovescio.
- Il rivestimento definitivo prevede un impermeabilizzazione full-round al contorno di esso.

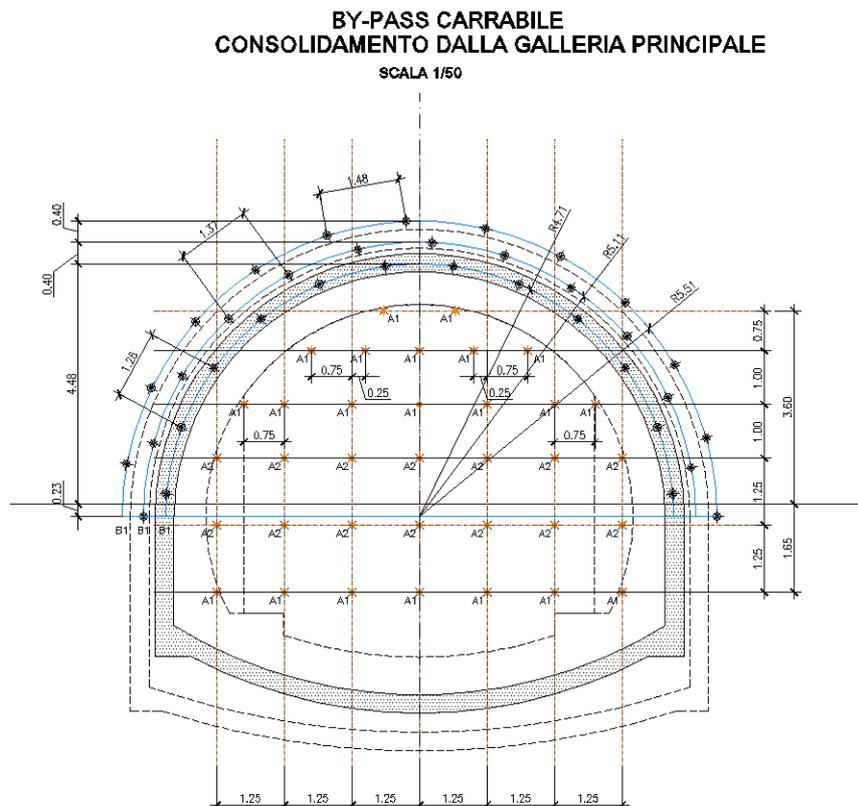


Figura 7.9: sezione tipo bypass carrabile – sezione corrente – scavo, consolidamenti e sostegno di prima fase

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 83 di 88

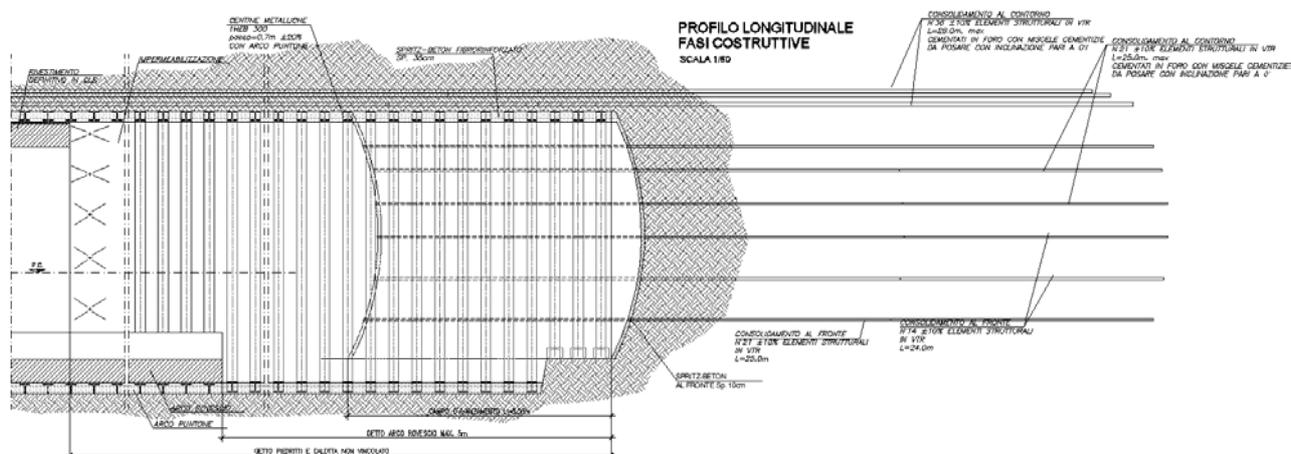


Figura 7.10: sezione tipo bypass carrabile – sezione corrente – profilo longitudinale e fasi costruttive

