

**SGC Grosseto Fano (E78).
Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) - Selci Lama (E45).
Adeguamento a 4 corsie del tratto Le Ville - Selci Lama (E45).
Lotto 7.**

PROGETTO DEFINITIVO

PG 364

ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

<p>IL GEOLOGO <i>Dott. Geol. Salvatore Marino</i> Ordine dei geologi della Regione Lazio n. 1069</p>	<p>PROGETTISTI SPECIALISTICI <i>Ing. Ambrogio Signorelli</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. A35111</p>	<p>PROGETTAZIONE ATI: (Mandataria) GP INGEGNERIA <i>GESTIONE PROGETTI INGEGNERIA srl</i></p> <p>(Mandante) cooprogetti</p> <p>(Mandante) engeko</p> <p>(Mandante) AIM <i>Studio di Architettura e Ingegneria Moderna</i></p>
<p>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE <i>Arch. Santo Salvatore Vermiglio</i> Ordine Architetti Provincia di Reggio Calabria n. 1270</p>	<p><i>Ing. Moreno Panfili</i> Ordine Ingegneri Provincia di Perugia n. A2657</p>	<p>IL PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE. (DPR207/10 ART 15 COMMA 12) : <i>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 14035</p>
<p>L'ARCHEOLOGO <i>Dott.ssa Maria Grazia Liseno</i> Elenco MIBACT n. 1646</p>	<p><i>Ing. Claudio Muller</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 15754</p>	
<p>VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO <i>Ing. Michele Consumini</i></p>	<p><i>Ing. Giovanni Suraci</i> Ordine Ingegneri Provincia di RC n. A2895</p>	
<p>VISTO: IL RESP. DEL PROGETTO <i>Arch. Pianif. Marco Colazza</i></p>	<p><i>Ing. Giuseppe Resta</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 20629</p>	

OPERE D'ARTE MAGGIORI
Gallerie naturali – Elaborati Generali
Relazione di calcolo
Galleria Le Ville

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA
COMP.	PROGETTO	LIV. ANNO N.PROG.	T00GN00OSTRE05B		
DP	LO702G	D2110	T00GN00OSTRE05	B	-
D					
C					
B	Revisione per Istr. ANAS Prot. CDG.U.0439522 23-05-2024	Giugno '24	Amoruso	Signorelli	Guiducci
A	Emissione	Marzo '24	M.Morigi	A. Signorelli	G. Guiducci
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

INDICE

8.	<u>PREMESSA.....</u>	<u>4</u>
2.	<u>DESCRIZIONE DELL'OPERA.....</u>	<u>5</u>
3.	<u>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....</u>	<u>6</u>
3.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
4.	<u>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI</u>	<u>6</u>
5.	<u>CONTESTO GEOTECNICO E GEOMECCANICO DI RIFERIMENTO (FASE CONOSCITIVA)</u>	<u>9</u>
5.1	ANALISI DEL TRACCIATO	9
5.2	CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE	9
5.3	RIEPILOGO DELLE TRATTE OMOGENEE	9
6.	<u>ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI)</u>	<u>10</u>
6.1	IMPORTANZA DEL FRONTE DI SCAVO	10
6.1.1	<i>Gallerie a fronte stabile (CASO A).....</i>	<i>10</i>
6.1.2	<i>Gallerie a fronte stabile a breve termine (CASO B)</i>	<i>10</i>
6.1.3	<i>Gallerie a fronte instabile (CASO C).....</i>	<i>11</i>
6.2	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO ADECO RS	11
6.2.1	<i>Metodo delle linee caratteristiche</i>	<i>11</i>
6.2.1.1	<i>Introduzione.....</i>	<i>11</i>
6.2.1	<i>Metodo dell'equilibrio limite</i>	<i>14</i>
6.2.1.1	<i>Introduzione.....</i>	<i>14</i>
7.	<u>SEZIONI TIPO DI AVANZAMENTO E TIPOLOGIE DI INTERVENTO PREVISTE (FASE DI TERAPIA)</u>	<u>16</u>
7.1	SEZIONI TIPO ADOTTATE.....	16
7.1.1	<i>Sezioni tipo A0.....</i>	<i>17</i>
7.1.2	<i>Sezioni tipo B0 – B0v.....</i>	<i>19</i>
7.1.3	<i>Sezioni tipo B2v</i>	<i>21</i>
7.1.4	<i>Sezioni tipo PZ.....</i>	<i>24</i>
7.1.6	<i>Sezioni tipo PZ-TR.....</i>	<i>26</i>
7.1.8	<i>Sezioni tipo By-Pass</i>	<i>28</i>
7.1.10	<i>Sezioni tipo Concio D'Attacco</i>	<i>30</i>
7.2	INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO IN AVANZAMENTO AL FRONTE E AL CONTORNO DI SCAVO	32
7.2.1	<i>Verifiche di consolidamento al fronte.....</i>	<i>32</i>

PROGETTAZIONE ATI:

7.2.2	Analisi per le basse coperture – Sez B2v	32
7.2.3	Analisi per le basse coperture – Sez PZ-TR.....	36
7.2.4	Dimensionamento degli infilaggi metallici	39
7.2.4.2	Verifiche strutturali degli infilaggi metallici.....	41

8.	<u>ANALISI NUMERICHE PER IL CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI NEL RIVESTIMENTO</u>	
	<u>DI PRIMA FASE E DEFINITIVO E VERIFICHE STRUTTURALI</u>	42
8.1	PREMESSA.....	42
8.2	ANALISI TENSO-DEFORMATIVE ALLE DIFFERENZE FINITE	42
8.3	CARICO IDRAULICO.....	44
8.4	CARICO SISMICO	46
8.4.1	Azione Sismica a Basse Coperture	47
8.4.2	Incremento indotto dall' azione Sismica	48
8.5	VALUTAZIONE DEI RILASCI TENSIONALI	49
8.6	RIEPILOGO ANALISI SVOLTE	52
8.6.2	Sez 1.....	53
8.6.3	Sez 2.....	55
8.6.4	Sez 3.....	57
8.6.5	Sez 4.....	59
8.6.7	Sez 5.....	61
8.6.8	Sez 6.....	63
8.7	RISULTATI E VERIFICHE STRUTTURALI.....	65
8.7.1	Criteria di verifica dei rivestimenti.....	65
8.7.2	Sezione tipo B0v – sez 1.....	68
8.7.2.2	Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine	82
8.7.2.4	Verifiche SLU rivestimento provvisorio.....	83
8.7.2.6	Verifiche SLU rivestimento definitivo.....	84
8.7.2.7	Verifiche SLE.....	86
8.7.2.9	Verifiche SLU rivestimento definitivo – Condizioni Sismiche	88
8.7.2.10	Subsidenze attese	90
8.7.4	Sezione tipo A0 – sez 2.....	92
8.7.4.2	Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine	106
8.7.4.4	Verifiche SLU rivestimento provvisorio.....	107
8.7.4.6	Verifiche SLU rivestimento definitivo.....	108
8.7.4.7	Verifiche SLE.....	110
8.7.6	Sezione tipo B2v – sez 3.....	112

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.6.2	Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine	126
8.7.6.3	Verifiche SLU rivestimento provvisorio.....	127
8.7.6.5	Verifiche SLU rivestimento definitivo.....	128
8.7.6.6	Verifiche SLE.....	130
8.7.6.8	Verifiche SLU rivestimento definitivo – Condizioni Sismiche	132
8.7.6.9	Subsidenze attese	134
8.7.8	Sezione tipo B0 – sez 4.....	136
8.7.8.2	Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine	150
8.7.8.3	Verifiche SLU rivestimento provvisorio.....	151
8.7.8.5	Verifiche SLU rivestimento definitivo.....	152
8.7.8.6	Verifiche SLE.....	154
8.7.10	Sezione tipo PZ – sez 5	156
8.7.10.2	Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine	166
8.7.10.3	Verifiche SLU rivestimento provvisorio.....	167
8.7.10.5	Verifiche SLU rivestimento definitivo.....	168
8.7.10.6	Verifiche SLE.....	170
8.7.10.8	Verifiche SLU rivestimento definitivo – Condizioni Sismiche	172
8.7.12	Sezione tipo By Pass – sez 6.....	174
9.4.1.1	Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine	183
9.4.1.2	Verifiche SLU rivestimento provvisorio.....	184
9.4.1.4	Verifiche SLU rivestimento definitivo.....	185
9.4.1.5	Verifiche SLE.....	187
9.	<u>MONITORAGGIO SULLA GALLERIA NATURALE</u>	<u>188</u>

8. PREMESSA

Nella presente relazione vengono esaminate le principali problematiche progettuali e gli aspetti tecnici relativi al progetto definitivo della galleria naturale “Le Ville”, denominato “SGC Grosseto Fano (E78). Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) – Selci Lama (E45), Adeguamento A 4 Corsie Del Tratto Le Ville - Selci Lama (E45), Lotto 7”.

In particolare nel seguito è riportata una descrizione generale dell'opera, la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso interessato dallo scavo, le fasi esecutive previste per gli avanzamenti in sotterraneo e gli esiti delle analisi numeriche preliminari, condotte attraverso il Metodo delle Differenze Finite, per la verifica degli interventi previsti.

La presente relazione analizza l'esecuzione in sotterraneo del tratto naturale, secondo la seguente metodologia di lavoro:

- Fase conoscitiva: raccolta delle informazioni geologiche e geotecniche sull'area in esame, loro interpretazione e definizione dei parametri geotecnici di progetto;
- Fase di diagnosi: valutazione del comportamento allo scavo dei materiali attraversati in assenza di interventi. Si fa riferimento a 3 classi di comportamento del fronte a seconda dei fenomeni deformativi attesi: A (fronte stabile), B (fronte stabile a breve termine), C (fronte instabile);
- Fase di terapia: si individuano gli interventi idonei per realizzare l'opera in condizioni di sicurezza.

In questa logica si procederà alla definizione di un quadro geologico - geomeccanico (fase conoscitiva), all'individuazione del comportamento dell'ammasso allo scavo (fase di diagnosi) ed alla scelta delle modalità di avanzamento da applicare (fase di terapia).

Attraverso le analisi numeriche si procederà alla modellazione dello scavo delle gallerie in oggetto per verificare l'adeguatezza statica della soluzione progettuale indicata, sia relativamente allo stato tensionale e deformativo indotto nel terreno dallo scavo, sia relativamente alle sollecitazioni risultanti su priverestimenti e rivestimenti definitivi.

2. DESCRIZIONE DELL'OPERA

Per la galleria Le Ville presenta un doppio fornice, la distanza tra gli assi delle gallerie stradali è pari a 30 – 35 m. Sono previsti by pass pedonali e piazzola di sosta.

Di seguito si riporta l'ubicazione degli interventi e la suddivisione tra la galleria artificiale e naturale.

	Galleria Le Ville – Dir Fano		Galleria Le Ville – Dir Grosseto	
	Pk inizio	PK fine	Pk inizio	PK fine
GA	0+850	0+870	0+770	0+795
GN	0+870	2+040	0+795	2+042
GA	2+040	2+080	2+042	2+060

La copertura massima della galleria è pari a circa 70 m.

Nelle seguenti figure sono riportati gli schemi funzionali della galleria in sezione corrente :

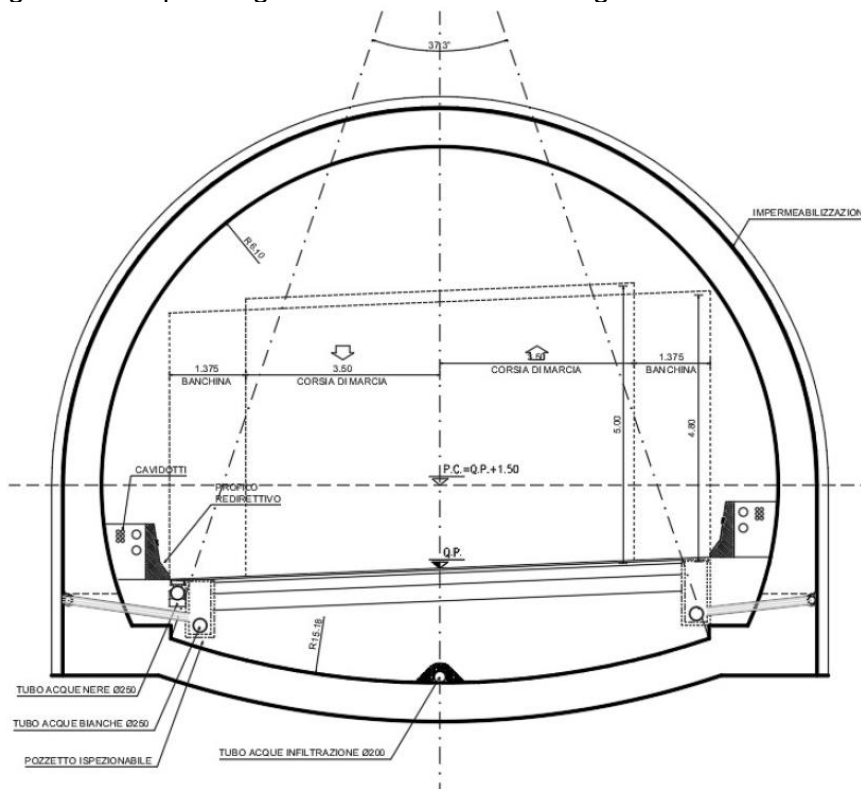


Figura 2-1: Funzionale sezione tipo standard

Per la galleria non sono previste piazzole di sosta in quanto la lunghezza complessiva è inferiore ai 1000m.

PROGETTAZIONE ATI:

3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

3.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nel progetto è stato fatto riferimento alle seguenti Normative ed Istruzioni:

- D.M. 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. “Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.

4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

CALCESTRUZZI

UNI EN 206-1 (2006)

CLS MAGRO

- Classe di resistenza: C12/15

CLS RIVESTIMENTI DEFINITIVI GALLERIE STRADALI UNI EN 206-1 (2021); UNI 11101 (2016)

- Classe di resistenza: C28/35 - C32/40
- Classe di lavorabilità: S4
- Classe di esposizione: XC2 - XA2 (GN Arezzo)
- Rapporto A/C: ≤ 0.5
- Dosaggio minimo di cemento: 340 kg/mc
- Diametro max aggregati: 25mm
- Copriferro armatura principale: 50mm

CLS PROIETTATO

- Destinazione d'uso UNI 10834: temporaneo strutturale (TS)
- Classe di resistenza: C28/35
- Classe di esposizione: XC2 (I)
- Resistenza media su carote $h/\phi = 1$ a 48h: $\geq 15\text{MPa}$
- Contenuto minimo di cemento: 450kg/mc
- Dosaggio fibre: $>15\text{kg/mc}$
- In alternativa fibre di vetro dosaggio minimo 12kg/mc
- In alternativa fibre in polipropilene dosaggio minimo 3.5-4.0kg/mc

PROGETTAZIONE ATI:

FIBRE PER CLS PROIETTATO ACCIAIO

- in filo di acciaio trafilato a freddo $\varnothing \geq 0,5$ mm
- resistenza a trazione ≥ 570 N/mm²
- rapporto di aspetto l/\varnothing compreso tra 50 e 80

ACCIAIO PER ARMATURA CLS, PROFILATI E PIASTRE

BARRE DI ARMATURA: ACCIAIO B450C ad aderenza migliorata

- Tensione caratteristica a rottura, f_{tk} : 540MPa
- Tensione caratteristica di snervamento, f_{yk} : 450MPa

PROFILATI E PIASTRE PER CENTINE: ACCIAIO S275

- Tensione caratteristica di snervamento, f_{yk} : 275MPa
- Bulloni, classe 8.8

TUBI PER INFILAGGI: ACCIAIO S355

- Tensione caratteristica di snervamento, f_{yk} : 355MPa

TUBI IN VETRORESINA

TUBI IN VETRORESINA (VTR) TUBO 60/40 (SPESSORE 10mm)

- Perforazione: $\geq \varnothing 90$ mm
- Contenuto in vetro: $\geq 50\%$
- Resistenza a trazione f_{yk} : ≥ 450 MPa (SECONDO UNI EN 61:1978)
- Resistenza a taglio t : ≥ 150 MPA (SECONDO ASTM D 732 85)
- Modulo elastico E_v : ≥ 20000 MPA (SECONDO SECONDO UNI EN 61:1978)

MISCELE CEMENTIZIE PER CEMENTAZIONE INFILAGGI E CONSOLIDAMENTO FRONTE/CONTORNO

CEMENTAZIONE INFILAGGI

- Classe di resistenza: C20/25
- Rapporto A/C: 0.6-0.8
- Additivo fluidificante antiritiro

INIEZIONE VTR CONSOLIDAMENTO FRONTE E CONTORNO

- Classe di resistenza: C20/25
- Rapporto A/C: 0.6-0.8
- Additivo fluidificante antiritiro

PROGETTAZIONE ATI:

DRENAGGI

- Tubi in PVC, $\varnothing 50/40$ mm, larghezza fessure 1mm, distanza fessure massima:10mm
- Rivestito con tessuto-non-tessuto 500gr/mq

IMPERMEABILIZZAZIONE E DRENAGGIO SEZIONE CORRENTE

TELI IN PVC PER IMPERMEABILIZZAZIONE

- Spessore: 2 ± 0.5 mm
- Peso specifico: 1.3g/cm³
- Resistenza media a trazione: ≥ 15 MPa

TESSUTO NON TESSUTO

- Massa unitaria: 500g/mq
- Spessore: a 2.0kPa 3.8mm, a 200kPa 1.8mm
- Resistenza a punzonamento: 5.0kN
- Resistenza a trazione media: 45kN/m

PROGETTAZIONE ATI:

5. CONTESTO GEOTECNICO E GEOMECCANICO DI RIFERIMENTO (FASE CONOSCITIVA)

5.1 ANALISI DEL TRACCIATO

Gli scavi della galleria interessano la formazione del Macigno – Membro di Molin Nuovo con coperture che raggiungono i 70 m circa.

Sulla base delle formazioni geologiche precedentemente descritte e, in considerazione dell'interpretazione delle indagini e prove a disposizione, sono state definite le seguenti unità geotecniche:

- Unità geotecnica MAC1: formazione del Macigno;
- Unità geotecnica MAC1-Tett: formazione Macigno contatto Tettonico;

5.2 CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

Ai fini della caratterizzazione geomeccanica per la progettazione della galleria, sono stati utilizzati i dati desunti da bibliografia integrati con i parametri ottenuti dai risultati di indagini eseguite in sito e laboratorio. Per maggiori approfondimenti si faccia riferimento alla relazione geomeccanica allegata al progetto.

5.3 RIEPILOGO DELLE TRATTE OMOGENEE

Di seguito si riporta una tabella di sintesi dei campi di variabilità dei parametri rappresentativi di tutte le litologie che interessano la galleria. Tali parametri saranno impiegati nelle analisi preliminari volte alla valutazione del comportamento del fronte e del cavo.

Tabella 5.1: Parametri di resistenza e deformabilità dei tratti in galleria

Domini geomeccanici	Macigno		Macigno -Tett	
	MAC1	MAC1	MAC1-Tett	MAC1-Tett
	Basse Cop	Medie Cop	Basse Cop	Medie Cop
Range Copertura	< 30	30-70	< 30	30-70
Peso di volume (kN/m ³)	24-26	24-26	24-26	24-26
Coesione (kPa)	200-300	300-450	80-100	100-200
Angolo di Attrito (°)	50-52	50-52	34-36	34-36
Modulo di deformabilità (MPa)	3000-5000	3000-5000	500-800	500-800
Coefficiente di Poisson	0.3	0.3	0.3	0.3

6. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI)

Nella fase di diagnosi, sulla base degli elementi raccolti nella fase conoscitiva, si conducono previsioni sul comportamento deformativo del cavo in assenza di interventi, al fine di giungere all'individuazione di tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo suddivise in tre categorie di comportamento fondamentali: di tipo a fronte stabile (CASO A), di tipo a fronte stabile a breve termine (CASO B), di tipo a fronte instabile (CASO C).

Di seguito verrà valutata la stabilità del fronte attraverso le seguenti metodologie:

Metodo delle linee caratteristiche *per alte coperture* $H > (2,5 \div 3)D$

Metodo dell'equilibrio limite *per basse coperture* $H < (2,5 \div 3)D$

6.1 IMPORTANZA DEL FRONTE DI SCAVO

La valutazione di come evolve lo stato tensionale a seguito dell'apertura di una galleria è possibile solo attraverso l'attenta analisi dei fenomeni deformativi, che fornisce utili indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine. In particolare, l'elemento centrale per l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni deformativi al contorno del cavo, attraverso il quale è possibile valutare la stabilità della galleria, è il comportamento del fronte di scavo.

Tale comportamento è condizionato:

- dalle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso connesse con le varie strutture geologiche che interessano le gallerie;
- dai carichi litostatici corrispondenti alle coperture in gioco;
- dalla forma e le dimensioni della sezione di scavo;
- dallo schema di avanzamento;

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente di tre tipi:

- A. Stabile
- B. Stabile a breve termine
- C. Instabile.

Nei paragrafi che seguono si descrivono nel dettaglio i tre casi suddetti.

6.1.1 GALLERIE A FRONTE STABILE (CASO A)

Se il fronte di scavo è stabile, lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico e i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente.

In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile (rimanendo prevalentemente in campo elastico) e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento, se non localizzati ed in misura molto ridotta; il rivestimento definitivo costituirà allora il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

6.1.2 GALLERIE A FRONTE STABILE A BREVE TERMINE (CASO B)

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera le caratteristiche di resistenza meccanica del materiale al fronte, che in tal modo non può più avere un comportamento di tipo elastico, ed assume un comportamento di tipo elasto-plastico.

Tale situazione tensionale produce nell'ammasso roccioso al fronte una decompressione, che porta al superamento della resistenza del materiale e che induce fenomeni deformativi più accentuati del caso precedente.

PROGETTAZIONE ATI:

Questa decompressione può essere opportunamente controllata e regimata con adeguati interventi di preconsolidamento al fronte e/o di preconsolidamento al contorno del cavo. In tal caso verrà fornito l'opportuno contenimento all'ammasso che potrà così essere condotto verso la stabilità ed il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza a lungo termine. In caso contrario lo stato tenso-deformativo potrà evolvere verso situazioni d'instabilità del cavo.

6.1.3 GALLERIE A FRONTE INSTABILE (CASO C)

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad un'accentuazione dei fenomeni deformativi nel campo plastico, che risultano immediati e più rilevanti manifestandosi prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Di conseguenza tali deformazioni producono una decompressione più spinta nell'ammasso roccioso oltre il fronte e conducono ad un decadimento rapido e progressivo delle caratteristiche meccaniche d'ammasso anche a causa della formazione di microfrazioni, talora preesistenti e alla rottura dei legami intermolecolari.

6.2 DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO ADECO RS

In funzione delle coperture previste per ciascun litotipo e dei parametri geomeccanici dell'ammasso interessato dallo scavo della galleria sono state individuate le risposte deformative allo scavo. In particolare, si fa riferimento al metodo delle linee caratteristiche per le sezioni con copertura in calotta superiore a 2.5-3 diametri e al metodo all'equilibrio limite di Tamez per coperture inferiori. Si precisa che le analisi per la determinazione della categoria di comportamento sono state effettuate facendo uso dei parametri di resistenza caratteristici di ogni tratta omogenea e i criteri per la determinazione delle classi di scavo sono derivati dalle indicazioni di letteratura che tengono conto delle incertezze generali legate alla tipologia di opera.