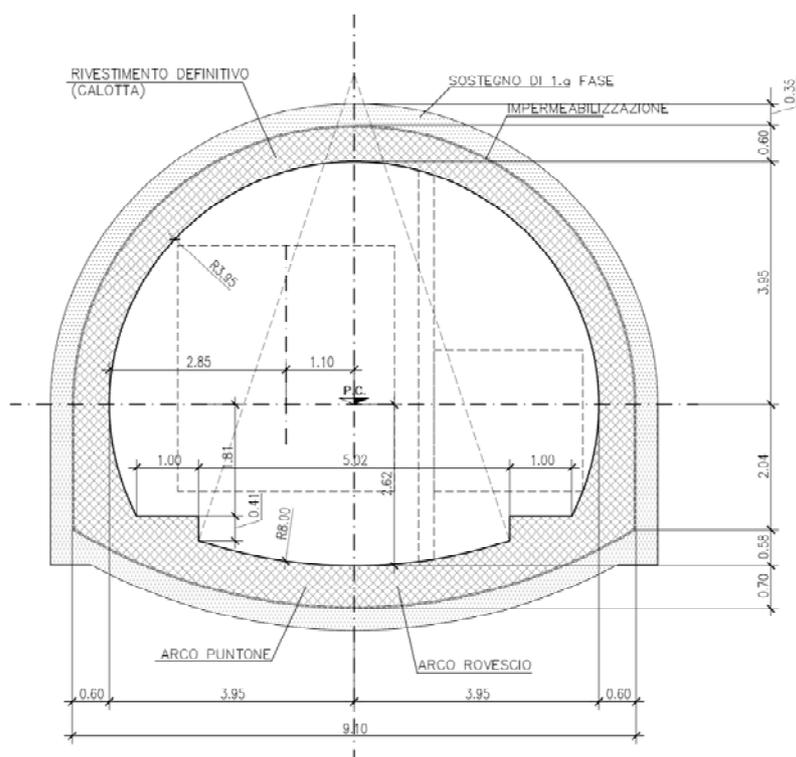


Figura 7.11: sezione tipo bypass carrabile – sezione corrente – carpenteria rivestimento definitivo

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 84 di 88

Il collegamento tra la galleria principale di linea e il bypass carrabile (sezione corrente) avverrà mediante un allargo (di seguito denominata sezione portale), ossia una sezione simile a quella della sezione corrente con dimensione di scavo maggiore.

La carpenteria della sezione è riportata nella figura seguente.