6.2.1 METODO DELLE LINEE CARATTERISTICHE

6.2.1.1 Introduzione

Il metodo delle linee caratteristiche consiste nel simulare lo scavo di una galleria nell'ipotesi di simmetria assiale e di stato di deformazione piana. Lo scavo è rappresentato come una graduale riduzione di una pressione fittizia "p" applicata alle pareti della galleria, tramite cui si simula il progressivo deconfinamento del terreno prodotto dall'avvicinarsi del fronte di scavo alla sezione di calcolo e al successivo avanzamento del fronte stesso, cui corrisponde una convergenza radiale "u" crescente in funzione delle caratteristiche dell'ammasso.

Se la galleria è scavata in assenza di sostegni, il valore finale della pressione di confinamento è pari a 0; in caso contrario, allo stato finale, è presente una pressione di confinamento > 0 che rappresenta la pressione di equilibrio del cavo ottenuta dall'intersezione della linea caratteristica della cavità e dei rivestimenti impiegati. Questa ultima curva, a sua volta, dipende dalle proprietà dei materiali impiegati e dalle deformazioni subite dall'ammasso prima della posa in opera dei sostegni provvisori e quindi, in ultima analisi, è legata al comportamento del fronte di scavo ed al tipo di interventi previsti in avanzamento.

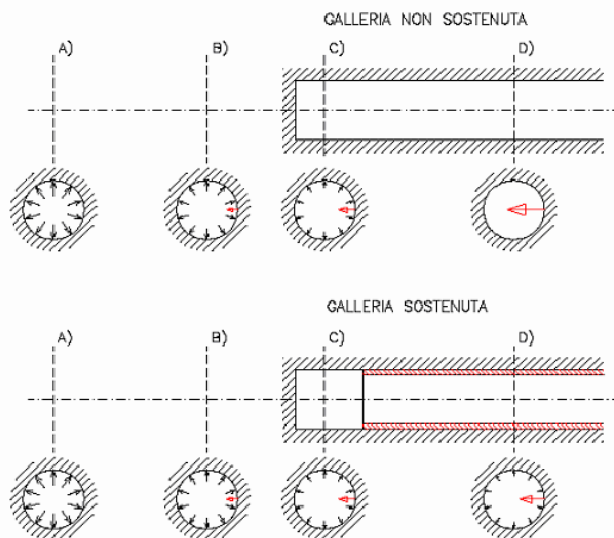


Figura 6-1: Progressivo deconfinamento del cavo per simulare l'avanzamento della galleria

Mediante la sovrapposizione degli effetti delle linee "caratteristiche" della galleria, dei sostegni provvisori e definitivi e del fronte, è possibile ridurre il problema tridimensionale in prossimità del fronte di scavo ad un problema bidimensionale; l'intersezione delle varie curve permette di determinare graficamente il comportamento della galleria allo scavo. È possibile, pertanto, valutare l'andamento delle deformazioni radiali dei diversi elementi della galleria (fronte, cavità, nucleo di terreno al fronte) al variare delle pressioni di contenimento sul contorno del cavo. È stata adottato il metodo proposto da Amberg-Lombardi in base al quale si sono determinate:

1. la linea caratteristica del fronte,
2. la linea caratteristica del cavo,
3. la resistenza del nucleo di terreno situato davanti al fronte ($R_{1/2nucleo}$), definita a partire dal valore di coesione (c) del terreno e dal suo angolo di attrito (ϕ) secondo le seguenti relazioni:

$$R_{1/2nucleo} = c K_p^{0.5}$$

$$K_p = \tan^2(45 + \phi/2)$$

Il terreno è considerato omogeneo ed isotropo, con comportamento elasto-plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb. L'intersezione tra la linea caratteristica del fronte e la linea caratteristica del nucleo individua la condizione di equilibrio del fronte e permette di valutare la convergenza radiale nella sezione in corrispondenza del fronte di scavo (u_f). Tracciando la curva caratteristica del fronte, non solo si ricava il valore " u_f ", tenendo conto del tipo di preconsolidamento eventualmente effettuato in avanzamento dal fronte stesso, ma è anche possibile individuare a priori il comportamento della galleria, distinguendo tra:

- fronte stabile (A)
- stabile a breve termine (B)
- instabile (C)

secondo la classificazione ADECO-RS già presentata nei paragrafi precedenti.

Le condizioni di stabilità del fronte si definiscono in funzione del rapporto tra lo spostamento radiale sul fronte (u_f) ed il raggio della galleria (R_0). In particolare, le categorie ADECO - RS sono state definite secondo quanto indicato nella tabella seguente:

Tabella 6-1: valori di soglia per la determinazione della categoria di comportamento ADECO-RS

u_f/R_0	Categoria ADECO - RS
[%]	[-]
< 0.2	A – Fronte Stabile
0.2 – 0.5	B – Fronte stabile a Breve Termine
> 0.5	C – Fronte instabile

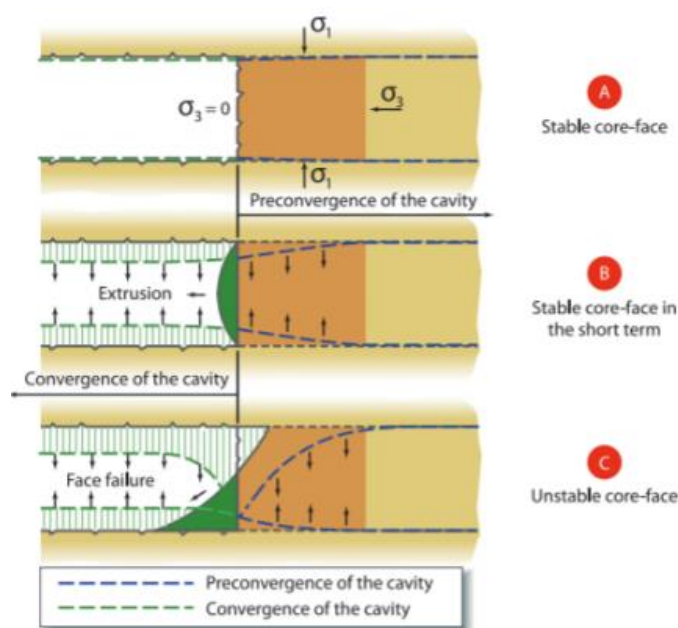


Figura 6-2: Definizione delle categorie di comportamento in riferimento alla stabilità del fronte di scavo

L'analisi delle curve ottenute consente di determinare il comportamento deformativo del cavo e di valutare l'idoneità degli interventi applicati.

Le linee caratteristiche sono riportate in forma grafica nelle pagine che seguono; nei grafici è riportata la curva caratteristica del cavo libero, come previsione sul comportamento del cavo in condizioni intrinseche (non rivestito) e la curva caratteristica del fronte.

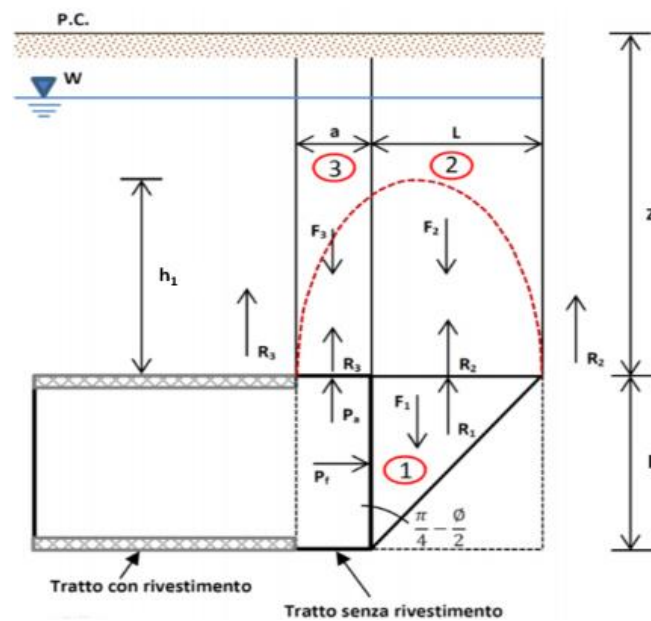
Qualora le linee caratteristiche, valutate in assenza di interventi, abbiano evidenziato elevati valori di convergenze e/o plasticizzazioni al contorno del cavo non gestibili in fase di scavo, si è ipotizzato di adottare, interventi di consolidamento in avanzamento al fronte ed al contorno del cavo.

6.2.1 METODO DELL'EQUILIBRIO LIMITE

6.2.1.1 Introduzione

Nel caso di gallerie con bassa copertura la valutazione della categoria di comportamento del fronte deve tenere conto della natura tridimensionale del problema e dei possibili meccanismi di rottura del terreno a seguito di operazioni di scavo a breve distanza dal piano campagna. Per studiare la stabilità del fronte di scavo è stato applicato nel caso di gallerie superficiali il metodo dell'equilibrio limite proposto da Tamez.

Il metodo tiene conto della riduzione dello stato di confinamento triassiale del nucleo di terreno oltre il fronte per mezzo di un meccanismo di rottura del tipo effetto volta, con il quale il volume di terreno gravante sulla corona della galleria è definito da un paraboloide, approssimato mediante tre solidi prismatici, come illustrato nella figura seguente:



Tale analisi corrisponde alla situazione che dovrebbe verificarsi in corrispondenza degli imbocchi e comunque in condizioni di basse coperture ($Z < (2.5 \div 3)D$).

Il metodo determina le massime tensioni tangenziali che si possono sviluppare sulle facce di ogni prisma senza che avvengano scorrimenti (forze resistenti) e le forze di massa di ogni prisma (forze agenti). Il rapporto tra i momenti delle forze resistenti e delle forze agenti fornisce un coefficiente di sicurezza, denominato FSF (*Face Security Factor*).

Si ricorda la formulazione proposta da Tamez per i terreni coesivi e attritivi; i parametri che intervengono sono:

$$\omega = 45 + \frac{\varphi}{2}$$

$$L = \frac{A}{\operatorname{tg}\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

D = larghezza dello scavo;

A = altezza dello scavo;

H = spessore di terreno gravante sulla calotta della galleria.

a = passo di avanzamento;

PROGETTAZIONE ATI:

c = coesione;
 ϕ = angolo di attrito
 $h_1 = Z$ per gallerie con $Z/D < (2.5 \div 3)$.

Per semplificare i calcoli di verifica il paraboloide viene assimilato a tre prismi aventi volume equivalente, la cui schematizzazione è stata precedentemente riportata, e con questo modello, definite le forze agenti e le forze resistenti, si determina la stabilità del fronte mediante l'espressione generale proposta da Tamez:

$$F_s = \frac{\left[\frac{2 \cdot (\tau_{m2} - \tau_{m3}) + 2 \cdot \tau_{m3}}{\left(1 + \frac{a}{l}\right)^2} \right] \cdot \frac{h_1}{b} + \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\left(1 + \frac{a}{l}\right) \cdot \sqrt{K_A}} \cdot \frac{h_1}{h} + \frac{3.4 \cdot c}{\left(1 + \frac{a}{l}\right)^2 \cdot \sqrt{K_A}}}{\left[1 + \frac{2 \cdot h}{3 \cdot Z \cdot \left(1 + \frac{a}{l}\right)^2} \right] \cdot [\gamma \cdot Z - P_E]}$$

In alcuni casi risulta più gravosa la condizione di stabilità relativa al solo prisma 3, per cui è necessario calcolare anche il seguente coefficiente di sicurezza:

$$F_{S3} = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\gamma \cdot Z - P_E} \left[\frac{h_1}{b} \right] \cdot \left[1 + \frac{b}{a} \right]$$

I parametri τ_{m2} e τ_{m3} rappresentano i valori medi delle tensioni di taglio agenti nel terreno lungo le facce dei prismi.

Bisogna distinguere a questo punto tra gallerie superficiali e gallerie profonde, come già illustrato precedentemente.

Per gallerie superficiali ($Z/D < 2.5$), condizione in cui si trova la galleria in esame, tali parametri sono assunti pari a:

$$\tau_{m2} = c + \frac{K_0}{2} \cdot \left[\frac{3.4 \cdot c}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\gamma - \gamma_w)}{2} \cdot h \right]$$

$$\tau_{m3} = c$$

Al valore di FS definito dall'equilibrio limite è associato un tipo di comportamento al fronte di scavo secondo quanto descritto nella tabella esposta di seguito:

PROGETTAZIONE ATI:

Tabella 6-2: valori di soglia per la determinazione della categoria di comportamento ADECO-RS

	Comportamento del fronte di scavo	Categoria ADECO - RS
FS > 2.0	Elastico	A
1.2 < FS < 2.0	Elasto – plastico	B
FS < 1.2	Incipiente rottura	C

7. SEZIONI TIPO DI AVANZAMENTO E TIPOLOGIE DI INTERVENTO PREVISTE (FASE DI TERAPIA)

7.1 SEZIONI TIPO ADOTTATE

In merito alle modalità di avanzamento delle gallerie è prevista l'adozione dello scavo a piena sezione, dove l'entità degli sfondi è funzione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi attraversati e del loro comportamento allo scavo; tale metodologia di scavo consente il controllo delle deformazioni al contorno del cavo (e conseguentemente dei livelli di plasticizzazione) attraverso l'installazione del priverivestimento a ridosso del fronte. Il rivestimento definitivo di calotta e di arco rovescio sarà gettato ad una distanza funzione dello stato deformativo del priverivestimento e della pressione esercitata dall'ammasso circostante. Quali azioni di "pre-sostegno" in avanzamento al fronte si è previsto l'impiego di elementi strutturali mediante l'applicazione di infilaggi metallici nelle zone di basse coperture per evitare fenomeni di instabilità. Questo assolve alla funzione di "scaricare" il nucleo di scavo riducendo, in combinazione con il trattamento del fronte, i fenomeni estrusivi del nucleo, i valori di pre-convergenza al fronte e conseguentemente controllando lo stato di plasticizzazione dell'ammasso e le pressioni sul cavo. Tale intervento permette di evitare il decadimento dei parametri geomeccanici dell'ammasso verso condizioni residue. Quali azioni di "pre-consolidamento" in avanzamento al contorno del cavo si sono previsti elementi in VTR cementati in foro. Dovranno inoltre essere previsti drenaggi in avanzamento nelle tratte ove è presente il rischio di venute d'acqua. I rivestimenti sono previsti in calcestruzzo non armato o armato, a seconda delle condizioni geomeccaniche riscontrate. A tergo dei rivestimenti definitivi di calotta e piedritto si porrà in opera l'impermeabilizzazione, costituita da uno strato di geotessuto e da un telo in PVC. Le sezioni tipo di avanzamento prevedono gli interventi descritti nei paragrafi che seguono, intesi quali quantità medie, da calibrare in funzione del comportamento deformativo riscontrato allo scavo attraverso l'analisi delle misure e dei rilievi di un apposito monitoraggio, descritto nei successivi capitoli.

7.1.1 SEZIONI TIPO A0

	Sezione	A0
	Tipo	Circolare
	Campo di scavo	-
Pre sostegno	Bullonatura radiale	
	Infilaggi metallici	
	VTR al fronte	
	VTR al contorno	
Rivestimento di I fase	Centine	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN140 ad interasse 1.0 m
	Spritz beton	spritz beton fibrorinforzato di spessore 15 cm
	Impermeabilizzazione con telo in PVC e TNT	✓
Rivestimento di II fase	Arco rovescio	0.7
	Calotta	0.6
	Piedritti	0.6

PROGETTAZIONE ATI:

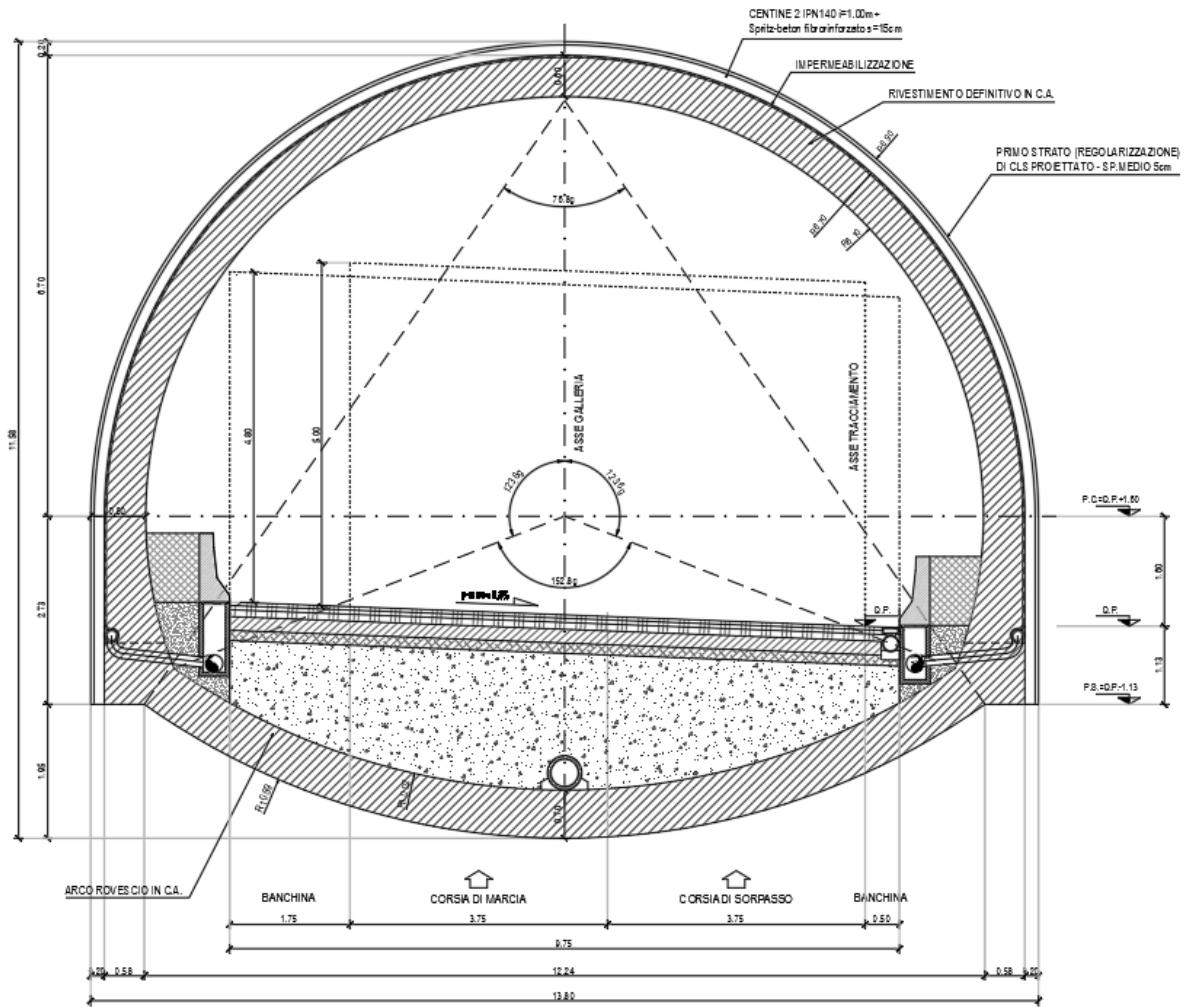


Figura 7-1: Sezione tipo A0

PROGETTAZIONE ATI:

7.1.2 SEZIONI TIPO B0 – B0v

	Sezione	B0	B0v
	Tipo	Circolare	Troncoconica
	Campo di scavo	-	8
Pre sostegno	Bullonatura radiale		
	Infilaggi metallici		presostegno al contorno con n. 41 tubi metallici ϕ 139.7 sp.10 mm, L = 14m, sovrapposizione 6m
	VTR al fronte		
	VTR al contorno		
Rivestimento di I fase	Centine	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN180 ad interasse 1.2 m	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN180 ad interasse 1 m
	Spritz beton	spritz beton fibrorinforzato di spessore 20 cm	spritz beton fibrorinforzato di spessore 20 cm
	Impermeabilizzazione con telo in PVC e TNT	✓	✓
Rivestimento di II fase	Arco rovescio	0.9	1.0
	Calotta	0.8	0.5-1.2
	Piedritti	0.8	0.5-1.2

PROGETTAZIONE ATI:

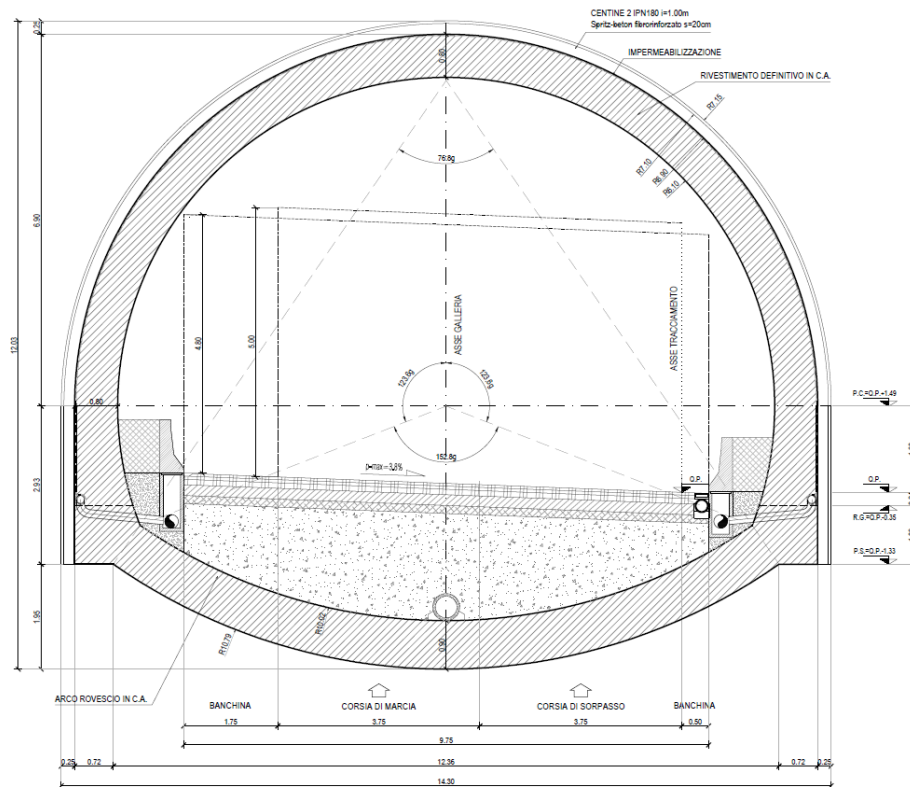


Figura 7-2: Sezione tipo B0

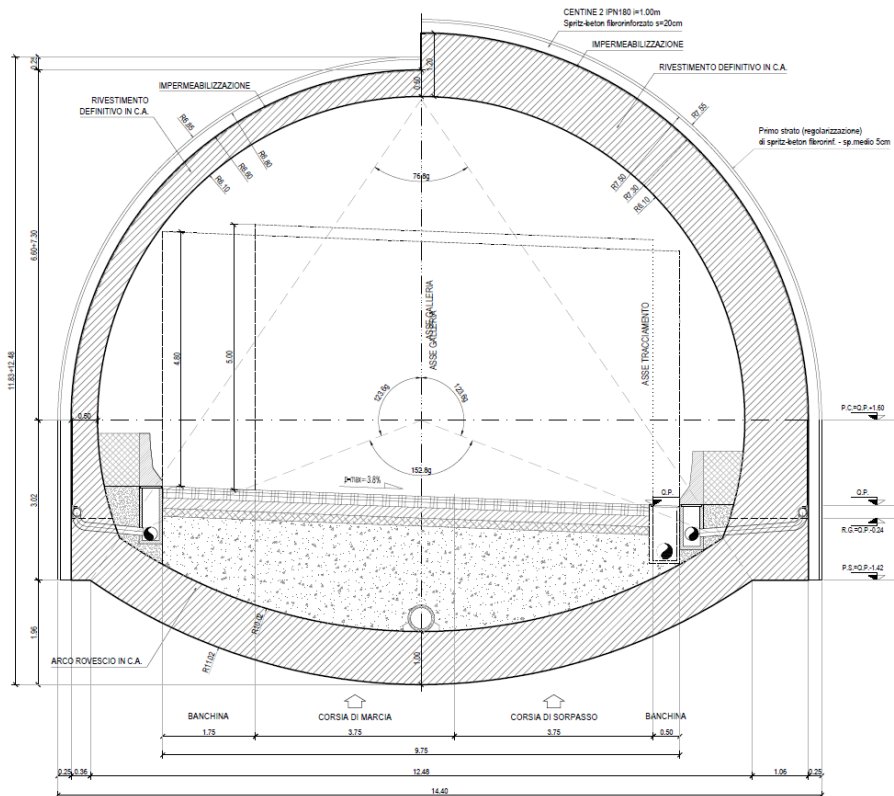


Figura 7-3: Sezione tipo B0v

PROGETTAZIONE ATI:

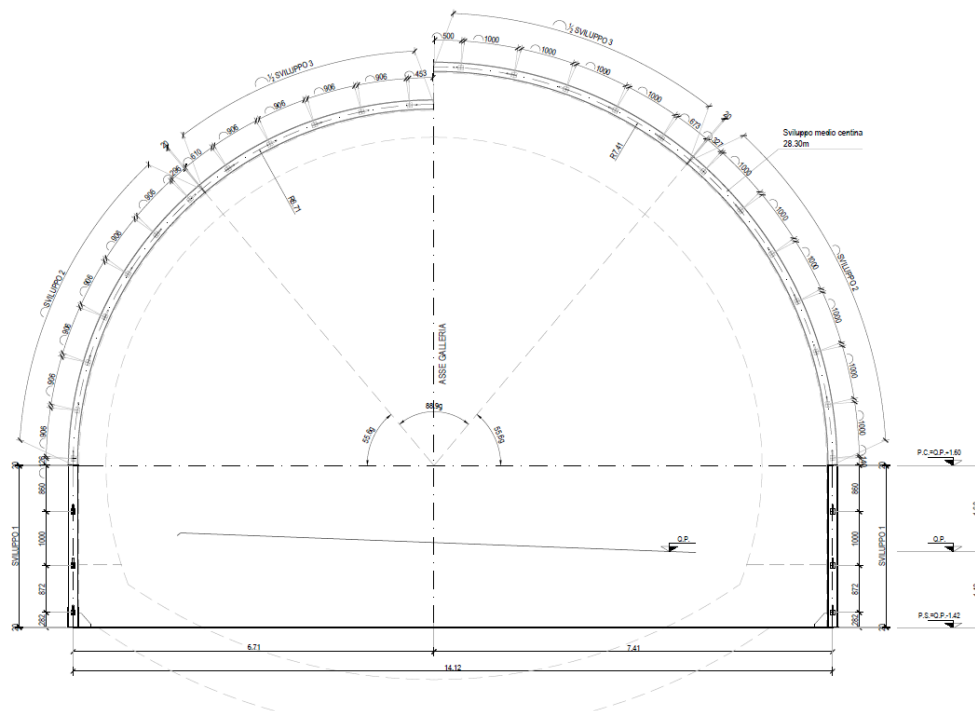


Figura 7-4: Sezione tipo B0v – Infilaggi metallici

7.1.3 SEZIONI TIPO B2V

	Sezione	B2v
	Tipo	Troncoconica
	Campo di scavo	8
Pre sostegno	Bullonatura radiale	
	Infilaggi metallici	presostegno al contorno con n. 41 tubi metallici \varnothing 139.7 sp.10 mm, L = 14m, sovrapposizione 6m
	VTR al fronte	preconsolidamento al fronte costituito da n. 61 VTR cementati in foro di lunghezza L = 14m, sovrapposizione 6m
	VTR al contorno	
Rivestimento di I fase	Centine	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN200 ad interasse 1 m

PROGETTAZIONE ATI:

	Spritz beton	spritz beton fibrorinforzato di spessore 25 cm
	Impermeabilizzazione con telo in PVC e TNT	✓
Rivestimento di II fase	Arco rovescio	0.9
	Calotta	0.5-1.2
	Piedritti	0.5-1.2

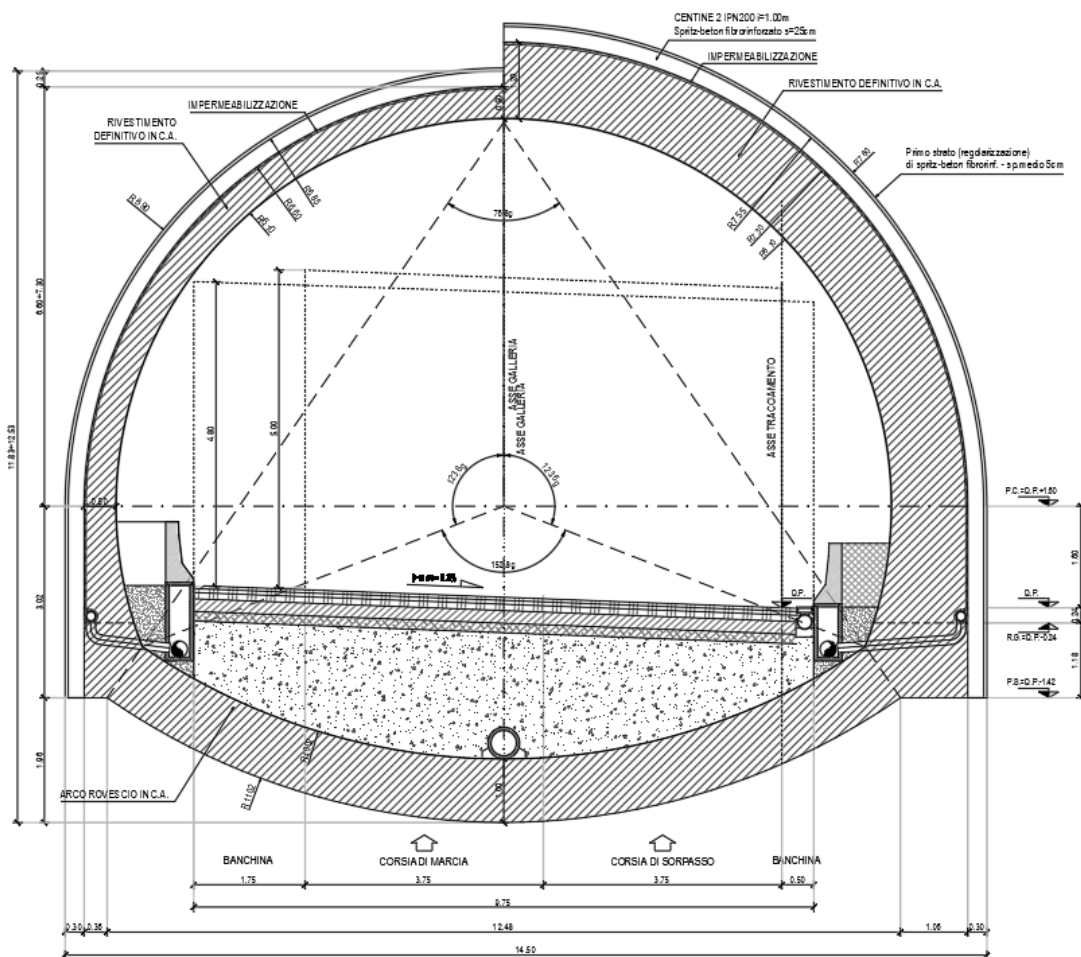


Figura 7-5: Sezione tipo B2v

PROGETTAZIONE ATI:

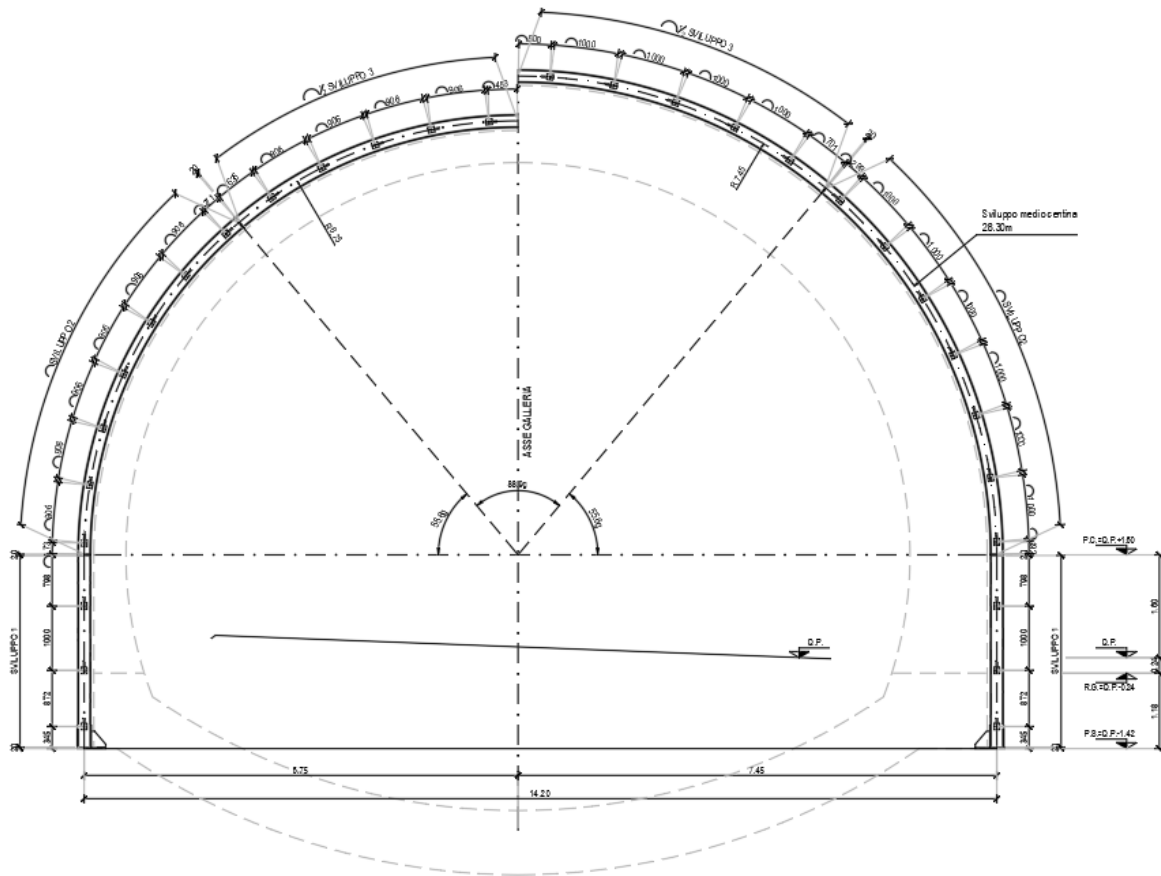


Figura 7-6: Sezione tipo B2v – Infilaggi metallici

PROGETTAZIONE ATI:

7.1.4 SEZIONI TIPO PZ

	Sezione	Pz
	Tipo	Cilindrica
	Campo di scavo	8
Pre sostegno	Bullonatura radiale	
	Infilaggi metallici	
	VTR al fronte	
	VTR al contorno	
Rivestimento di I fase	Centine	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN220 ad interasse 1 m
	Spritz beton	spritz beton fibrorinforzato di spessore 25 cm
	Impermeabilizzazione con telo in PVC e TNT	✓
Rivestimento di II fase	Arco rovescio	0.9
	Calotta	1.0-1.7
	Piedritti	1.0-1.4

PROGETTAZIONE ATI:

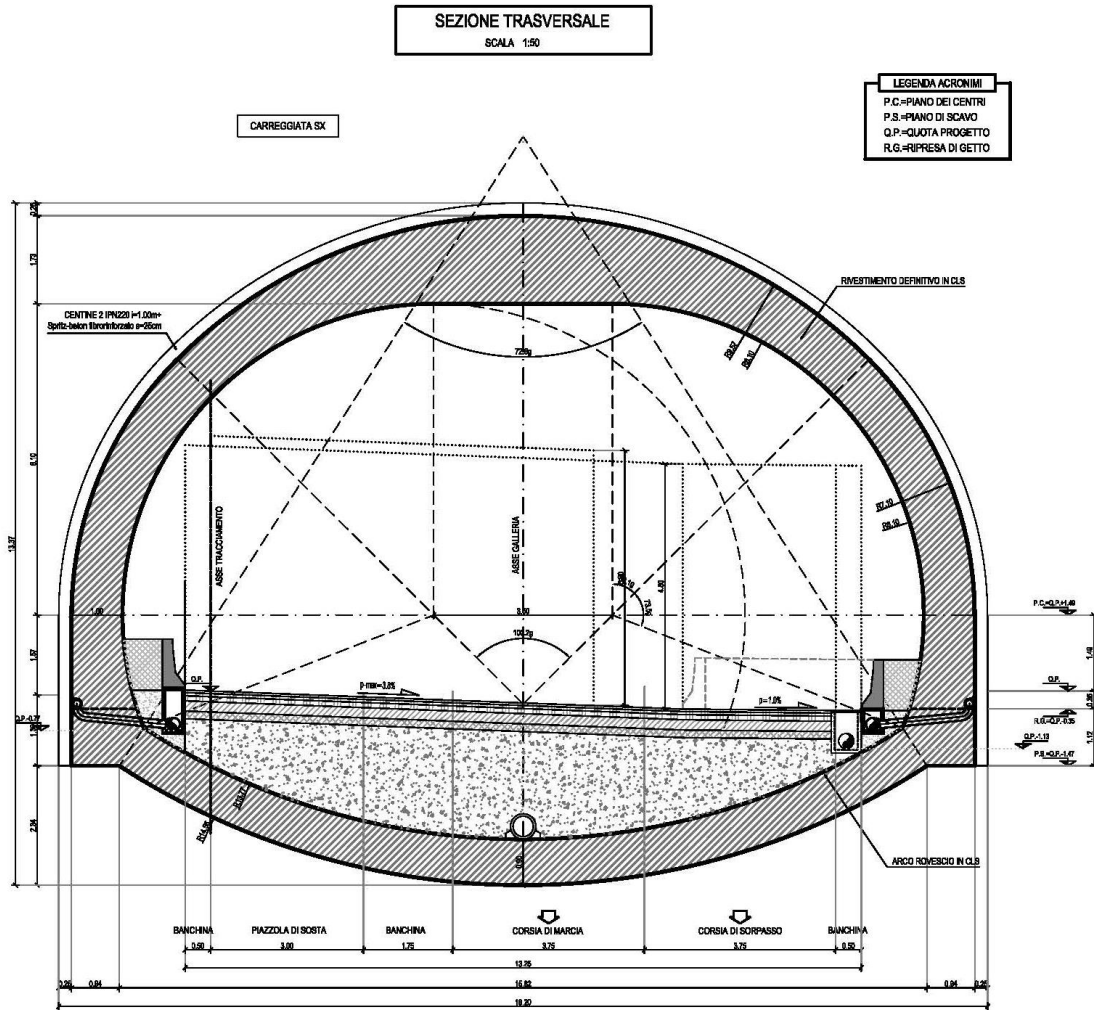


Figura 7-7: Sezione tipo Pz

7.1.6 SEZIONI TIPO PZ-TR

	Sezione	PZ-TR
	Tipo	Troncoconica
	Campo di scavo	8
Pre sostegno	Bullonatura radiale	
	Infilaggi metallici	presostegno al contorno con n. 71 tubi metallici \varnothing 139.7 sp.10 mm, L = 15m, sovrapposizione 5m
	VTR al fronte	preconsolidamento al fronte costituito da n. 78 VTR cementati in foro di lunghezza L = 15m, sovrapposizione 5m
	VTR al contorno	
Rivestimento di I fase	Centine	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN220 ad interasse 1 m
	Spritz beton	spritz beton fibrorinforzato di spessore 25 cm
	Impermeabilizzazione con telo in PVC e TNT	✓
Rivestimento di II fase	Arco rovescio	0.9
	Calotta	0.6-2.0
	Piedritti	0.6-1.5

PROGETTAZIONE ATI:

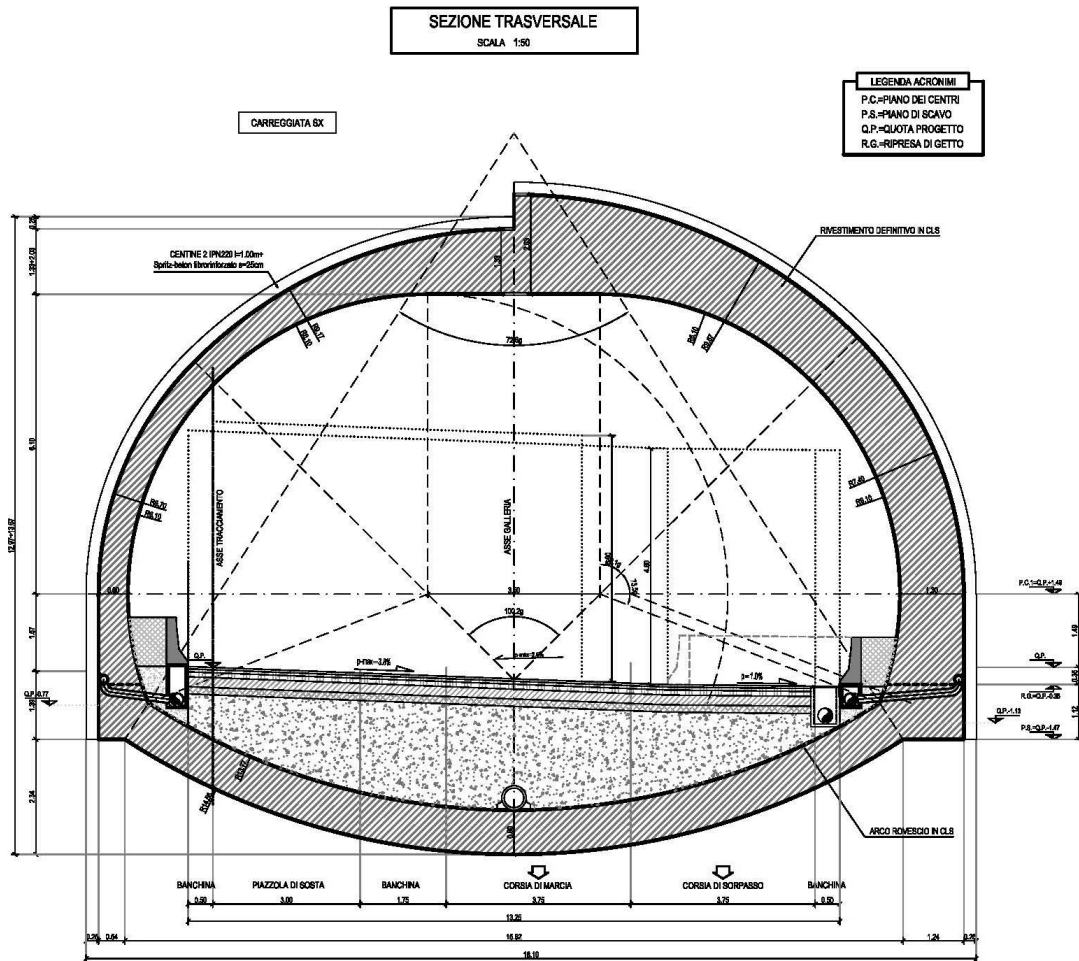


Figura 7-8: Sezione tipo Pz-TR

PROGETTAZIONE ATI:

7.1.8 SEZIONI TIPO BY-PASS

	Sezione	By-Pass
	Tipo	Cilindrica
	Campo di scavo	-
Pre sostegno	Bullonatura radiale	
	Infilaggi metallici	
	VTR al fronte	
	VTR al contorno	
Rivestimento di I fase	Centine	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN180 ad interasse 1 m
	Spritz beton	spritz beton fibrorinforzato di spessore 20 cm
	Impermeabilizzazione con telo in PVC e TNT	✓
Rivestimento di II fase	Arco rovescio	0.7
	Calotta	0.6
	Piedritti	0.6-1.0

PROGETTAZIONE ATI:

SEZIONE TRASVERSALE

SCALA 1:50

LEGENDA ACRONIMI

P.C.=PIANO DEI CENTRI
P.S.=PIANO DI SCAVO
Q.P.=QUOTA PROGETTO
R.G.=RIPRESA DI GETTO

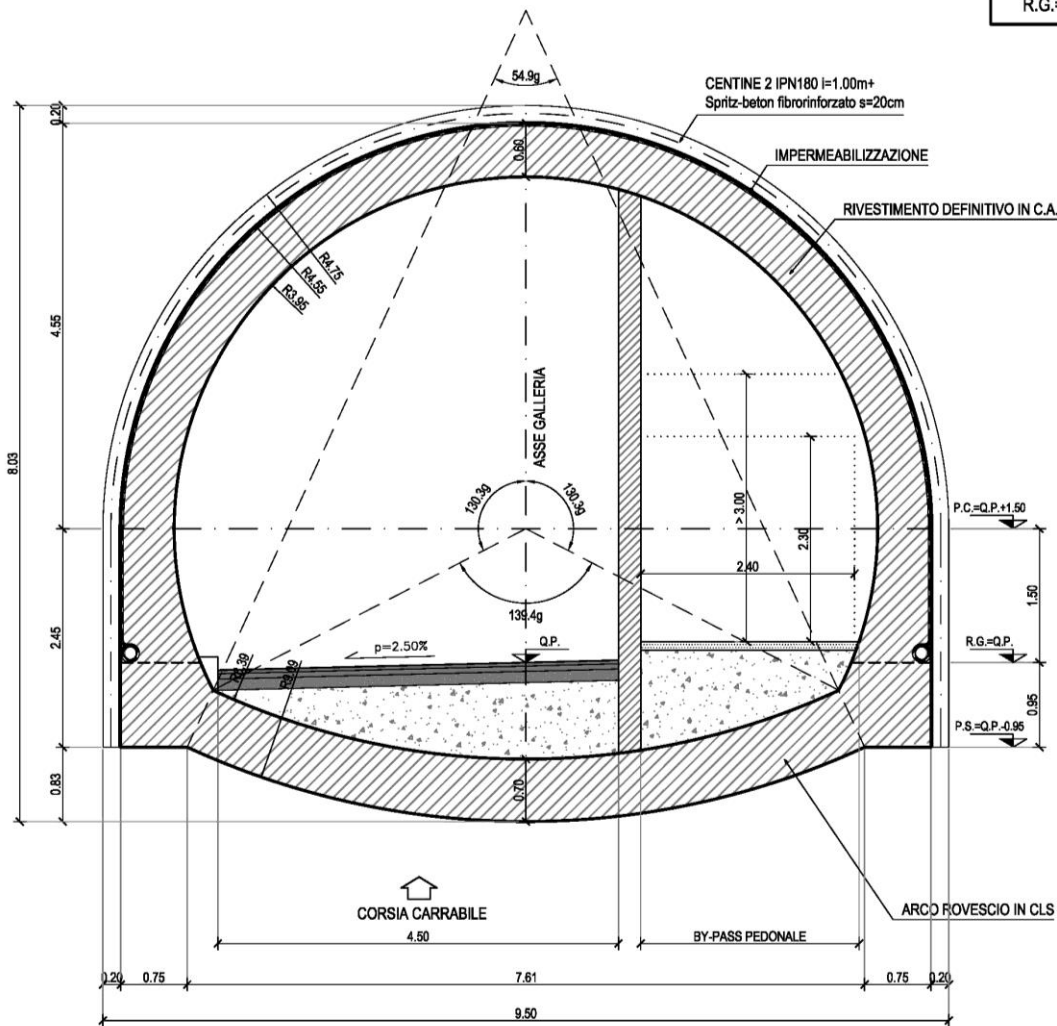


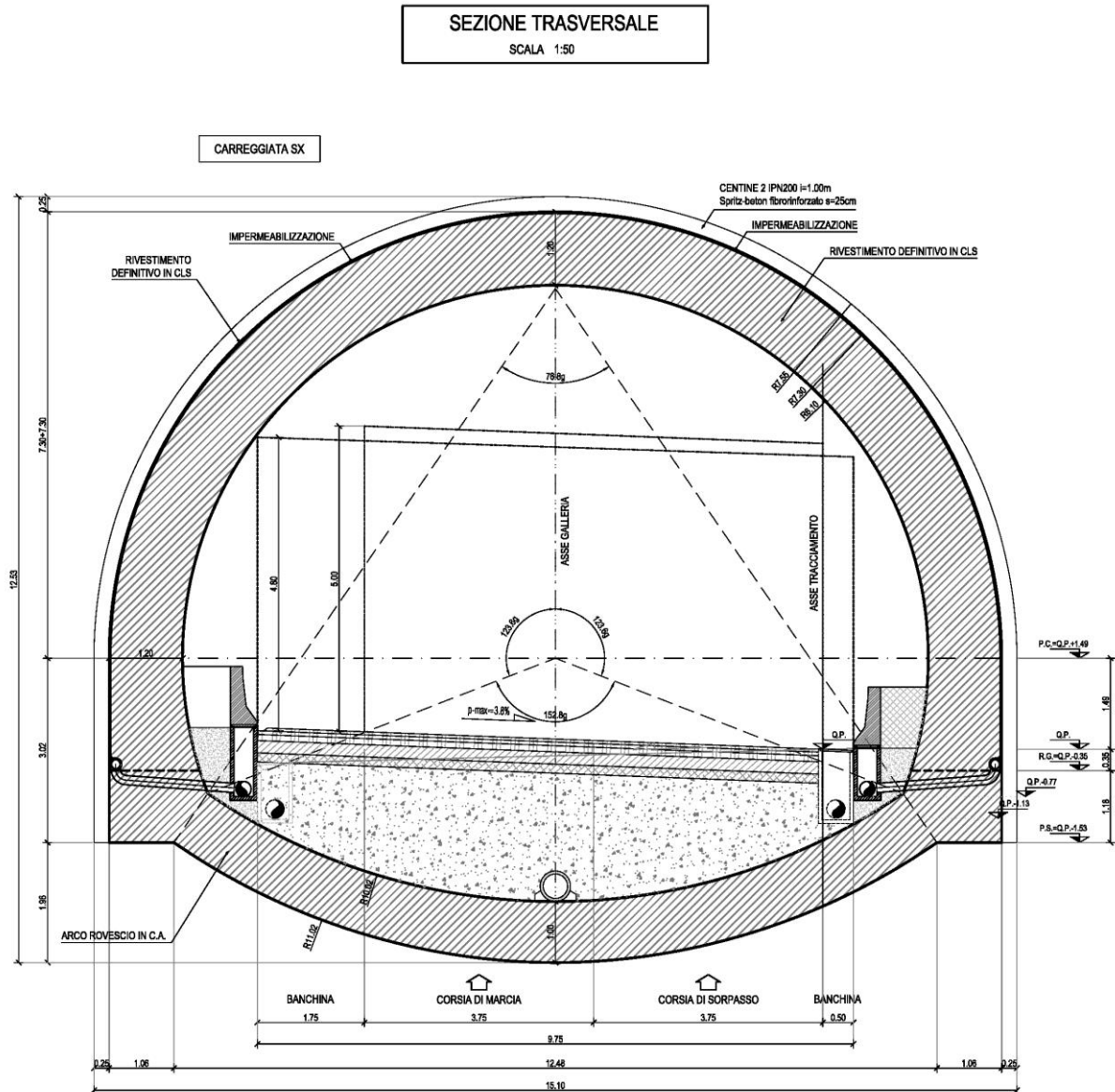
Figura 7-9: Sezione tipo By-Pass

PROGETTAZIONE ATI:

7.1.10 SEZIONI TIPO CONCIO D'ATTACCO

	Sezione	Concio D'Attacco
	Tipo	Cilindrica
	Campo di scavo	8
Pre sostegno	Bullonatura radiale	
	Infilaggi metallici	presostegno al contorno con n. 39 tubi metallici \varnothing 139.7 sp.10 mm, L = 16m, sovrapposizione 6m
	VTR al fronte	preconsolidamento al fronte costituito da n. 65 VTR cementati in foro di lunghezza L = 18m, sovrapposizione 8m
	VTR al contorno	
Rivestimento di I fase	Centine	sostegno di prima fase costituito da n. 2 centine IPN200 ad interasse 1 m
	Spritz beton	spritz beton fibrorinforzato di spessore 25 cm
	Impermeabilizzazione con telo in PVC e TNT	✓
Rivestimento di II fase	Arco rovescio	1.0
	Calotta	1.2
	Piedritti	1.2-1.6

PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:

7.2 INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO IN AVANZAMENTO AL FRONTE E AL CONTORNO DI SCAVO

Per le analisi effettuate, si evidenzia in alcune tratte un comportamento di tipo plastico o al limite elasto-plastico, pertanto si rende necessaria l'adozione di interventi di preconsolidamento e precontenimento, allo scopo di controllare il detensionamento dell'ammasso e la risposta deformativa dello stesso, in modo che l'effetto arco non si allontani dal profilo di scavo e che il cavo venga condotto verso condizioni di stabilità.

Tale azione può essere operata in particolare controllando la tensione minore σ_3 in corrispondenza del fronte, mediante interventi di consolidamento in avanzamento con elementi strutturali in vetroresina (interventi di precontenimento) e adottando, a protezione del cavo, interventi di pre-sostegno costituiti da infilaggi metallici.

Si realizza in tal modo un irrigidimento del nucleo d'avanzamento, prevenendo i fenomeni di estrusione e contenendo i conseguenti fenomeni deformativi entro valori ammissibili, permettendo di mantenere l'ammasso il più possibile in campo elastico.

Le analisi di stabilità del fronte di scavo sono mirate alla valutazione dello sviluppo di possibili meccanismi di collasso, con o senza propagazione verso la superficie, o di deformazioni e spostamenti elevati al contorno ed in superficie. Trattandosi di una verifica per uno stato limite ultimo di tipo GEO, si è utilizzato l'Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R2), con $R2 = 1$ (NTC 2018 § 6.7), mentre per le verifiche degli infilaggi metallici in avanzamento dal fronte, essendo una verifica di tipo STR, si è utilizzato l'approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1).

7.2.1 VERIFICHE DI CONSOLIDAMENTO AL FRONTE

Per le sezioni a basse coperture, l'efficacia dei consolidamenti al fronte viene valutata attraverso il metodo di Tamez-Cornejo, mentre per le alte coperture sono state adottate soluzioni derivanti dai teoremi dell'analisi limite (teoremi dell'estremo inferiore).

Le analisi sono state condotte sulle tratte omogenee più sfavorevoli in termini di resistenza e deformabilità e sono rappresentative per altre zone dove è richiesto tale intervento. Nelle analisi è stata considerata la copertura media della tratta e i relativi parametri di resistenza.

7.2.2 ANALISI PER LE BASSE COPERTURE – SEZ B2V

Per le basse coperture è stata analizzata la sezione B2v, nelle condizioni geomeccaniche più sfavorevoli.

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez - GN

STRATIGRAFIA

N° strati SOPRA la calotta **1** (max 6)

N° strati SOTTO la calotta **1** (max 6)

DM	2018
γ_c	1.25
γ_ϕ	1.25

Strati SOPRA la calotta

Strato n°	Spessore [m]	γ [KN/m ³]	C_d [KPa]	ϕ_d [°]
1	30	25	48	28
			0	0
			0	0
			0	0
			0	0

Strati SOTTO la calotta

Strato n°	Spessore [m]	γ [KN/m ³]	C_d [KPa]	ϕ_d [°]
1	13.8	25	48	28
			0	0
			0	0
			0	0
			0	0

Altezza P.C.-AR [m] 43.8

Altezza galleria [m] 13.8

w profondità falda da piano campagna [m] **100**

γ_w peso acqua [KN/m³] 10

PARAMETRI GEOMETRICI

Area della sezione di scavo [m ²]	165
b larghezza del tunnel [m]	13.8
h altezza del tunnel [m]	13.8
z profondità calotta [m]	30
a avanzamento senza sostegno [m]	1.2
Deq diametro equivalente [m]	14.49
Bassa copertura => Z < 2.5D	

h1 altezza del prisma al di sopra della calotta [m]	30
I parametro geometrico paraboloide [m]	8.23
B parametro geometrico paraboloide [m]	30.27
z-w parametro geometrico [m]	-70.00
z-w-h1 parametro geometrico [m]	0.00
z-h1 parametro geometrico [m]	0.00

PARAMETRI DEL MATERIALE

γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³]	25.00
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°]	28.35
c_1 coesione media fronte (cuneo 1) [KPa]	48.00
K_0_1 spinta a riposo fronte (cuneo 1)	0.53
K_A_1 coefficiente $0,5 < K_A < 1$ (cuneo 1)	0.36
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³]	25.00
ϕ_m angolo medio (globale) [°]	28.35
c_m coesione media (globale) [KPa]	48.00
K_0_m spinta a riposo (globale)	0.53
K_A_m coefficiente $0,5 < K_A < 1$ (globale)	0.36

γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³]	25.00
ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°]	28.35
c_{2-3} coesione media (cunei 2-3) [KPa]	48.00
K_0_{2-3} spinta a riposo media (cunei 2-3)	0.53
K_A_{2-3} coefficiente $0,5 < K_A < 1$ (cuneo 2-3)	0.36
γ_{dw-2-3} peso medio (sotto falda) [KN/m ³]	0.00
γ_{uw-2-3} peso medio (sopra falda) [KN/m ³]	25.00
$\gamma_{(z-w)-h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³]	10.00
U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa]	0

CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA

FRONTE INSTABILE	Materiale stratificato
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]	92.64
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]	48.00
FS (mezzo con coesione e angolo di attrito)	0.941
FS ₃ (mezzo con coesione e angolo di attrito)	3.478
FSF	0.941
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]	0

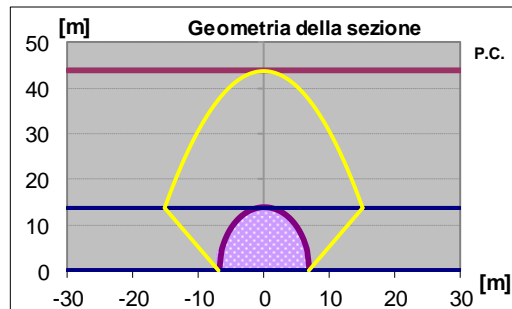


Figura 7-11: Analisi di stabilità del fronte senza interventi di consolidamento

PROGETTAZIONE ATI:

<u>Caratteristiche dei VTR</u>			
N_{vtr}	[-]	65	Numero dei VTR
L_{sovr}	[m]	6	Lunghezza utile o di sovrapposizione dei VTR
$D_{perforazione}$	[m]	0.16	Diametro di perforazione
Elemento in VTR	[-]	Circolare cavo	Tipologia di VTR
$D_{interno}$	[mm]	40	Diametro interno del VTR
$D_{esterno}$	[mm]	60	Diametro esterno del VTR
A_{VTR}	[m ²]	0.001570796	Area di un elemento in VTR
<u>Resistenze ultime dell'elemento</u>			
$\tau_{m.c.-terreno}$	[KPa]	100	Resistenza limite miscela cementizia-terreno
$\tau_{m.c.-vtr}$	[KPa]	250	Resistenza limite miscela cementizia-VTR
f_{yk}	[MPa]	450	Resistenza a trazione della sezione del VTR
T_1	[KN]	302	Resistenza ultima allo sfilamento miscela-terreno
T_2	[KN]	283	Resistenza ultima allo sfilamento miscela-VTR
T_3	[KN]	471	Limite di rottura del materiale
T_{max}	[KN]	283	Tiro massimo sopportabile
$\Delta\sigma_3=PE$	[KPa]	129	Incremento di pressione applicata al fronte
FS	[KPa]	1.67	Fattore di sicurezza sull'elemento strutturale
Δc	[KPa]	108	Incremento di coesione applicata al fronte

Figura 7-12: Calcolo dei VTR

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez - GN											
STRATIGRAFIA											
N° strati SOPRA la calotta		1	(max 6)								
N° strati SOTTO la calotta		1	(max) 6								
DM	2018										
γ_c	1.25										
γ_ϕ	1.25										
Strati SOPRA la calotta					Strati SOTTO la calotta						
Strato	Spessore	γ	C_d	ϕ_d	Strato	Spessore	γ	C_d	ϕ_d		
n°	m	KN/m ³	KPa	°	n°	m	KN/m ³	KPa	°		
1	30	25	48	28.4	1	13.8	25	48	28.4		
	0	0	0	0		0	0	0	0		
	0	0	0	0		0	0	0	0		
	0	0	0	0		0	0	0	0		
	0	0	0	0		0	0	0	0		
	0	0	0	0		0	0	0	0		
	0	0	0	0		0	0	0	0		
Altezza P.C.-AR [m]			43.8			Altezza galleria [m]			13.8		
w profondità falda da piano campagna [m]			100			γ_w peso acqua [KN/m ³]			10		
PARAMETRI GEOMETRICI											
Area della sezione di scavo [m ²]			165			h1 altezza del prisma al di sopra della calotta [m]			30		
b larghezza del tunnel [m]			13.8			l parametro geometrico paraboloide [m]			8.23		
h altezza del tunnel [m]			13.8			B parametro geometrico paraboloide [m]			30.27		
z profondità calotta [m]			30			z-w parametro geometrico [m]			-70.00		
a avanzamento senza sostegno [m]			1.2			z-w-h1 parametro geometrico [m]			0.00		
Deq diametro equivalente [m]			14.49			z-h1 parametro geometrico [m]			0.00		
Bassa copertura => Z < 2.5D											
PARAMETRI DEL MATERIALE											
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³]			25.00			γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³]			25.00		
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°]			28.35			ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°]			28.35		
c_1 coesione media fronte (cuneo 1) [KPa]			48.00			c_{2-3} coesione media (cunei 2-3) [KPa]			48.00		
K_{01} spinta a riposo fronte (cuneo 1)			0.53			K_{02-3} spinta a riposo media (cunei 2-3)			0.53		
K_{A1} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 1)			0.36			K_{A2-3} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 2-3)			0.36		
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³]			25.00			γ_{dw2-3} peso medio (sotto falda) [KN/m ³]			0.00		
ϕ_m angolo medio (globale) [°]			28.35			γ_{uw2-3} peso medio (sopra falda) [KN/m ³]			25.00		
c_m coesione media (globale) [KPa]			48.00			$\gamma_{(z-w)-h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³]			10.00		
K_{0m} spinta a riposo (globale)			0.53			U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa]			0		
K_{Am} coefficiente 0,5<K _A <1 (globale)			0.36								
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA											
FRONTE STABILE		Materiale stratificato									
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]		92.64									
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]		48.00									
FS (mezzo con coesione e angolo di attrito)		1.14									
FS ₃ (mezzo con coesione e angolo di attrito)		3.48									
FSF		1.14									
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]		129									

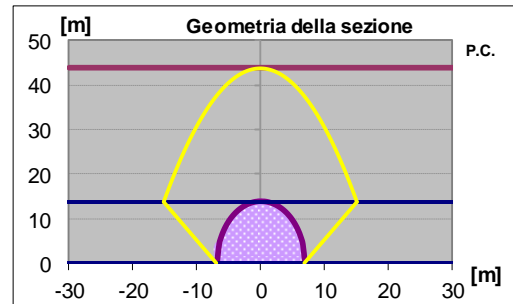


Figura 7-13: Analisi di stabilità del fronte con interventi di consolidamento

7.2.3 ANALISI PER LE BASSE COPERTURE – SEZ PZ-TR

Per le basse coperture è stata analizzata la sezione PZ-TR, nelle condizioni geomeccaniche più sfavorevoli.

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez - GN				
STRATIGRAFIA				
N° strati SOPRA la calotta	1 (max 6)			
N° strati SOTTO la calotta	1 (max 6)			
DM	2018			
γ_c	1.25			
γ_ϕ	1.25			
Strati SOPRA la calotta				
Strato	Spessore	γ	C_d	ϕ_d
n°	m	KN/m ³	KPa	°
1	30	25	48	28
			0	0
			0	0
			0	0
			0	0
			0	0
Altezza P.C.-AR [m]		43.8		
w profondità falda da piano campagna [m]		100		
Strati SOTTO la calotta				
Strato	Spessore	γ	C_d	ϕ_d
n°	m	KN/m ³	KPa	°
1	13.8	25	48	28
			0	0
			0	0
			0	0
			0	0
			0	0
Altezza galleria [m]		13.8		
γ_w peso acqua [KN/m ³]		10		
PARAMETRI GEOMETRICI				
Area della sezione di scavo [m ²]	192.62			
b larghezza del tunnel [m]	18			
h altezza del tunnel [m]	13.8			
z profondità calotta [m]	30			
a avanzamento senza sostegno [m]	1.2			
Deq diametro equivalente [m]	15.66			
Bassa copertura => Z < 2.5D				
h1 altezza del prisma al di sopra della calotta [m]	30			
l parametro geometrico paraboloide [m]	8.23			
B parametro geometrico paraboloide [m]	34.47			
z-w parametro geometrico [m]	-70.00			
z-w-h1 parametro geometrico [m]	0.00			
z-h1 parametro geometrico [m]	0.00			
PARAMETRI DEL MATERIALE				
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³]	25.00			
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°]	28.35			
c ₁ coesione media fronte (cuneo 1) [KPa]	48.00			
K_{0_1} spinta a riposo fronte (cuneo 1)	0.53			
K_{A_1} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 1)	0.36			
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³]	25.00			
ϕ_m angolo medio (globale) [°]	28.35			
c _m coesione media (globale) [KPa]	48.00			
K_{0_m} spinta a riposo (globale)	0.53			
K_{A_m} coefficiente 0,5<K _A <1 (globale)	0.36			
γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³]	25.00			
ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°]	28.35			
c ₂₋₃ coesione media (cunei 2-3) [KPa]	48.00			
K_{0_2-3} spinta a riposo media (cunei 2-3)	0.53			
K_{A_2-3} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 2-3)	0.36			
γ_{dw_2-3} peso medio (sotto falda) [KN/m ³]	0.00			
γ_{uw_2-3} peso medio (sopra falda) [KN/m ³]	25.00			
$\gamma_{(z-w)-h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³]	10.00			
U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa]	0			
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA				
FRONTE INSTABILE	Materiale stratificato			
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]	92.64			
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]	48.00			
FS (mezzo con coesione e angolo di attrito)	0.851			
FS ₃ (mezzo con coesione e angolo di attrito)	3.413			
FSF	0.851			
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]	0			

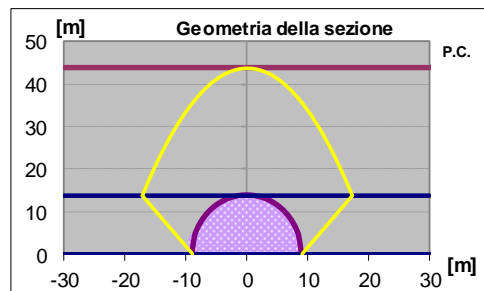


Figura 7-14: Analisi di stabilità del fronte senza interventi di consolidamento

PROGETTAZIONE ATI:

<i>Caratteristiche dei VTR</i>			
N_{VTR}	[-]	78	Numero dei VTR
L_{sovr}	[m]	6	Lunghezza utile o di sovrapposizione dei VTR
$D_{perforazione}$	[m]	0.16	Diametro di perforazione
Elemento in VTR	[-]	Circolare cavo	Tipologia di VTR
$D_{interno}$	[mm]	40	Diametro interno del VTR
$D_{esterno}$	[mm]	60	Diametro esterno del VTR
A_{VTR}	[m ²]	0.001570796	Area di un elemento in VTR
<i>Resistenze ultime dell'elemento</i>			
$\tau_{m.c.-terreno}$	[KPa]	100	Resistenza limite miscela cementizia-terreno
$\tau_{m.c.-vtr}$	[KPa]	250	Resistenza limite miscela cementizia-VTR
f_{yk}	[MPa]	450	Resistenza a trazione della sezione del VTR
T_1	[KN]	302	Resistenza ultima allo sfilamento miscela-terreno
T_2	[KN]	283	Resistenza ultima allo sfilamento miscela-VTR
T_3	[KN]	471	Limite di rottura del materiale
T_{max}	[KN]	283	Tiro massimo sopportabile
$\Delta\sigma_3=PE$	[KPa]	155	Incremento di pressione applicata al fronte
FS	[KPa]	1.67	Fattore di sicurezza sull'elemento strutturale
Δc	[KPa]	130	Incremento di coesione applicata al fronte

Figura 7-15: Calcolo dei VTR

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez - GN									
STRATIGRAFIA									
N° strati SOPRA la calotta		1		(max 6)					
N° strati SOTTO la calotta		1		(max 6)					
DM	2018								
γ_c	1.25								
γ_ϕ	1.25								
Strati SOPRA la calotta					Strati SOTTO la calotta				
Strato	Spessore	γ	C_d	ϕ_d	Strato	Spessore	γ	C_d	ϕ_d
n°	m	KN/m ³	KPa	°	n°	m	KN/m ³	KPa	°
1	30	25	48	28.4	1	13.8	25	48	28.4
	0	0	0	0		0	0	0	0
	0	0	0	0		0	0	0	0
	0	0	0	0		0	0	0	0
	0	0	0	0		0	0	0	0
	0	0	0	0		0	0	0	0
	0	0	0	0		0	0	0	0
Altezza P.C.-AR [m]					43.8				
w profondità falda da piano campagna [m]					100				
Altezza galleria [m]					13.8				
γ_w peso acqua [KN/m ³]					10				
PARAMETRI GEOMETRICI									
Area della sezione di scavo [m ²]		192.62							
b larghezza del tunnel [m]		18							
h altezza del tunnel [m]		13.8							
z profondità calotta [m]		30							
a avanzamento senza sostegno [m]		1.2							
Deq diametro equivalente [m]		15.66							
Bassa copertura => Z < 2.5D									
h1 altezza del prisma al di sopra della calotta [m]		30							
l parametro geometrico paraboloide [m]		8.23							
B parametro geometrico paraboloide [m]		34.47							
z-w parametro geometrico [m]		-70.00							
z-w-h1 parametro geometrico [m]		0.00							
z-h1 parametro geometrico [m]		0.00							
PARAMETRI DEL MATERIALE									
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³]		25.00							
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°]		28.35							
c_1 coesione media fronte (cuneo 1) [KPa]		48.00							
K_{01} spinta a riposo fronte (cuneo 1)		0.53							
K_{A1} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 1)		0.36							
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³]		25.00							
ϕ_m angolo medio (globale) [°]		28.35							
c_m coesione media (globale) [KPa]		48.00							
K_{0m} spinta a riposo (globale)		0.53							
K_{Am} coefficiente 0,5<K _A <1 (globale)		0.36							
γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³]		25.00							
ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°]		28.35							
c_{2-3} coesione media (cunei 2-3) [KPa]		48.00							
K_{02-3} spinta a riposo media (cunei 2-3)		0.53							
K_{A2-3} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 2-3)		0.36							
γ_{dw2-3} peso medio (sotto falda) [KN/m ³]		0.00							
γ_{uw2-3} peso medio (sopra falda) [KN/m ³]		25.00							
$\gamma_{(z-w)-h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³]		10.00							
U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa]		0							
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA									
FRONTE STABILE		Materiale stratificato							
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]		92.64							
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]		48.00							
FS (mezzo con coesione e angolo di attrito)		1.07							
FS ₃ (mezzo con coesione e angolo di attrito)		3.41							
FSF		1.07							
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]		155							

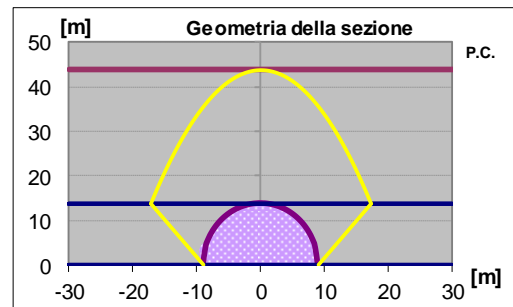


Figura 7-16: Analisi di stabilità del fronte con interventi di consolidamento

7.2.4 DIMENSIONAMENTO DEGLI INFILAGGI METALLICI

Alcune sezioni tipo della galleria necessitano di un intervento di pre-sostegno costituito da un ombrello di infilaggi metallici, migliorando così le condizioni di stabilità del cavo, in particolare nella fase maggiormente critica al termine dello sfondo, prima della messa in opera delle centine. In questo paragrafo sono eseguite le verifiche statiche degli infilaggi metallici. Gli schemi di calcolo che meglio approssimano il comportamento degli infilaggi sono mostrati nella figura seguente.