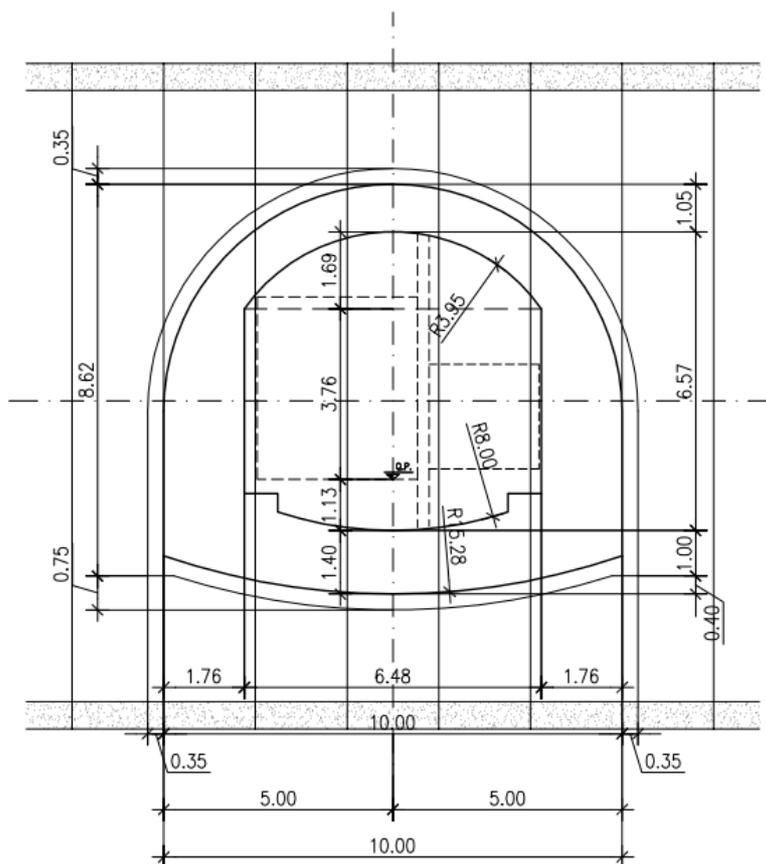


Figura 7.12: sezione tipo bypass carrabile – sezione portale – carpenteria rivestimento definitivo

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	Relazione Geotecnica giustificativa	Pagina 85 di 88



Figura 7.13: sezione tipo bypass carrabile – sezione longitudinale – carpenteria rivestimento definitivo

Nella sezione d'attacco, le centine sono posizionate ad un passo inferiore: 50cm, mentre lo spessore minimo del rivestimento definitivo è di 1.05m (calotta), mentre ai piedritti è di 1.76m e in arco rovescio è di 1.4m. Il consolidamento del fronte e al contorno previsto nella sezione tipo corrente, è sostituito dal consolidamento effettuato prima dell'avvio dello scavo, a partire dalla galleria principale.

Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 86 di 88



Le macrofasi operative per lo scavo dei bypass carrabili sono i seguenti:

fase 0: consolidamento dell'impronta del bypass dalla galleria principale, asse SX;

fase 1: posa della struttura metallica provvisoria interna alla galleria principale;

fase 2: taglio degli anelli;

fase 3: scavo di avanzamento in sezione tipo portale e due campi di sezione corrente;

fase 4: posa in opera del sostegno di prima fase;

fase 5: posa in opera dell'anello metallico definitivo al contorno (solo nel caso di bypass pedonale).

fase 6: posa dell'impermeabilizzazione;

fase 7: getto del rivestimento definitivo del portale e di un campo della sezione corrente;

fase 8: rimozione della struttura metallica provvisoria interna alla galleria principale;

fase 9: prosieguo dello scavo del bypass in sezione corrente;

fase 10: posa in opera del sostegno di prima fase della sezione corrente (per la tratta ancora da scavare);

fase 11: posa dell'impermeabilizzazione per la sezione corrente (ancora da gettare);

fase 12: completamento del getto in opera del rivestimento definitivo della sezione corrente.

Prof. Ing. Sebastiano Pelizza

Dott. Ing. Georgios Kalamaras



Cod. elab.: 125GN204GN02ZRH000A	Titolo: Galleria Caltanissetta	Data: Febbraio 2019
Nome file v_ 3569-00 relazione geotecnica giustificativa rev.b	<b>Relazione Geotecnica giustificativa</b>	Pagina 88 di 88