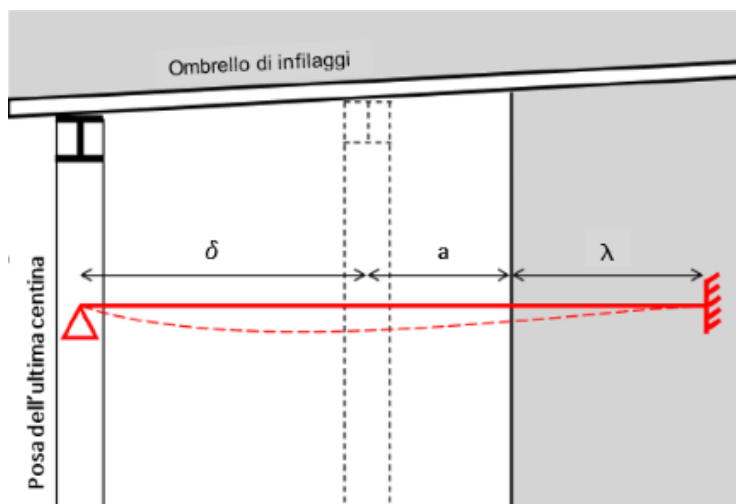


Figura 7-17: Schema di calcolo – infilaggi metallici

Lo schema statico utilizzato per la verifica degli infilaggi prevede vincoli di appoggio ed incastro alle estremità. La luce di calcolo è pari alla somma del passo delle centine (δ), del tratto di galleria non sostenuta (a =distanza tra la posizione della centina non ancora collocata ed il fronte di scavo) e di una distanza fittizia λ dell'appoggio oltre il fronte, che tiene in conto del degradamento delle caratteristiche di resistenza del nucleo di scavo in prossimità del fronte, comportando l'arretramento del vincolo di incastro. Il passo centine è fissato in base alla sezione tipo, mentre si assume $a=0.25$ e $\lambda=0.60$.

Il carico gravante per metro lineare del tubo è dato dal carico litostatico (P_v), fornito dalla relazione di Terzaghi (1943):

$$P_v = \frac{\gamma' B_1 - c'}{\tan \varphi'} \left[1 - e^{-\frac{H_0}{B_1} \tan \varphi'} \right] + \gamma' H_2 e^{\frac{H_0}{B_1} \tan \varphi'}$$

Dove:

$$B_1 = \frac{b}{2} + h \tan \left(45 - \frac{\varphi'}{2} \right);$$

H_0 è la profondità della galleria in calotta,

$$H_2 = H_0 - 5B_1 \text{ (se negativo si pone } H_2 = 0),$$

b è la larghezza della galleria,

h è l'altezza della galleria,

γ' è il peso specifico dell'ammasso roccioso,

c e φ' sono i parametri di resistenza del terreno secondo il criterio di Mohr-Coulomb.

Grazie all'effetto 3D del fronte possiamo prendere un'aliquota del 75% del carico agente (v. Szechy, "The Art of Tunnelling", 1966):

$$q = 0.75 i P_v$$

Il momento sollecitante massimo è:

$$M_{Max} = \frac{1}{12} q (\delta + a + \lambda)^2$$

E quindi il momento agente di progetto/verifica, ottenuto moltiplicando M_{MAX} per il coefficiente amplificativo per le azioni o sollecitazioni γ_s :

$$M_d = \gamma_s M_{Max}$$

Il momento resistente plastico è:

$$M_{Rd p} = \frac{W_p f_{yk}}{\gamma_r}$$

Dove:

- W_p = modulo di resistenza plastico del tubo
- f_{yk} = tensione caratteristica allo snervamento dell'acciaio
- γ_r = coefficiente di sicurezza per l'acciaio (strutture metalliche)

La verifica risulta soddisfatta se:

$$M_{Rd p} > M_d$$

7.2.4.2 Verifiche strutturali degli infilaggi metallici

Di seguito si presentano le verifiche degli infilaggi metallici valutate nelle tratte più sfavorevoli in termini di resistenza e deformabilità e di coperture:

Sezione Tipo	c' [KPa]	φ' [°]	Copertura [m]
PZ / B2v / B0v	60	35	35

geometria	δ [m]	1.0	distanza tra le centine
intervento	a [m]	0.2	distanza ultima centina-fronte
	λ [m]	0.5	lungh. immorsamento infilaggio
	L = δ + a + λ [m]	1.7	luce di calcolo
	i [m]	0.45	interasse fra i tubi
	R _{gall} [m]	6.4	raggio galleria
	b [m]	14.0	larghezza galleria
	h [m]	11.0	altezza galleria
	z [m]	35.0	profondità calotta galleria
elemento strutturale	D _{est} [mm]	139.7	diametro esterno tubo metallico
	s [mm]	10	spessore tubo
	D _{int} [mm]	119.7	diametro interno tubo metallico
	W _e [m ³]	1.23E-04	modulo di resistenza elastica tubo
	W _p [m ³]	1.37E-04	modulo di resistenza plastica tubo
	f _{yk} [MPa]	355	tensione snervam. acciaio (val. caratt.)
terreno	γ _{sat} [kN/m ³]	25	peso saturo unità di vol. terreno
	γ _w [kN/m ³]	10	peso unità di vol. acqua
	γ' [kN/m ³]	15	peso immerso unità di vol. terreno
	σ _v [kPa]	875	tensione tot. litostatica
	z _w [m]	70	profondità falda
	u [kPa]	0	pressione neutra
	σ' _v [kPa]	875	tensione efficace
	φ' [°]	35	angolo di resistenza a taglio
	c' [kPa]	60	coesione
	P _v [kPa]	277.15	pressione verticale in calotta
	q = 0.75*i*P _v [kPa]	93.54	carico agente sul tubo metallico
sollecitazioni	M _k [kNm]	22.53	
	M _d [kNm]	29.29	
resistenza	M _{R,d} [kNm]	46.32	Verifica soddisfatta

PROGETTAZIONE ATI:

8. ANALISI NUMERICHE PER IL CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI NEL RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE E DEFINITIVO E VERIFICHE STRUTTURALI

8.1 PREMESSA

Le analisi numeriche condotte hanno avuto l'obiettivo di verificare l'adeguatezza della soluzione progettuale indicata, determinando quindi le sollecitazioni risultanti sui rivestimenti durante tutte le fasi costruttive previste. Esse sono state condotte con il codice di calcolo alle differenze finite FLAC, che permette di tenere conto in maniera appropriata dei fenomeni di interazione terreno-struttura.

8.2 ANALISI TENSO-DEFORMATIVE ALLE DIFFERENZE FINITE

Le analisi tenso-deformative, presentate nel seguito, sono state condotte impiegando il codice di calcolo FLAC 8.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting, il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di comportamento, di tipo elastico o plastico, e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite. Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame, attraverso la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. In questo modo, le equazioni differenziali vengono trasformate in equazioni algebriche, da risolversi in successivi passi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato "esplicito per integrazione diretta nel tempo" (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agevolmente e molto velocemente per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l'invertibilità di matrici). L'adattamento del metodo alle differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l'approccio di Wilkins M.L..

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

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

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

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

Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione "esplicito condizionatamente stabile", la cui sequenza di calcolo iterativo, illustrata schematicamente nella figura seguente, comprende i seguenti passi: – per ogni nodo della griglia si valuta la massa m , la risultante delle forze esterne F_e (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne F_i , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo F_u (unbalanced force $F_u = F_e - F_i$); – per ogni gridpoint si scrive l'equazione di Newton $F_u = m \cdot a$, tramite la quale è possibile determinare l'accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l'accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo; – dal campo di

spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo; – la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la Fu, dando inizio ad un nuovo passo di calcolo. Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita.



Figura 8-1: Fasi di computazione del codice di calcolo FLAC

Il codice di calcolo consente di adottare un modello di comportamento del terreno elastico perfettamente plastico basato sul criterio di rottura di Mohr-Coulomb, con legge di flusso associata. La funzione di plasticizzazione F definita dal criterio di rottura consente di individuare quelle zone di terreno in cui lo stato tensionale ha superato il limite al di sotto del quale il materiale mantiene un comportamento elastico e che sono quindi soggette a sollecitazioni tali da comportare deformazioni irreversibili nell'ammasso. Per un generico stato di sforzo, individuato dalle tensioni principali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è rappresentato dalle seguenti equazioni lineari:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \end{aligned}$$

Tale criterio è rappresentato, nello spazio delle tensioni principali, da una piramide a base esagonale non regolare avente, come asse, la trisettrice del primo ottante:

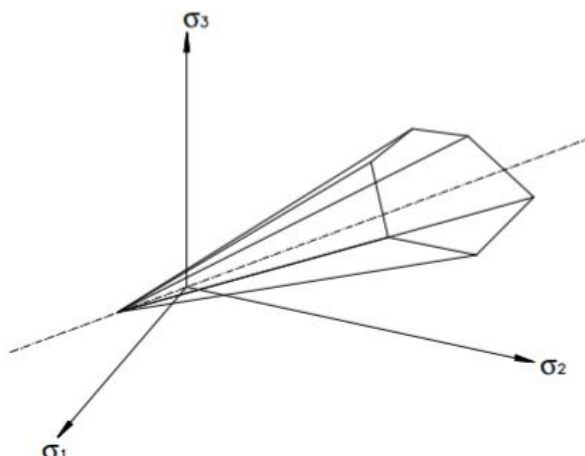


Figura 8-2: Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni

8.3 CARICO IDRAULICO

Al fine di determinare il carico idraulico agente sul rivestimento definitivo della galleria, è stato condotto uno studio relativamente ai livelli piezometrici presenti lungo il tracciato della galleria. Alla luce dei carichi idraulici presenti, si è altresì definito il carico effettivo, portando in conto l'azione del sistema di drenaggio sopra descritto. In dettaglio, la valutazione dei carichi idraulici all'estradosso del rivestimento definitivo in presenza di galleria rivestita e schema di drenaggio classico, è stata valutata seguendo la teoria di Ribacchi et al. 2002, basata su una galleria schematizzata con una sezione circolare equivalente e si assumono condizioni di flusso assisimmetrico.

Secondo tale studio, dopo l'installazione del dreno e dell'impermeabilizzazione, il flusso di acqua uscente dal priverivestimento percorre il dreno sui due lati della galleria con portate q progressivamente crescenti dalla calotta verso la zona di scarico del piede, come riportato nella Figura 8-1.

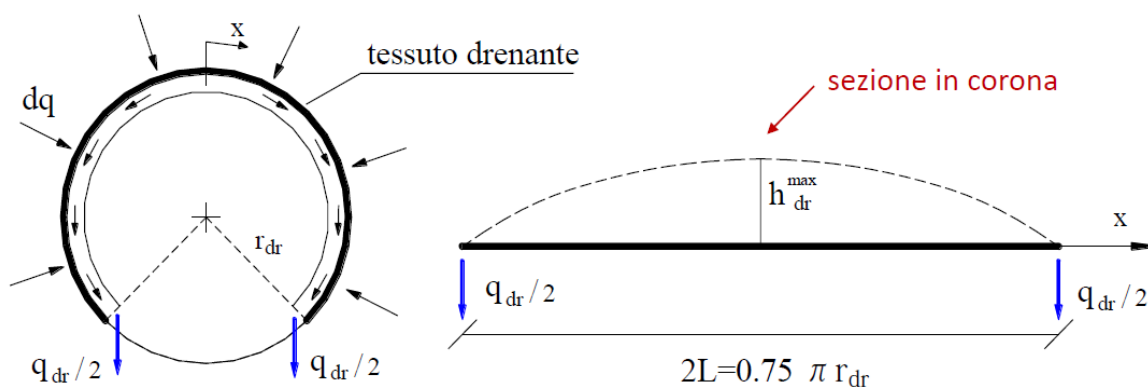


Figura 8-1: Schema di calcolo del flusso nella sezione con drenaggi

Dopo avere assunto valide le seguenti ipotesi:

1. $q_{dr/2}$ portata drenata, costante su ciascun ramo lungo lo sviluppo del dreno;
2. h_{dr} carico idrico in calotta, variabile lungo lo sviluppo del dreno che parte dalla sommità della calotta (h_{dr}^{max}) verso il punto di sbocco situato a distanza L . Per valutare il flusso proveniente dall'ammasso roccioso attraverso il priverivestimento si ipotizza che nel dreno regni ovunque il carico h_{dr} (che in realtà è presente solo in chiave di calotta).

PROGETTAZIONE ATI:

Con riferimento alla Figura 8-1, si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{h_{dr}}{h_0} = \left\{ 1 + \frac{\theta_{dr}}{\alpha_{dr} r_{dr} k} \frac{4 \ln\left(\frac{R}{r_e}\right)}{3\pi^2} \right\}^{-1}$$

La pressione all'estradosso del priverivestimento diviene:

$$\frac{h_e}{h_0} = (1 - \alpha_{dr}) + \alpha_{dr} \frac{h_{dr}}{h_0}$$

in cui:

- $\alpha_{dr} = \left(1 + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_{dr}}\right)k}{\ln\left(\frac{R}{r_e}\right)k_{pr}} \right)^{-1}$;
- $k_{pr} = 5 \cdot 10^{-8} [m/s]$
- $k = 1 \cdot 10^{-7} [m/s]$
- r_e
- r_{dr}
- $R = 2 \cdot h_0$
- h_0
- $\theta_{dr} = k_{dr} \cdot t_{dr}$
- $k_{dr} = 6.4 \cdot 10^{-4} [m/s]$
- $t_{dr} = 0.04 [m]$

- permeabilità del priverivestimento in cls proiettato;
- permeabilità dell'ammasso roccioso;
- raggio dell'estradosso del priverivestimento;
- raggio in corrispondenza del dreno;
- raggio di influenza del modello assisimmetrico;
- carico idraulico sopra la calotta prima dello scavo;
- trasmissività del dreno;
- permeabilità del dreno;
- spessore dreno

Anelli di diversa permeabilità in serie

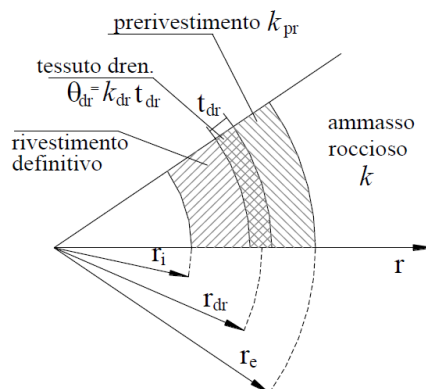


Figura 8-2: **Schema di calcolo del flusso nella sezione con drenaggi**

Il carico idraulico che incide maggiormente sulla galleria si riscontra nella parte centrale dove è presente la formazione della scaglia cinerea. In mancanza di prove di permeabilità, è stato assunto un valore tipico presente in letteratura e pari a $k = 1 \cdot 10^{-7} [m/s]$

PROGETTAZIONE ATI:

8.4 CARICO SISMICO

L'azione sismica è definita secondo quanto riportato nel par. 3.2 del DM 17/01/2018 a partire dall'accelerazione massima attesa su affioramento roccioso (a_g) e dai parametri spettrali (F_0 e T_c^*) per il sito di riferimento. Assumendo che:

- la vita nominale delle opere in oggetto sia pari $V_N = 50$ anni;
- la classe d'uso a cui si fa riferimento sia la IV ($C_U = 2.00$)

si determina un periodo di riferimento $V_R = V_N \times C_U = 100$ anni.

In considerazione della probabilità di superamento dell'accelerazione di progetto P_{VR} nel periodo di riferimento V_R , viene definito un tempo di ritorno $T_R = -V_R / \ln(1-P_{VR})$.

Allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) si pone $P_{VR} = 10\%$, pertanto $T_R = 946$ anni.

Relativamente alle gallerie artificiali (entrambi i modelli) sono stati considerati i seguenti parametri allo SLV:

- $a_g = 0.279$ g
- $F_0 = 2.411$
- $T_c^* = 0.309$ s

dove:

- a_g è l'accelerazione orizzontale massima al sito
- F_0 è il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T_c^* è il valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

I parametri sono ripresi dalla relazione Sismica allegata al progetto e fanno riferimento al tratto terminale del tracciato, dove si rilevano le azioni più importanti.

I valori di a_g , F_0 , T_c^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno stato limite, che definiscono lo spettro di risposta elastico di riferimento in accelerazione $S_e(T)$ dai quali viene ricavato lo spettro di progetto $S_d(T)$, sono stati ricavati con il programma "Spettri-NTC.ver.1.03" realizzato dal Ministero delle Infrastrutture – Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Nelle tabelle successive vengono riportati in dettaglio i parametri sismici per la definizione dell'azione sismica di progetto.

L'accelerazione di picco a_{max} è valutata come:

$$a_{max} = S \cdot a_g = (S_S \cdot S_T) \cdot a_g$$

dove S è il coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica (S_S) e dell'amplificazione topografica (S_T). In particolare, tali coefficienti assumono i seguenti valori:

- $S_S = 1.13 \rightarrow$ Categoria di sottosuolo di tipo **B**
- $S_T = 1.00 \rightarrow$ Categoria topografica **T1**

Pertanto, risulterà

$$a_{max} = 1.13 \cdot 1.00 \cdot (0.279 \cdot 9.81) \text{ m/s}^2 = 3.093 \text{ m/s}^2 = 0.315 \text{ g.}$$

L'analisi delle opere di sostegno in condizioni sismiche è stata eseguita con il metodo pseudo-statico, in cui l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile.

Le componenti orizzontale e verticale di tale forza devono essere ricavate in funzione delle proprietà del moto atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e della capacità di tale volume di

subire spostamenti senza subire riduzioni di resistenza. In mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale della forza statica equivalente possono esprimersi come

$$F_h = k_h \cdot W ; F_v = k_v \cdot W$$

in cui

$$k_h = \beta_s \frac{a_{max}}{g} ; k_v = \pm 0.5 K_h$$

Per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica agente sul rivestimento definitivo della galleria, si è considerato che l'accelerazione sismica diminuisce con la profondità.

8.4.1 AZIONE SISMICA A BASSE COPERTURE

Nel caso di basse coperture, data la preponderanza degli effetti inerziali e data la deformabilità dei terreni in superficie, è lecito adottare una riduzione tramite il coefficiente r_d utilizzando le correlazioni fornite da Iwasaki *et al.* (1978) e Idriss & Boulanger (2006):

- $r_d(z) = 1 - 0.015 \cdot z$ Iwasaki *et al.* (1978)

dove z è la profondità di riferimento.

8.4.2 INCREMENTO INDOTTO DALL' AZIONE SISMICA

Di seguito si riporta il valore degli incrementi di sollecitazioni massimi, ovvero quelli in cui la funzione coseno assume valore unitario, da applicare a valle delle analisi piane:

Sezioni tipo	ΔN [kN]	ΔM [kNm]
1	1973	449
3	2151	474
5	1845	876

L' analisi sismica dell'opera è condotta in accordo al metodo pseudostatico: in esso l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W sia del terreno sia delle strutture. Tali forze sono calcolate in automatico dal software di calcolo a partire dalla conoscenza del coefficiente sismico orizzontale e verticale, rispettivamente indicati con k_h e k_v . Le componenti orizzontale e verticale di tale azione possono esprimersi come $F_h = k_h \cdot W$ e $F_v = k_v \cdot W$, con k_h e k_v , rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k_h = r_d \cdot a_{max}/g$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

Gli incrementi dovuti all'azione sismica sono apprezzabili solo per le basse coperture,; per le alte coperture ci sono formulazioni diverse che portano all'attenuazione dell'accelerazione massima fino a $r_d = 0.1$, comportando incrementi di sollecitazioni non apprezzabili.

8.5 VALUTAZIONE DEI RILASCI TENSIONALI

L'analisi di convergenza-confinamento (Duncan-Fama, 1993; Panet, 1993, 1995; Carranza Torres e Fairhurst, 2000 e altri) è uno strumento ampiamente utilizzato per la valutazione preliminare del potenziale di rilascio tensionale e dei requisiti di supporto per tunnel circolari in una varietà di condizioni geologiche e di sollecitazioni.

Al fine di simulare il progressivo detensionamento dell'ammasso a mezzo di una pressione interna fittizia q , si definisce fattore di rilascio tensionale λ , variabile tra 0 ed 1, la quantità:

$$q = (1 - \lambda) \cdot S$$

dove S è lo stato tensionale in condizioni litostatiche. Con l'utilizzo dei fattori di rilascio è possibile simulare l'avanzamento dello scavo in metodi bidimensionali (condizioni di deformazione piana).

Modelli assialsimmetrici

L'analisi dei modelli assialsimmetrici (considerando gli eventuali interventi di preconsolidamento e presostegno in caso di impiego di VTR) consente di definire in forma numerica le curve di "taratura" necessarie per la determinazione della curva di rilassamento delle forze di scavo da utilizzare nel modello di verifica alle differenze finite (in stato di deformazione piana) e si esplica in due distinte fasi:

- *analisi assialsimmetrica longitudinale*: consente di determinare la curva di convergenza in funzione della distanza dal fronte (LDP – Longitudinal Displacement Profile) ed, in particolare, il valore assunto dalla preconvergenza;

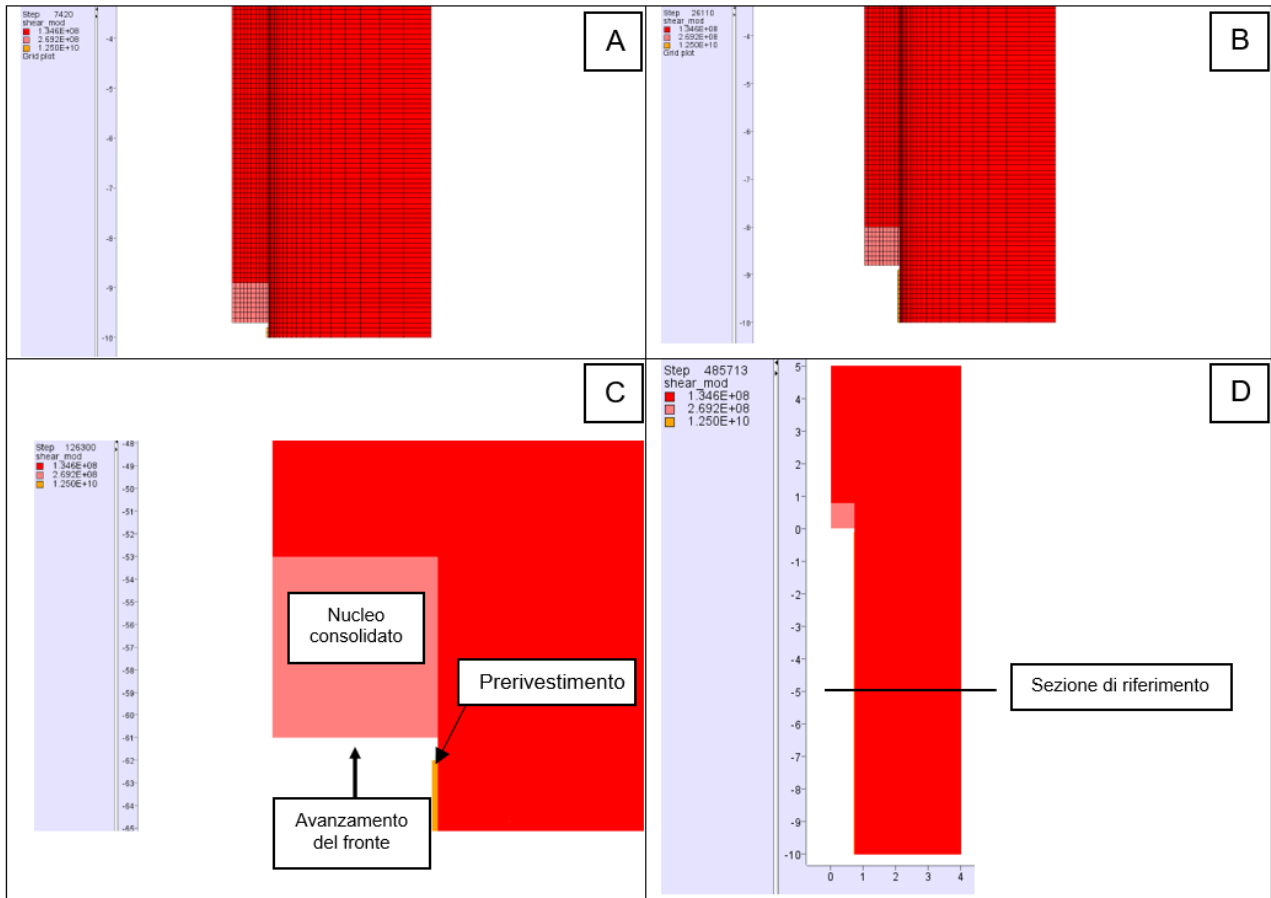
- *analisi trasversale*: per la determinazione della relazione tra pressioni di contenimento, esercitate in senso radiale sul bordo della galleria dalle opere di stabilizzazione e di rivestimento, e spostamenti radiali al suo contorno (GRC – Ground Reaction Curve).

La procedura impiegata nel calcolo assialsimmetrico si compone, per ogni caso analizzato, di n. 2 modelli.

Nel primo (*analisi ax-sym longitudinale*) si simula l'avanzamento del fronte, la messa in opera dei priverestimenti e degli interventi di precontenimento e presostegno del fronte e del cavo adottando l'ipotesi di assialsimmetria della galleria; si riportano, a titolo di esempio, immagini riprese in step successivi.

Lo scavo (asse y del modello) è simulato attraverso la rimozione progressiva di elementi in corrispondenza del nucleo (A, B, C, fig. seguente); al termine di ciascun campo di scavo sono fatte variare le proprietà dei degli elementi sul fronte e sul contorno, qualora siano presenti interventi di preconsolidamento.

Per ogni metro scavato il programma memorizza gli spostamenti in direzione radiale in corrispondenza della sezione di controllo riportata nel riquadro D della fig. seguente. In tal modo si riescono a determinare le curve di convergenza del cavo per distanze del fronte da - 50 a + 50 m rispetto alla sezione di riferimento.



Si determinano infine, in particolare, il valore dello spostamento radiale ed il valore del raggio plastico all'atto dell'installazione del prerivestimento, che saranno impiegati nel secondo modello, l'*analisi trasversale*.

Costruendo un modello costituito da 1 m lineare di sviluppo di galleria, infatti, si ottengono le curve delle convergenze radiali in funzione della pressione di confinamento; imponendo l'installazione del prerivestimento in corrispondenza dello spostamento radiale determinato con la precedente analisi si calcolano le pressioni e gli spostamenti a cui sarà soggetto lo stesso.

Le curve ottenute dai due modelli sono quindi correlate per determinare i coefficienti di rilassamento percentuali sul fronte di scavo e all'atto dell'installazione del prerivestimento.

In conclusione, con riferimento al metodo proposto, per ogni sezione di calcolo si sono determinate:

- curva GRC (Ground Reaction Curve) o curva caratteristica del cavo
- curva LDP (Longitudinal Displacement Profile) o curva "convergenza-distanza dal fronte"

dalle quali è stato possibile ottenere:

- u_r Spostamento radiale del cavo
- q Pressione interna del cavo
- λ Rilascio tensionale

La determinazione delle due curve suddette consente l'individuazione delle percentuali di rilascio delle forze di scavo, che saranno adottate nel calcolo numerico. Il rivestimento provvisorio costituito da spritz-beton e centine è stato schematizzato come un unico elemento strutturale dalle

PROGETTAZIONE ATI:

caratteristiche (area, inerzia, e modulo di Young) omogeneizzate allo spritz beton. Le rigidzze dei rivestimenti provvisorio e definitivo adottate nelle varie fasi della modellazione sono state fatte variare in funzione del grado di maturazione del calcestruzzo. Al fine di simulare la galleria nelle condizioni di esercizio, a fine modellazione, è stato considerato il decadimento del rivestimento provvisorio.

Si riportano di seguito i risultati delle analisi svolte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.6 Riepilogo Analisi Svolte

Di seguito si riportano i risultati delle analisi per la definizione delle categorie di comportamento per le varie sezioni di analisi.

Sezioni	Ammasso	Copertura (m)	C (kPa)	FI (°)	E (GPa)	Sez Applicata
1	MAC1	30	200	50	4.0	B0v
2	MAC1	70	400	50	4.0	A0
3	MAC1-Tett	30	80	35	0.5	B2v
4	MAC1-Tett	70	150	34	0.8	B0
5	MAC1-Tett	30	80	35	0.5	PZ

Le sezioni di calcolo sono state così selezionate:

- La sezione 1, rappresentativa del calcolo a basse coperture nella formazione MAC1;
- La sezione 2. rappresentativa del calcolo a massime coperture per la formazione MAC1;
- La sezione 3, rappresentativa del calcolo a basse coperture nella formazione MAC1-Tettonizzato;
- La sezione 4. rappresentativa del calcolo a massime coperture per la formazione MAC1-Tettonizzato;
- La sezione 5. rappresentativa del calcolo in piazzola a basse coperture per la formazione MAC1-Tettonizzato;

Nelle analisi numeriche a basse coperture il coefficiente k_0 è stato fissato pari a 0.7.

Nelle analisi numeriche ad alte coperture il coefficiente k_0 è stato fissato pari a 1.0.

Per le sezioni 1, 3 e 5, a basse coperture, sono state condotte le analisi anche con carichi sismici. Il carico sismico è stato applicato solo alle sezioni con basse coperture.

Ad alte coperture l'azione sismica non apporta significativi incrementi tensionali al rivestimento definitivo della galleria.

8.6.2 SEZ 1

DATI DI INPUT						
R_0 [m]	γ [kN/m ³]	u [-]	c' [KPa]	ϕ' [°]	E' [GPa]	H [m]
6.4	24	0.3	200	50	4.0	30

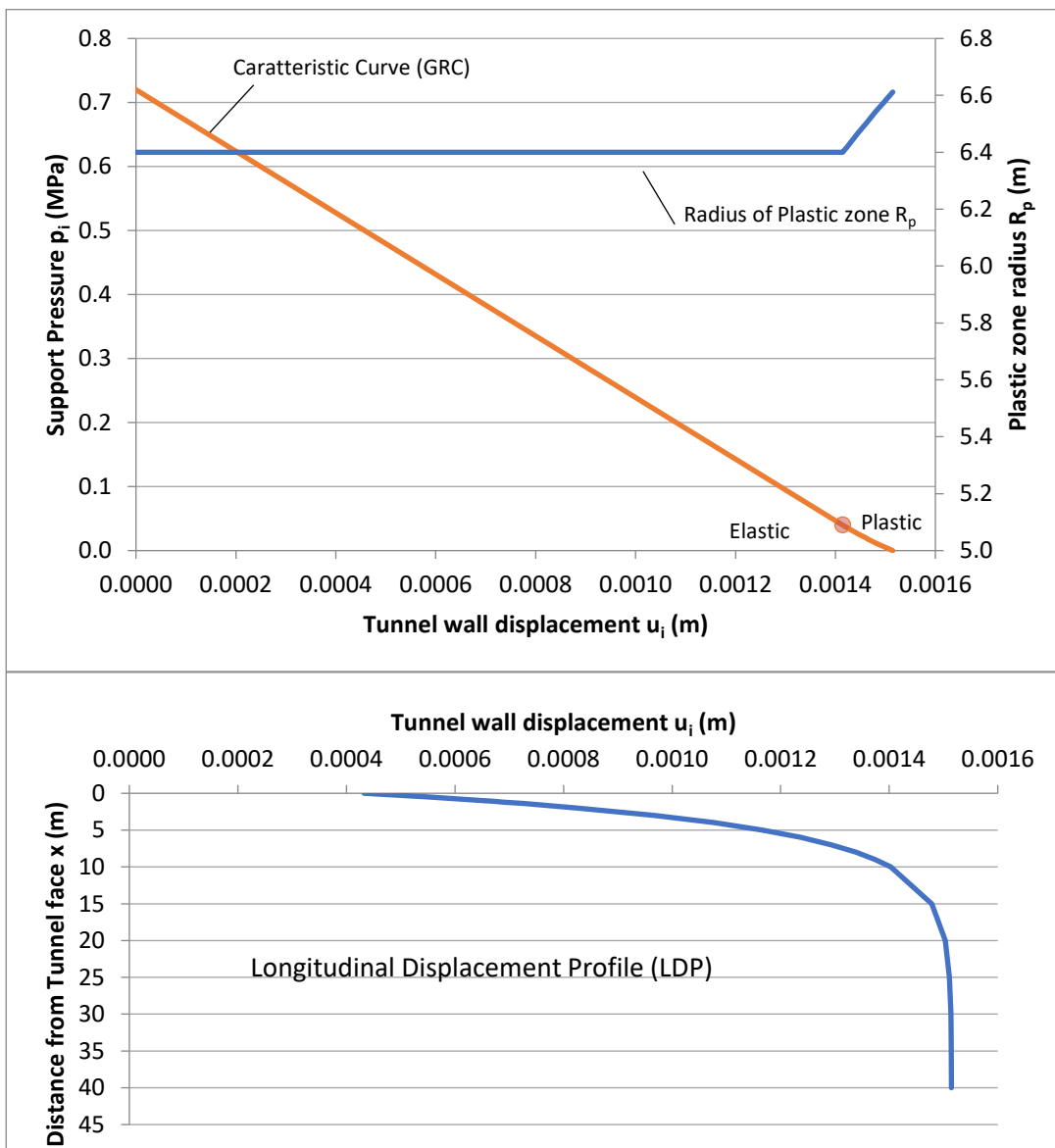


Figura 8-3 Curve GRC e LDP per la valutazione dei rilasci tensionali nelle varie fasi di analisi

Nella tabella seguente si riportano, il valore della convergenza al fronte, la deformazione rispetto al raggio di scavo e la conseguente categoria di comportamento individuata.

Tabella 8.1: categorie di comportamento ADECO-RS

Analisi	u_f [cm]	R_0 [m]	u_f/R_0	Categoria ADECO-RS
Sez 1	0.15	6.40	0.02%	A

Di seguito si riportano i fattori di rilascio adottati nelle analisi di calcolo, determinate dalle curve GRC-LDP sopra riportate.

FASE	DESCRIZIONE – SCAVO GN	λ
Fase 0	Fase litostatica e apertura fronte del primo fronte di scavo (GN.1)	0.00
Fase 1	Preconvergenza massima	0.28
Fase 2	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 3	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.55
Fase 4	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 5	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 6	Apertura del secondo fronte di scavo (GN.2)	0.00
Fase 7	Preconvergenza massima	0.28
Fase 8	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 9	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.55
Fase 10	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 11	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 12	Applicazione del carico idraulico	1.00

8.6.3 SEZ 2

DATI DI INPUT						
R_0 [m]	γ [kN/m ³]	u [-]	c' [KPa]	ϕ' [°]	E' [GPa]	H [m]
6.4	24	0.3	400	50	4.0	70

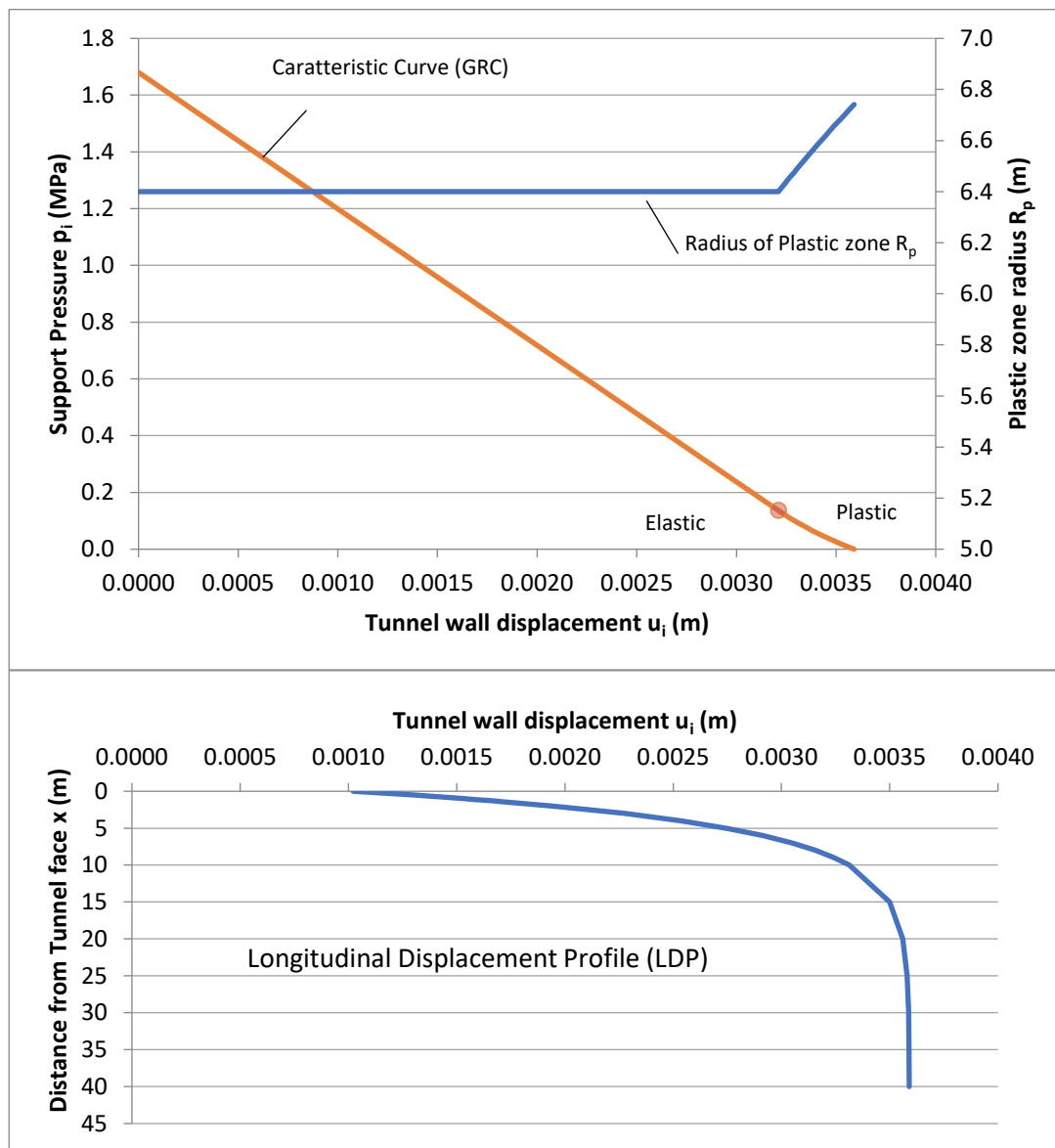


Figura 8-4 Curve GRC e LDP per la valutazione dei rilasci tensionali nelle varie fasi di analisi

Nella tabella seguente si riportano, il valore della convergenza al fronte, la deformazione rispetto al raggio di scavo e la conseguente categoria di comportamento individuata.

Tabella 8.2: categorie di comportamento ADECO-RS

Analisi	u_f [cm]	R_0 [m]	u_f/R_0	Categoria ADECO-RS
Sez 2	0.36	6.40	0.06%	A

Di seguito si riportano i fattori di rilascio adottati nelle analisi di calcolo, determinate dalle curve GRC-LDP sopra riportate.

FASE	DESCRIZIONE	λ
Fase 0	Fase litostatica e apertura fronte del primo fronte di scavo (GN.1)	0.00
Fase 1	Preconvergenza massima	0.28
Fase 2	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 3	Installazione del pririvestimento (centina + spritz)	0.55
Fase 4	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 5	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 6	Apertura del secondo fronte di scavo (GN.2)	0.00
Fase 7	Preconvergenza massima	0.28
Fase 8	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 9	Installazione del pririvestimento (centina + spritz)	0.55
Fase 10	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 11	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 12	Applicazione del carico idraulico	1.00

8.6.4 SEZ 3

DATI DI INPUT						
R_0 [m]	γ [kN/m ³]	u [-]	c' [KPa]	ϕ' [°]	E' [GPa]	H [m]
6.4	24	0.3	80	35	0.5	30

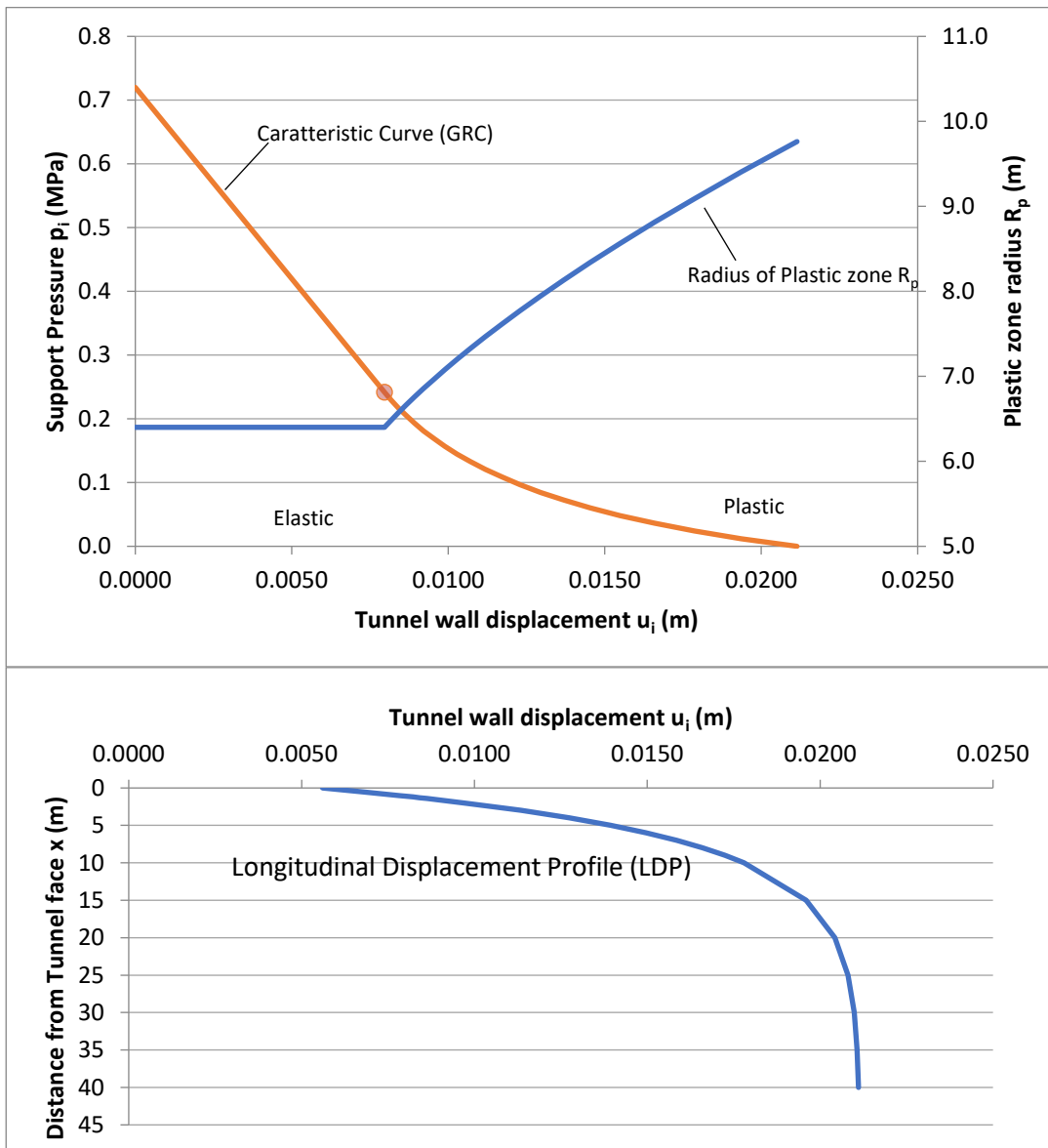


Figura 8-5 Curve GRC e LDP per la valutazione dei rilasci tensionali nelle varie fasi di analisi

PROGETTAZIONE ATI:

Nella tabella seguente si riportano, il valore della convergenza al fronte, la deformazione rispetto al raggio di scavo e la conseguente categoria di comportamento individuata.

Tabella 8.3: categorie di comportamento ADECO-RS

Analisi	u_f [cm]	R_0 [m]	u_f/R_0	Categoria ADECO-RS
Sez 3	2.11	6.40	0.33%	B

Di seguito si riportano i fattori di rilascio adottati nelle analisi di calcolo, determinate dalle curve GRC-LDP sopra riportate.