**Corridoio plurimodale Tirrenico**

**Itinerario Agrigento-Caltanissetta**

PIEZOMETRI ELETTRICI

REPORT TABULATI E GRAFICI

**GALLERIA NATURALE CALATANISSETTA ASSE SX**

DATA ULTIMA MISURA : 30/10/2018

STAZIONE MISURA

MS02\_SX Anello n. 460

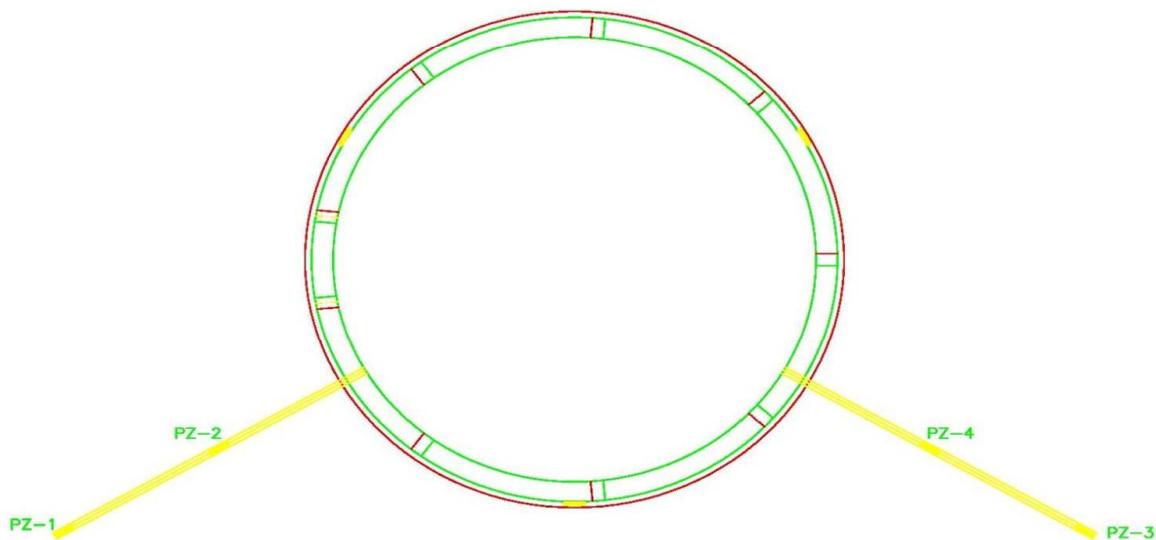
ELABORATO PROGETTUALE DI RIFERIMENTO

TIPOLOGICO SEZIONE - UBICAZIONE PIEZOMETRI RADIALI GUARDANDO IL FRONTE

**GALLERIA NATURALE - CALATANISSETTA CANNA SX**

1:100

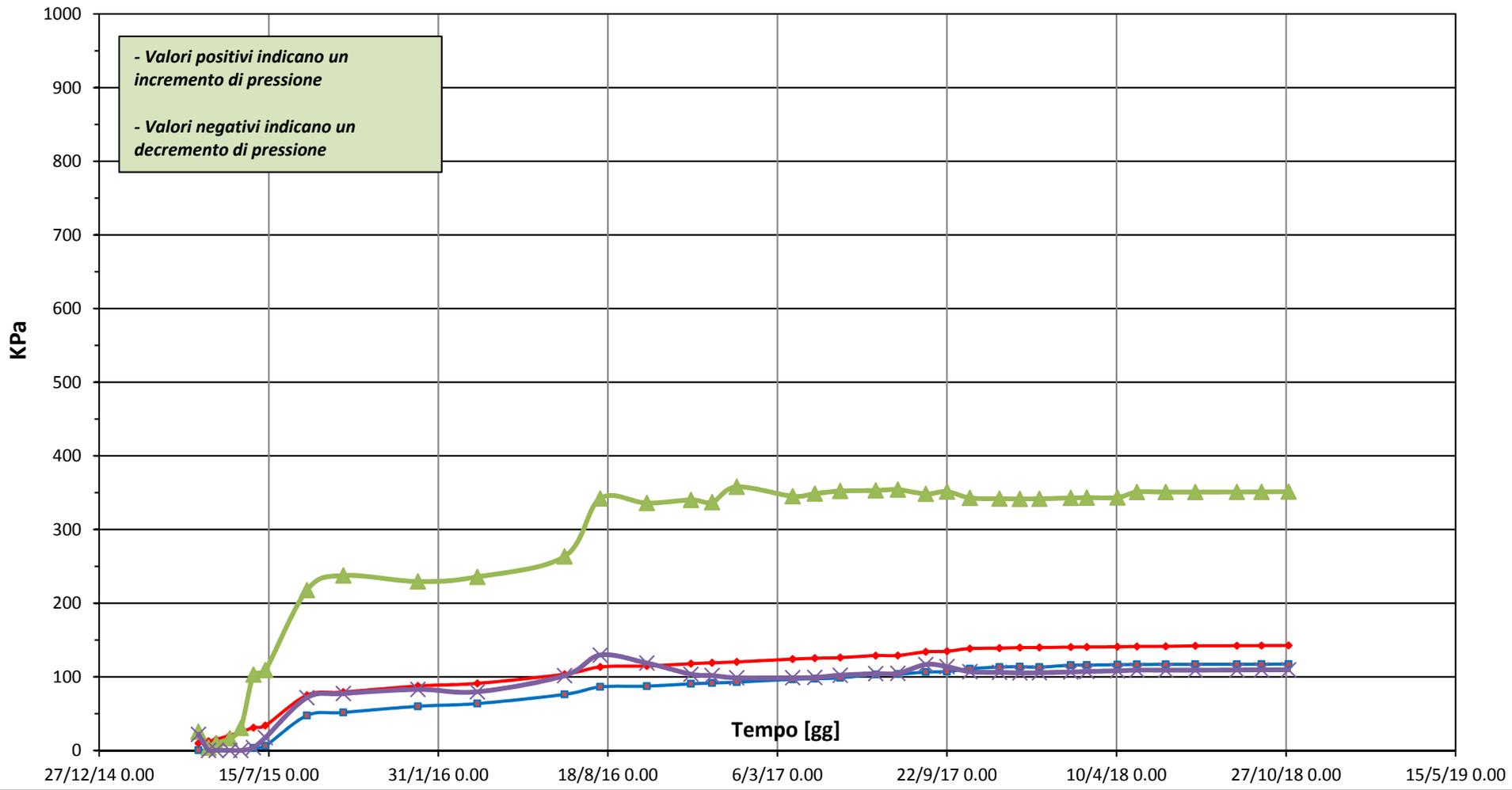
MONITORAGGIO SPECIALE PIEZOMETRI ELETTRICI



DATA CONSEGNA	REDATTO	VERIFICATO
30/11/2018	Dott. Gaetano Giletto	Dott. Gaetano Giletto



**Monitoraggio Strutturale  
Piezometri Elettrici  
Galleria Naturale Caltanissetta  
MS02SX Anello n. 460**



**Corridoio plurimodale Tirrenico**

**Itinerario Agrigento-Caltanissetta**

PIEZOMETRI ELETTRICI

REPORT TABULATI E GRAFICI

**GALLERIA NATURALE CALATANISSETTA ASSE SX**

DATA ULTIMA MISURA : 30/10/2018

STAZIONE MISURA

MS04\_SX Anello n. 841

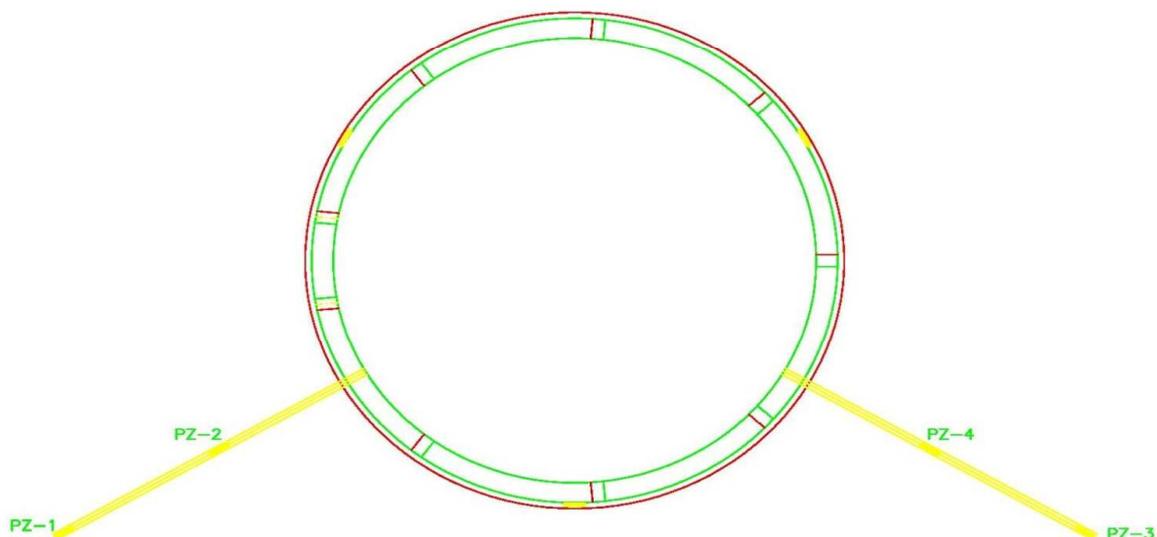
ELABORATO PROGETTUALE DI RIFERIMENTO

TIPOLOGICO SEZIONE - UBICAZIONE PIEZOMETRI RADIALI GUARDANDO IL FRONTE

**GALLERIA NATURALE - CALATANISSETTA CANNA SX**

1:100

MONITORAGGIO SPECIALE PIEZOMETRI ELETTRICI



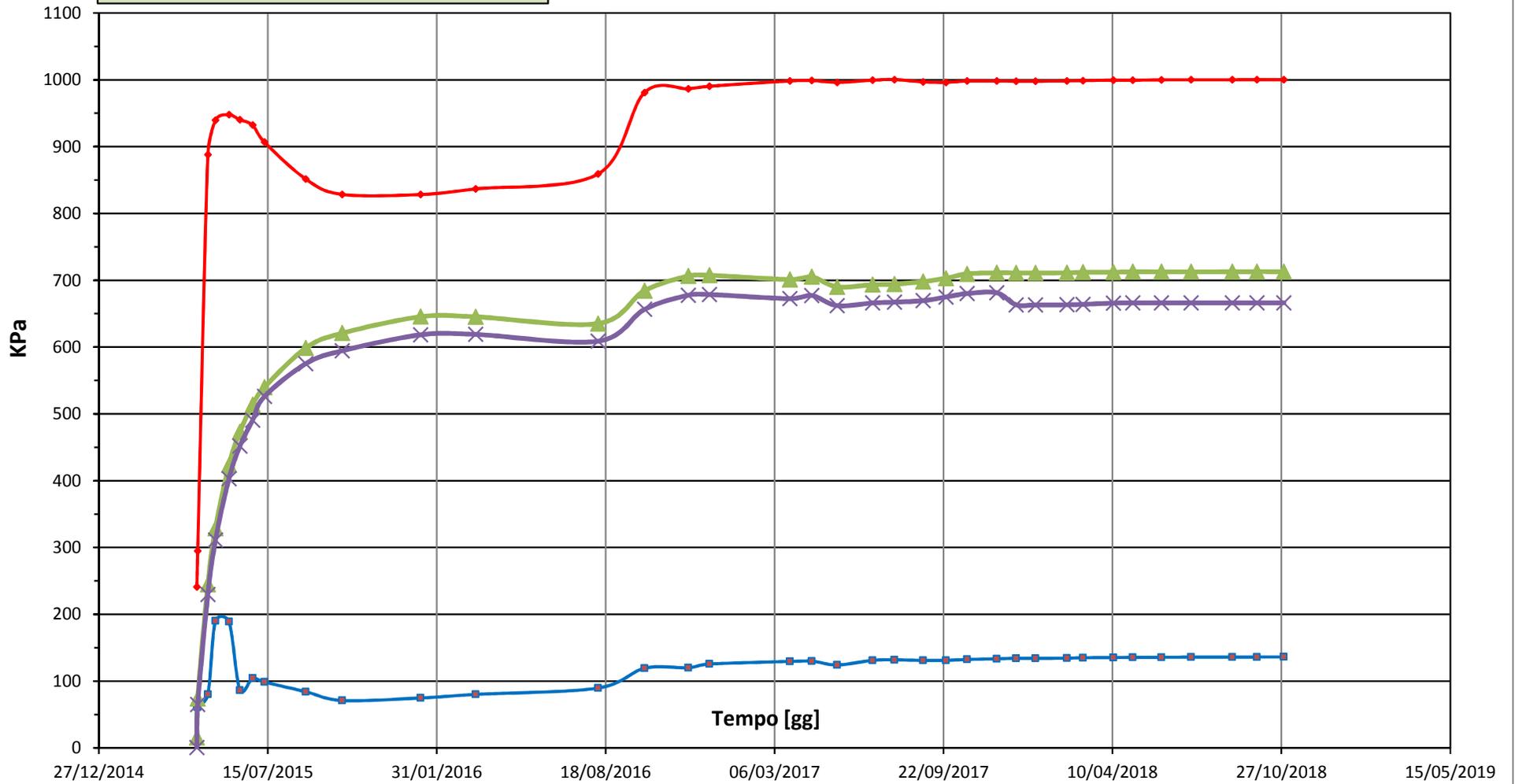
DATA CONSEGNA	REDATTO	VERIFICATO
30/11/2018	Dott. Gaetano Giletto	Dott. Gaetano Giletto



**Monitoraggio Strutturale**  
**Piezometri Elettrici**  
**Galleria Naturale Caltanissetta**  
**MS04SX Anello n. 841**

- Valori positivi indicano un incremento di pressione  
- Valori negativi indicano un decremento di pressione

PZ01 PZ02 PZ03 PZ04



**Corridoio plurimodale Tirrenico**

**Itinerario Agrigento-Caltanissetta**

PIEZOMETRI ELETTRICI

REPORT TABULATI E GRAFICI

**GALLERIA NATURALE CALATANISSETTA ASSE SX**

DATA ULTIMA MISURA : 30/10/2018

STAZIONE MISURA

MS05\_SX Anello n. 1161

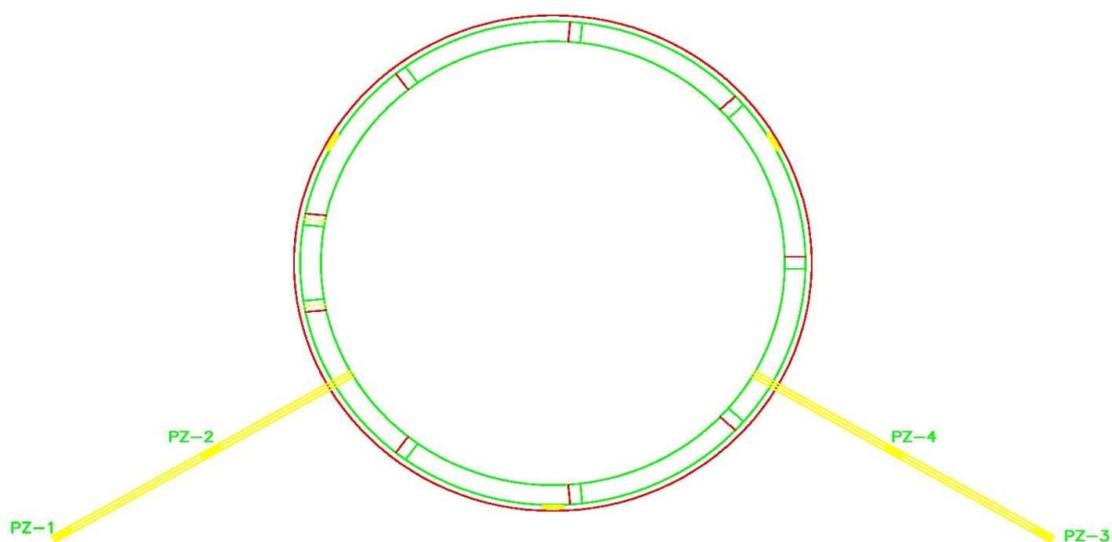
ELABORATO PROGETTUALE DI RIFERIMENTO

TIPOLOGICO SEZIONE - UBICAZIONE PIEZOMETRI RADIALI GUARDANDO IL FRONTE

**GALLERIA NATURALE - CALATANISSETTA CANNA SX**

1:100

MONITORAGGIO SPECIALE PIEZOMETRI ELETTRICI



DATA CONSEGNA	<u>REDATTO</u>	<u>VERIFICATO</u>
30/11/2018	Dott. Gaetano Giletto	Dott. Gaetano Giletto



**Monitoraggio Strutturale**  
**Piezometri Elettrici**  
**Galleria Naturale Caltanissetta**  
**MS05SX Anello n. 1161**