FASE	DESCRIZIONE	λ
Fase 0	Fase litostatica e apertura fronte del primo fronte di scavo (GN.1)	0.00
Fase 1	Preconvergenza massima	0.28
Fase 2	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 3	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.45
Fase 4	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 5	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 6	Apertura del secondo fronte di scavo (GN.2)	0.00
Fase 7	Preconvergenza massima	0.28
Fase 8	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 9	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.45
Fase 10	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 11	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 12	Applicazione del carico idraulico	1.00

8.6.5 SEZ 4

DATI DI INPUT						
R_0 [m]	γ [kN/m ³]	u [-]	c' [KPa]	ϕ' [°]	E' [GPa]	H [m]
6.4	24	0.3	150	34	0.8	70

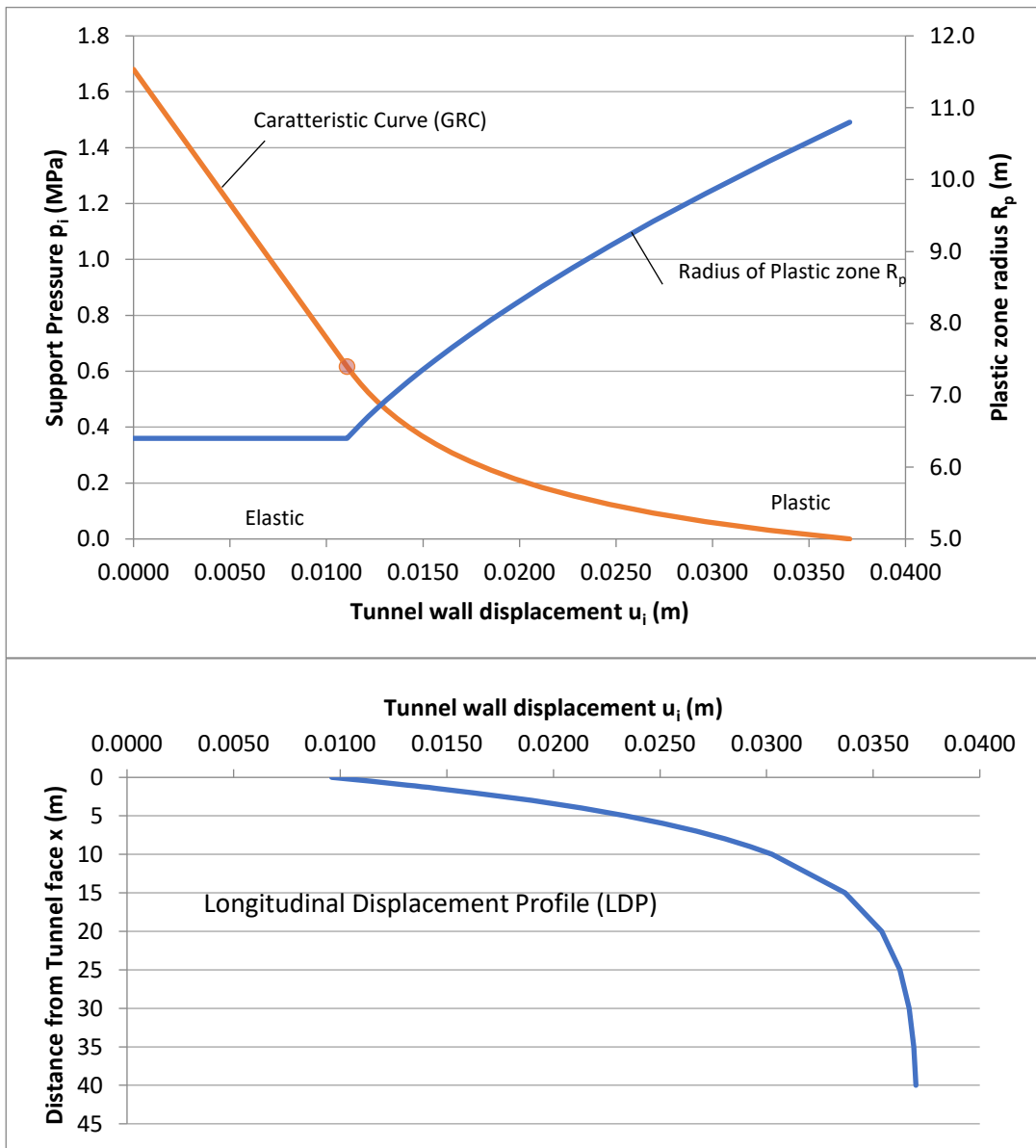


Figura 8-6 Curve GRC e LDP per la valutazione dei rilasci tensionali nelle varie fasi di analisi

PROGETTAZIONE ATI:

Nella tabella seguente si riportano, il valore della convergenza al fronte, la deformazione rispetto al raggio di scavo e la conseguente categoria di comportamento individuata.

Tabella 8.4: categorie di comportamento ADECO-RS

Analisi	u_f [cm]	R_0 [m]	u_f/R_0	Categoria ADECO-RS
Sez 4	3.71	6.40	0.58%	B

Di seguito si riportano i fattori di rilascio adottati nelle analisi di calcolo, determinate dalle curve GRC-LDP sopra riportate.

FASE	DESCRIZIONE	λ
Fase 0	Fase litostatica e apertura fronte di scavo	0.00
Fase 1	Preconvergenza massima	0.28
Fase 2	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 3	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.45
Fase 4	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 5	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 6	Apertura del secondo fronte di scavo (GN.2)	0.00
Fase 7	Preconvergenza massima	0.28
Fase 8	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 9	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.45
Fase 10	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 11	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 12	Applicazione del carico idraulico	1.00

8.6.7 SEZ 5

DATI DI INPUT						
R_0 [m]	γ [kN/m ³]	u [-]	c' [KPa]	ϕ' [°]	E' [GPa]	H [m]
7.82	24	0.3	80	35	0.5	30

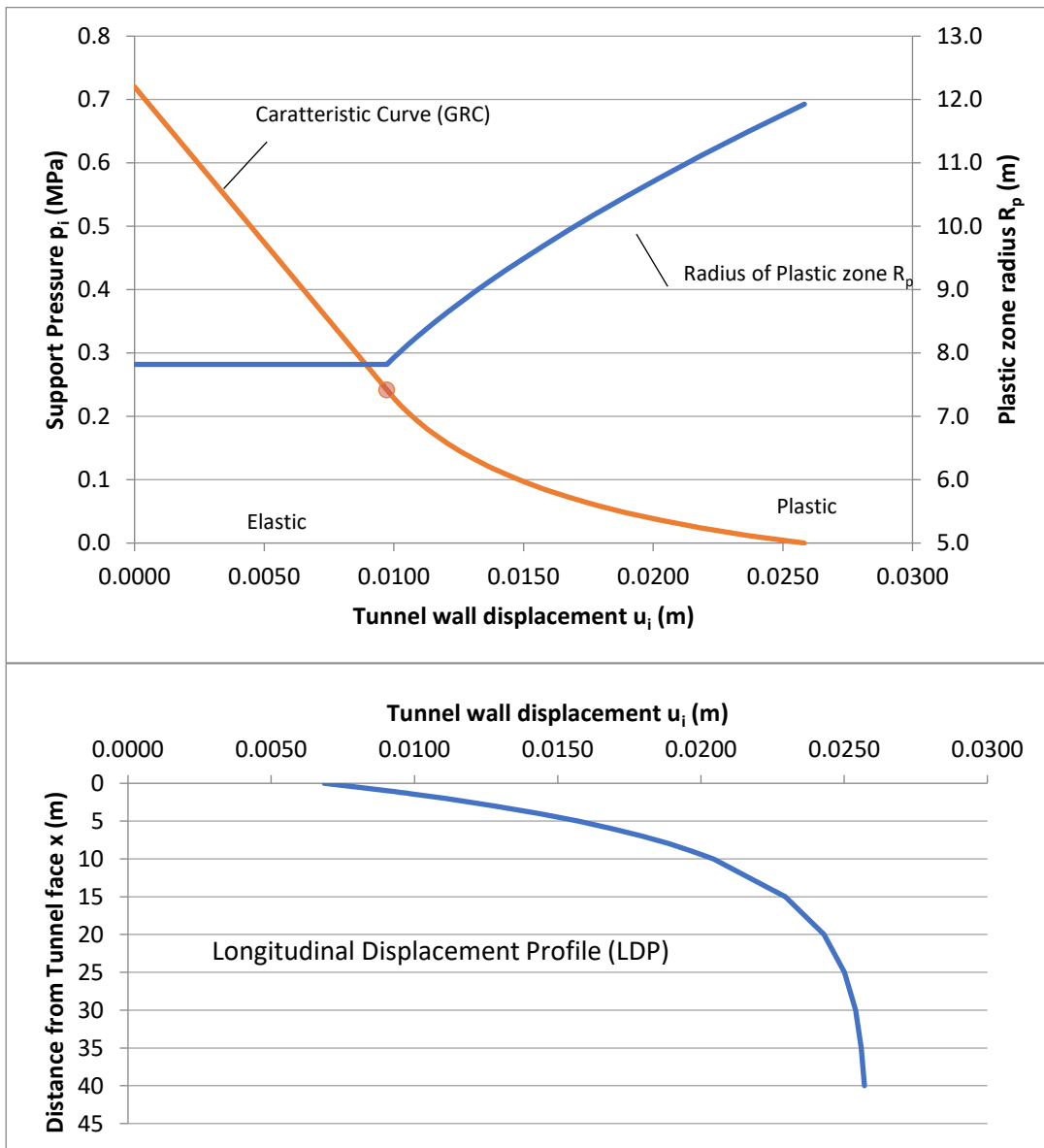


Figura 8-7 Curve GRC e LDP per la valutazione dei rilasci tensionali nelle varie fasi di analisi

Nella tabella seguente si riportano, il valore della convergenza al fronte, la deformazione rispetto al raggio di scavo e la conseguente categoria di comportamento individuata.

Tabella 8.5: categorie di comportamento ADECO-RS

Analisi	u_f [cm]	R_0 [m]	u_f/R_0	Categoria ADECO-RS
Sez 5	3.71	6.40	0.58%	B

Di seguito si riportano i fattori di rilascio adottati nelle analisi di calcolo, determinate dalle curve GRC-LDP sopra riportate.

FASE	DESCRIZIONE	λ
Fase 0	Fase litostatica e apertura fronte del primo fronte di scavo (GN.1)	0.00
Fase 1	Preconvergenza massima	0.28
Fase 2	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 3	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.45
Fase 4	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 5	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 6	Apertura del secondo fronte di scavo (GN.2)	0.00
Fase 7	Preconvergenza massima	0.28
Fase 8	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 9	Installazione del prerivestimento (centina + spritz)	0.45
Fase 10	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 11	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 12	Applicazione del carico idraulico	1.00

8.6.8 SEZ 6

DATI DI INPUT						
R_0 [m]	γ [kN/m ³]	u [-]	c' [KPa]	ϕ' [°]	E' [GPa]	H [m]
5.0	24	0.3	150	35	0.7	50

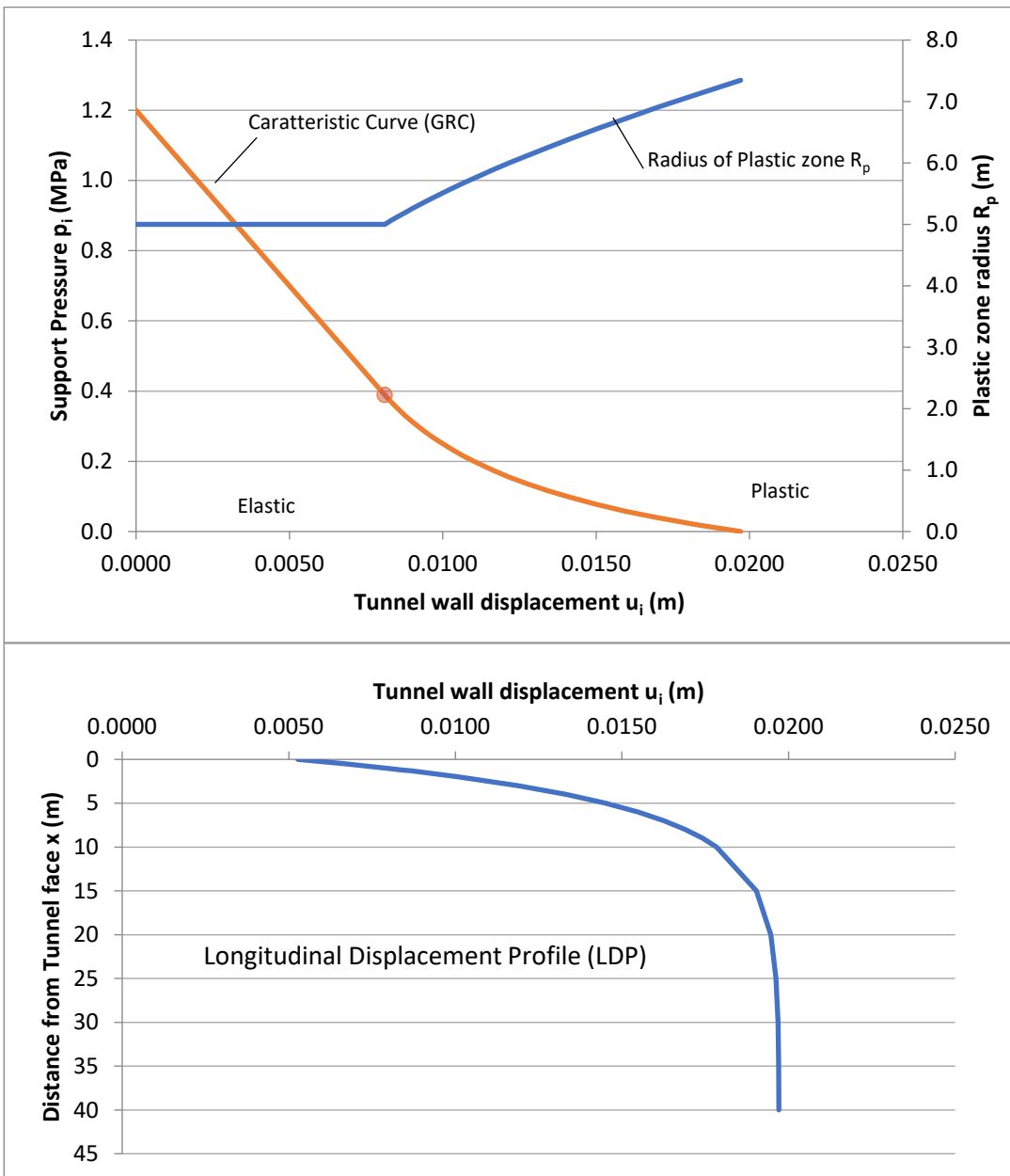


Figura 8-8 Curve GRC e LDP per la valutazione dei rilasci tensionali nelle varie fasi di analisi

Nella tabella seguente si riportano, il valore della convergenza al fronte, la deformazione rispetto al raggio di scavo e la conseguente categoria di comportamento individuata.

Tabella 8.6: categorie di comportamento ADECO-RS

Analisi	u_f [cm]	R_0 [m]	u_f/R_0	Categoria ADECO-RS
Sez 6	1.97	5.00	0.39%	B

Di seguito si riportano i fattori di rilascio adottati nelle analisi di calcolo, determinate dalle curve GRC-LDP sopra riportate.

FASE	DESCRIZIONE	λ
Fase 0	Fase litostatica	0.00
Fase 1	Preconvergenza massima	0.28
Fase 2	Sfondo (terreno non sostenuto)	0.40
Fase 3	Installazione del pririvestimento (centina + spritz)	0.45
Fase 4	Installazione del rivestimento definitivo	0.98
Fase 5	Decadimento prestazionale del rivestimento di I fase	1.00
Fase 6	Applicazione del carico idraulico	1.00

8.7 RISULTATI E VERIFICHE STRUTTURALI

8.7.1 CRITERI DI VERIFICA DEI RIVESTIMENTI

Il comportamento del sistema opera-terreno è stato analizzato nelle diverse fasi costruttive fino alla configurazione finale ed in condizioni di esercizio. Le analisi sono mirate alla previsione del comportamento deformativo al contorno dello scavo e dei carichi attesi sui sostegni provvisori e sui rivestimenti definitivi.

Le verifiche SLU strutturali sono state eseguite, in accordo con la combinazione 1 di coefficienti parziali, adottandone i valori indicati nella Tabella 6.2.1 delle NTC 2018 e verificando il soddisfacimento della condizione:

$$E_d \leq R_d \quad (6.41)$$

con R_d la resistenza di progetto ed E_d l'effetto dell'azione di calcolo.

Per il **rivestimento provvisorio**, si verifica la resistenza dell'insieme centine+spritz:

- verifiche con combinazione allo **SLU** (cfr. Paragrafo 2.5.3 NTC2018 – eq. 2.5.1)
- le sollecitazioni sono “catturate” prima dell'installazione della calotta.

Per quanto riguarda i rivestimenti provvisori (centine e spritz beton), si è definito il dominio di interazione M-N in riferimento ad una sezione in c.a. equivalente di larghezza B pari a 1m altezza H pari allo spessore dello strato di spritz beton ed armatura pari all'area dei profilati metallici utilizzati.

L'omogeneizzazione tra le centine e lo spritz – beton avviene assegnando agli elementi 'beam' un modulo elastico e uno spessore equivalente derivato dalle seguenti formulazioni:

$$(EI)_{sb} + (EI)_{st} = \frac{s_{omo}^3}{12} \cdot E_{omo}$$

$$(EA)_{sb} + (EA)_{st} = s_{omo} \cdot E_{omo}$$

Per il **rivestimento definitivo**, si verifica la resistenza di una sezione in calcestruzzo di base pari ad un metro e altezza variabile in base alla sezione di calcolo:

- verifiche a pressoflessione con combinazione allo **SLU** per sezioni armate
- verifiche a taglio con combinazione allo **SLU** per sezioni armate
- verifiche a sforzo normale e taglio allo **SLU** per sezioni non armate
- verifiche a pressoflessione con combinazione **sismica** (se presente) per sezioni armate
- verifiche a taglio con combinazione **sismica** (se presente) per sezioni armate
- le sollecitazioni sono “catturate” al termine dell'**ultima fase**

Tutte le sezioni sono caratterizzate da un copriferro superiore e inferiore pari a 5 cm e sono dotate di armatura simmetrica ($A_s = A'_s$). Le verifiche a pressoflessione per sezioni armate sono state svolte in forma grafica definendo i domini di resistenza N-M e confrontando le sollecitazioni con le resistenze. Quelle per sezioni non armate sono riportate in forma tabellare. Le verifiche a taglio dei rivestimenti definitivi armati sono state condotte dapprima considerando sezioni non armate a taglio (cfr. §4.1.2.3.5.1 delle NTC 2018) con la seguente formulazione:

$$V_{rd} = \max \left\{ \left[\frac{0.18k(\rho_l 100f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0.15\sigma_{cp} \right] b_w d; (v_{\min} + 0.15\sigma_{cp}) b_w d \right\} \quad (6.43)$$

Per il significato di tutti i termini si rimanda all'equazione 4.1.23 delle NTC 2018.

PROGETTAZIONE ATI:

Le verifiche delle sezioni armate a taglio sono state condotte secondo le prescrizioni del paragrafo 4.1.2.3.5.2 delle NTC 2018, con riferimento al più alto dei valori di taglio agente V_{sd} .

Il valore di sollecitazione normale agente (e dunque il conseguente valore di σ_{cp} nelle formule adottate) è quello corrispondente alla sezione in cui è operata la verifica, vale a dire quella in cui la sollecitazione tagliante è massima. I valori del taglio resistente *lato acciaio* e *lato calcestruzzo* sono stati calcolati in accordo con le formule riportate al paragrafo 4.1.2.3.5.2 delle NTC 2018 e che qui di seguito vengono brevemente richiamate. È stato fatto sempre riferimento a staffe con inclinazione α pari a 90° .

$$V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (\cot \alpha + \cot \theta) \sin \alpha \quad (6.44)$$

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c \nu_{cd} \frac{(\cot \alpha + \cot \theta)}{1 + \cot^2 \theta} \sin \alpha \quad (6.45)$$

Per le eventuali sezioni non armate, la verifica a taglio è condotta facendo riferimento al §4.1.11 delle NTC 2018.

Per quanto riguarda la verifica SLE del rivestimento definitivo, le principali condizioni di verifica riguardano:

- la verifica a fessurazione sviluppata secondo le indicazioni della Tabella 8-7: (cfr. Tab. 4.1.IV, NTC 2018).
- la verifica sulle limitazioni delle tensioni di esercizio
 - $\sigma_{c,max} \leq 0.45 f_{ck}$
 - $\sigma_{s,max} \leq 0.8 f_{yk}$

Tabella 8-7: Criteri di scelta dello stato limite di fessurazione.

Gruppi di esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	w_d	Stato limite	w_d
A	Ordinarie	frequente	ap. fessure	$\leq w_2$	ap. fessure	$\leq w_3$
		quasi permanente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
B	Aggressive	frequente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$
C	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	ap. fessure	$\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$

Nei paragrafi che seguono vengono sintetizzate le verifiche del rivestimento provvisorio e quelle del rivestimento definitivo. Le verifiche sui rivestimenti definitivi delle sezioni sono state effettuate dopo la simulazione dello scavo del cunicolo di emergenza, anche se gli effetti dello scavo non hanno indotto particolari incrementi tensionali.

Le verifiche strutturali sono state svolte trascurando le sollecitazioni nella regione nodale arco rovescio/piedritto rappresentativa di una zona di diffusione delle tensioni.

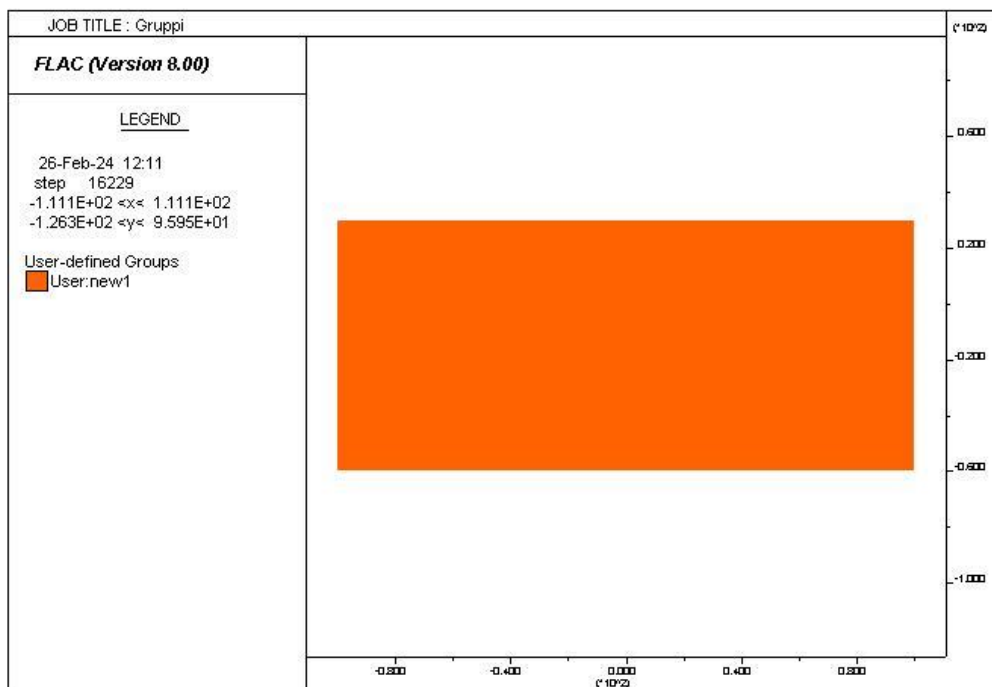
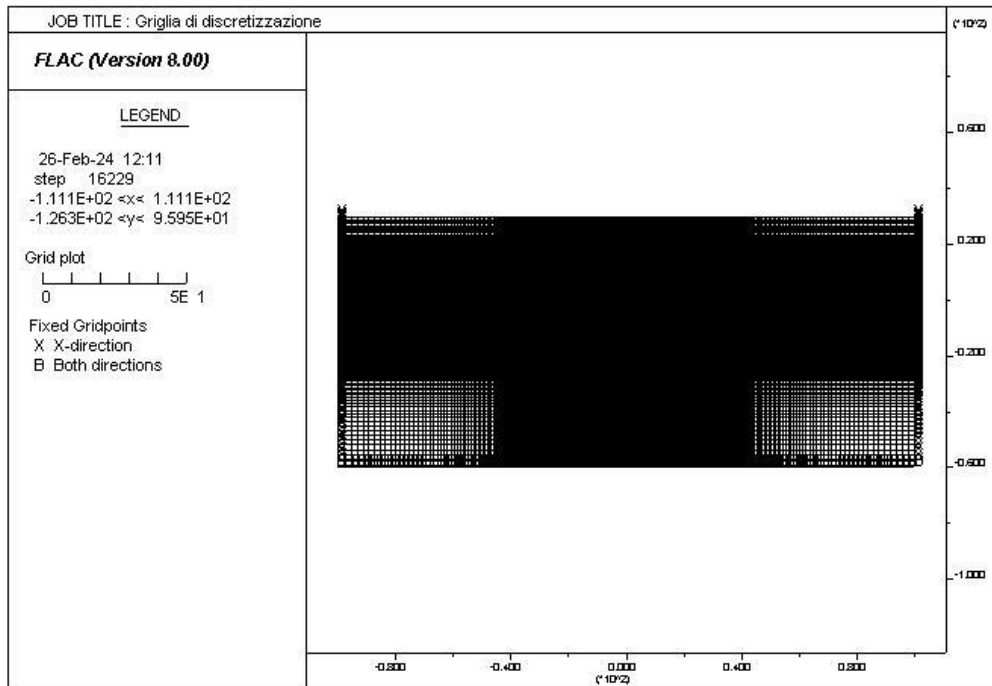
Si riporta inoltre una sintesi delle armature adottate a valle del calcolo:

Tabella 8-8: sintesi armature

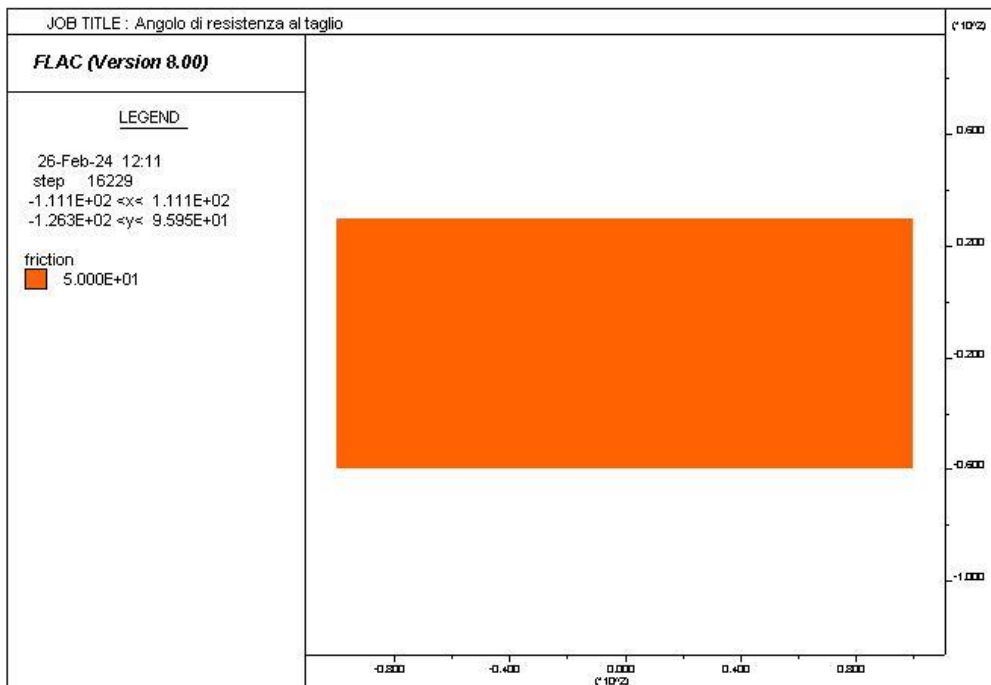
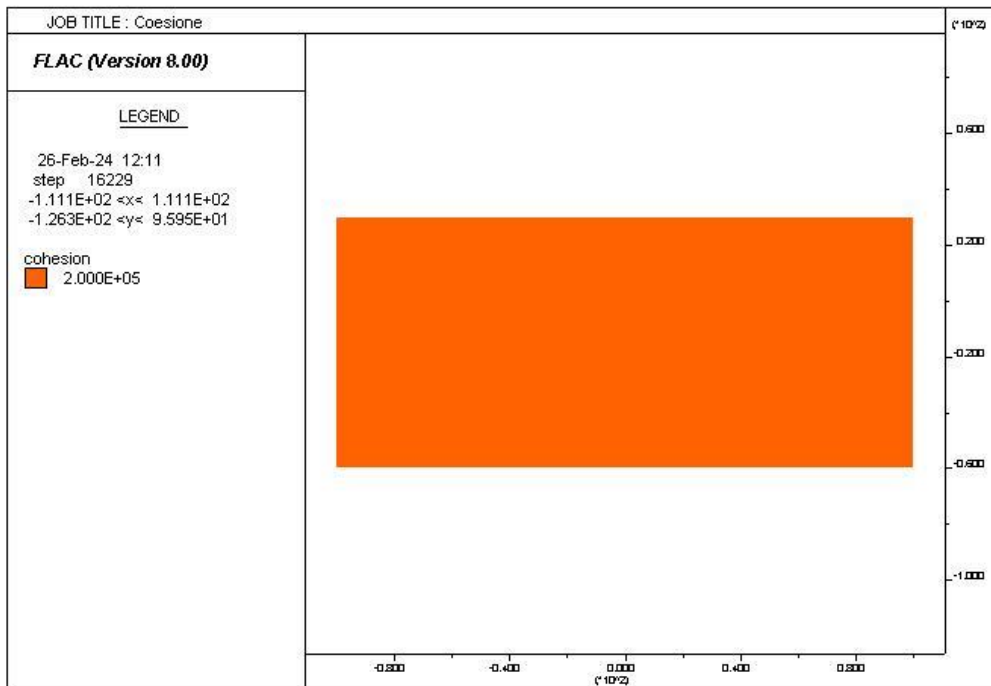
Sezione tipo	Porzione rivestimento	Armatura longitudinale	Armatura a taglio
A0	calotta	Φ20/20	Φ12/20/40
	arco rovescio	Φ20/20	Φ12/20/40
B0	calotta	Φ20/20	Φ12/20/40
	arco rovescio	Φ20/20	Φ12/20/40
B0v	calotta	Φ20/20	Φ12/20/40
	arco rovescio	Φ20/20	Φ12/20/40
B2v	calotta	Φ20/20	Φ12/20/40
	arco rovescio	Φ20/20	Φ12/20/40
PZ	calotta	Φ20/20	Φ12/20/40
	arco rovescio	Φ20/20	Φ12/20/40
By Pass	calotta	Φ20/20	Φ12/20/40
	arco rovescio	Φ20/20	Φ12/20/40

PROGETTAZIONE ATI:

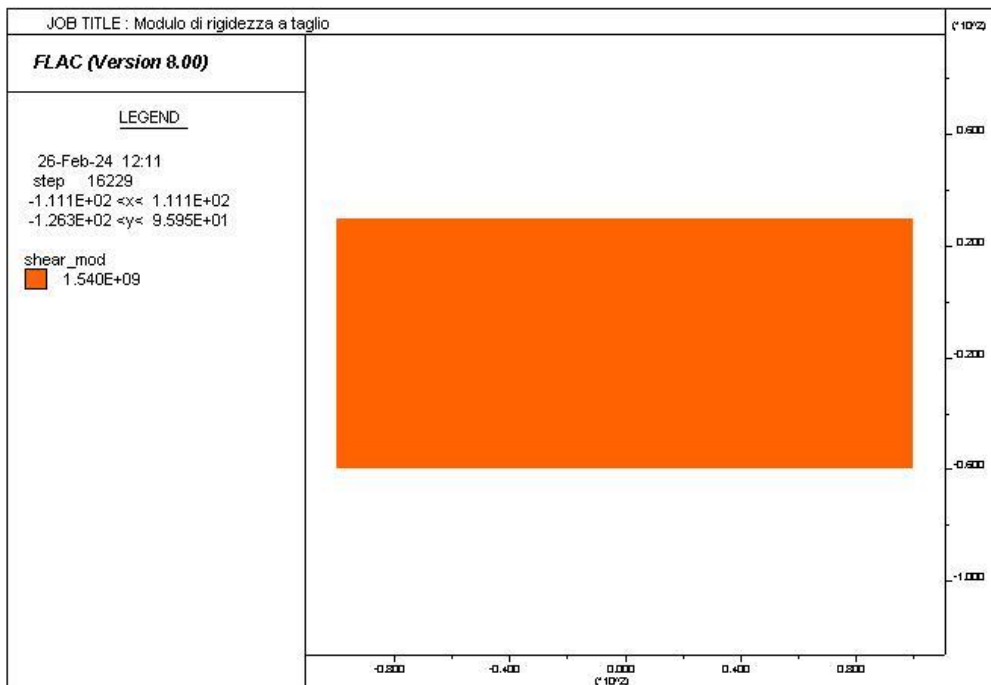
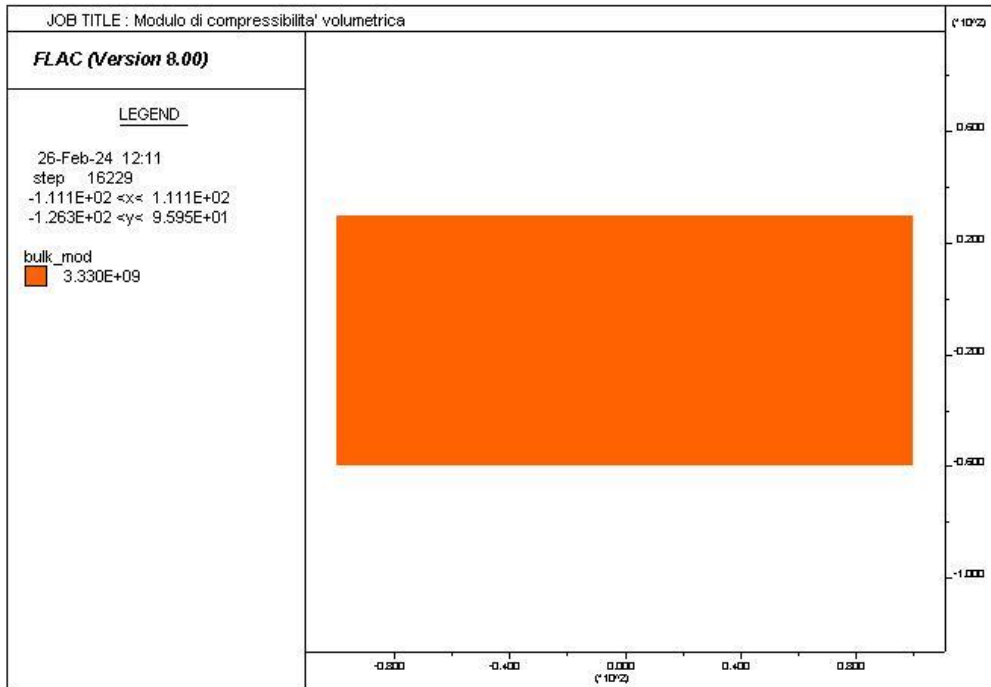
8.7.2 SEZIONE TIPO B0V – SEZ 1



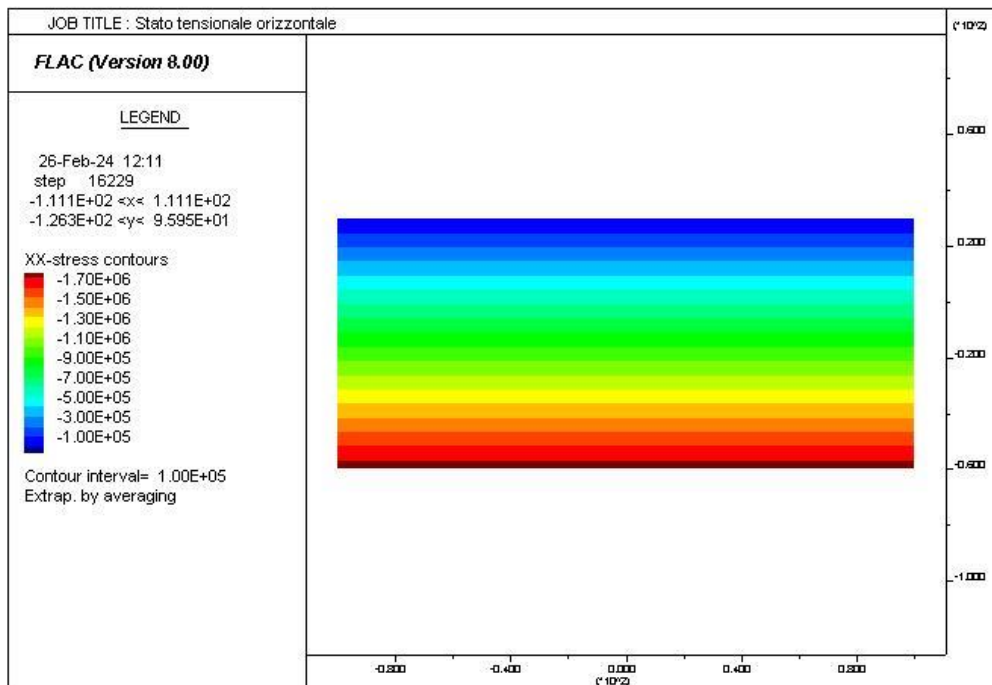
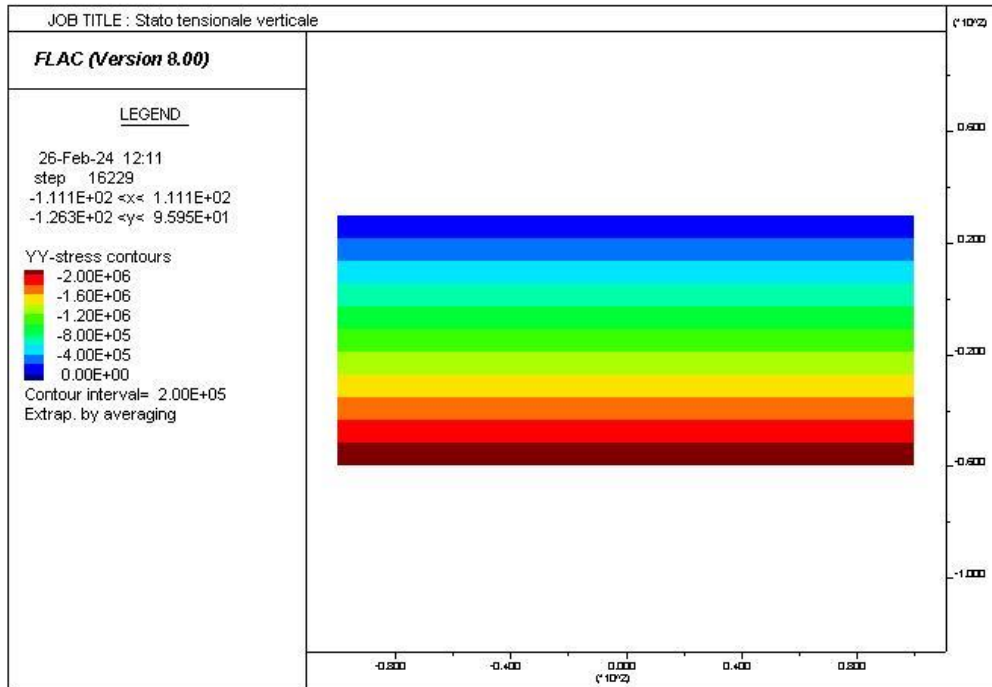
PROGETTAZIONE ATI:



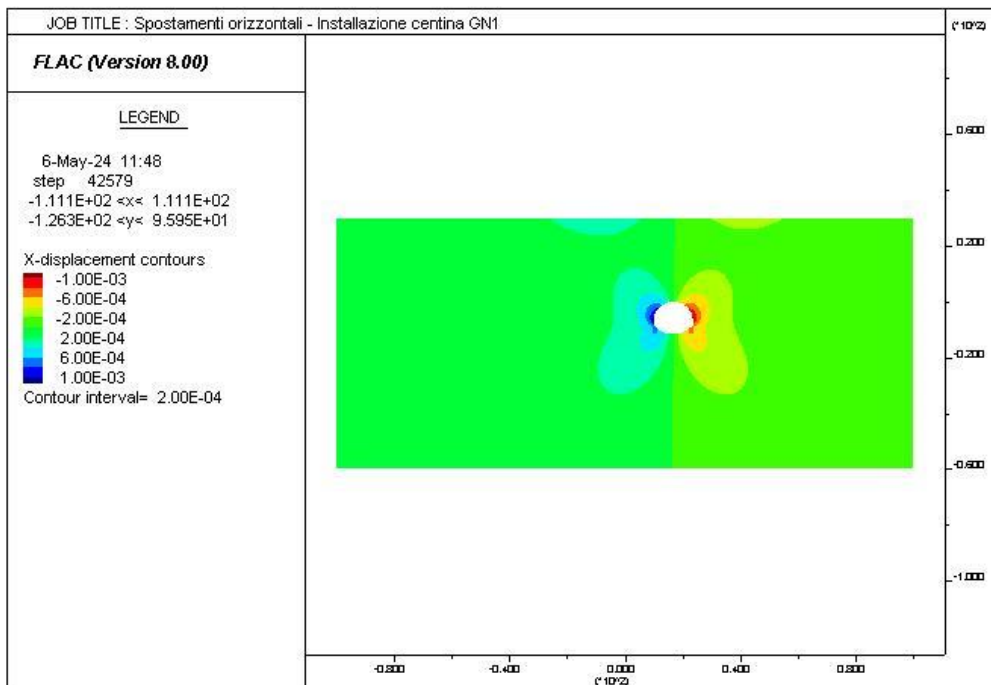
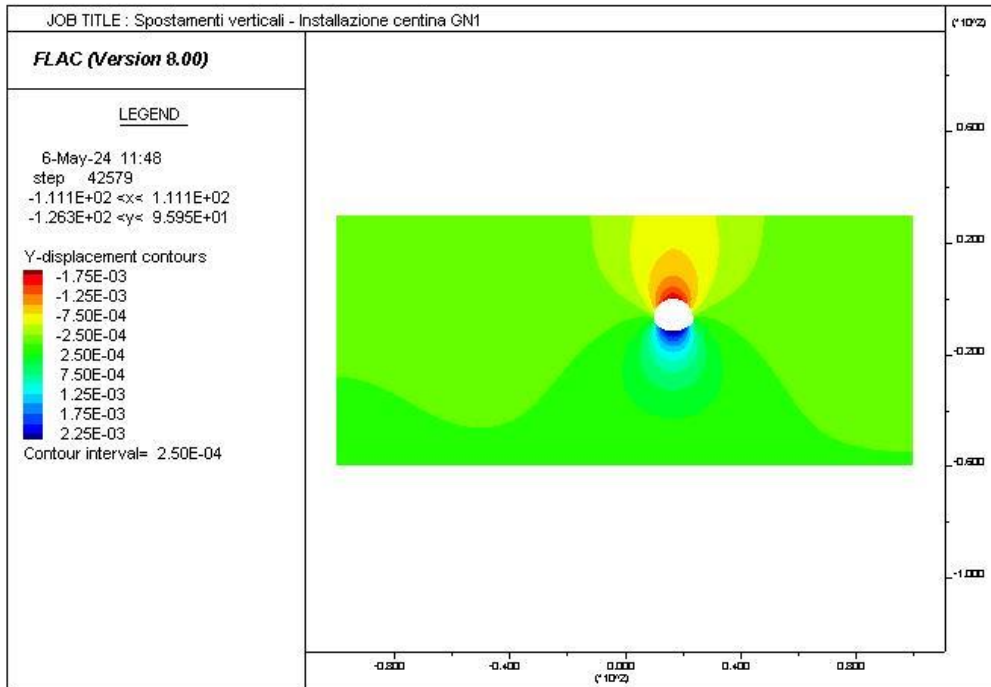
PROGETTAZIONE ATI:



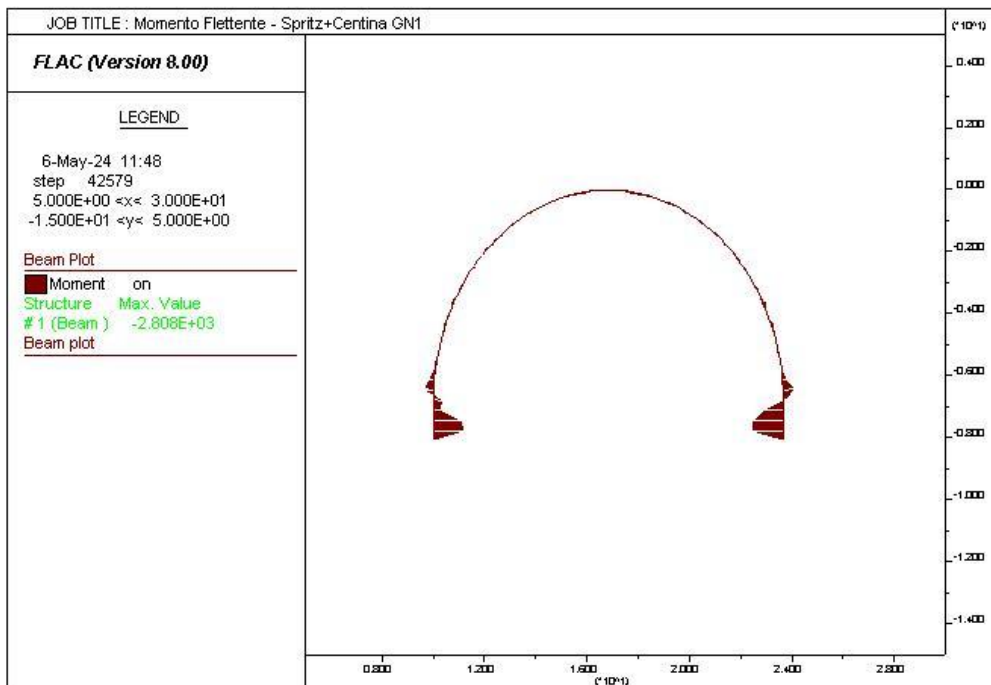
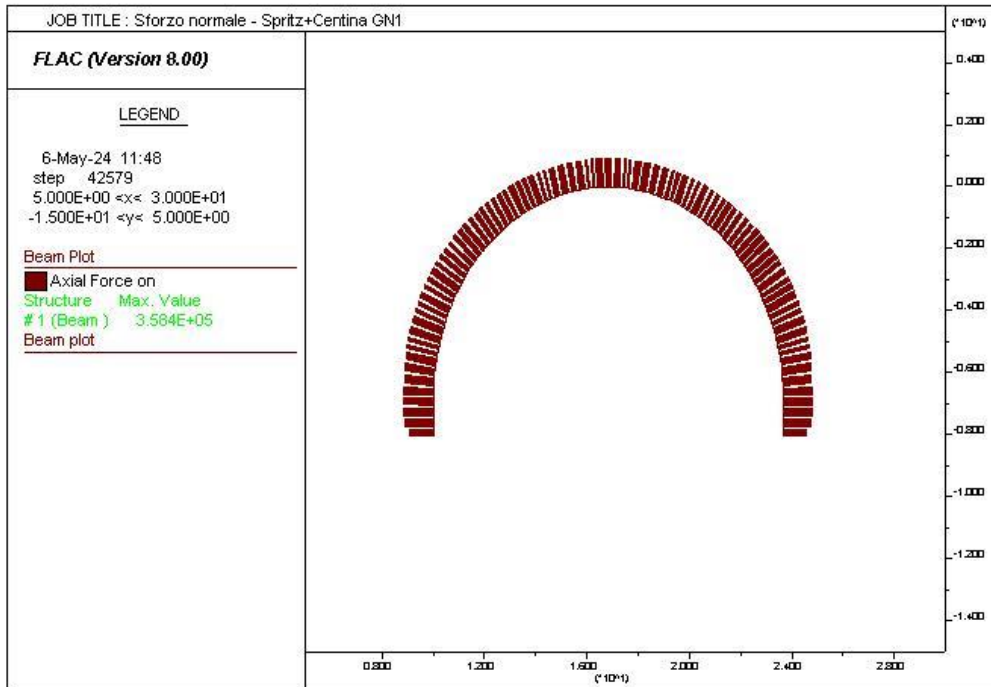
PROGETTAZIONE ATI:



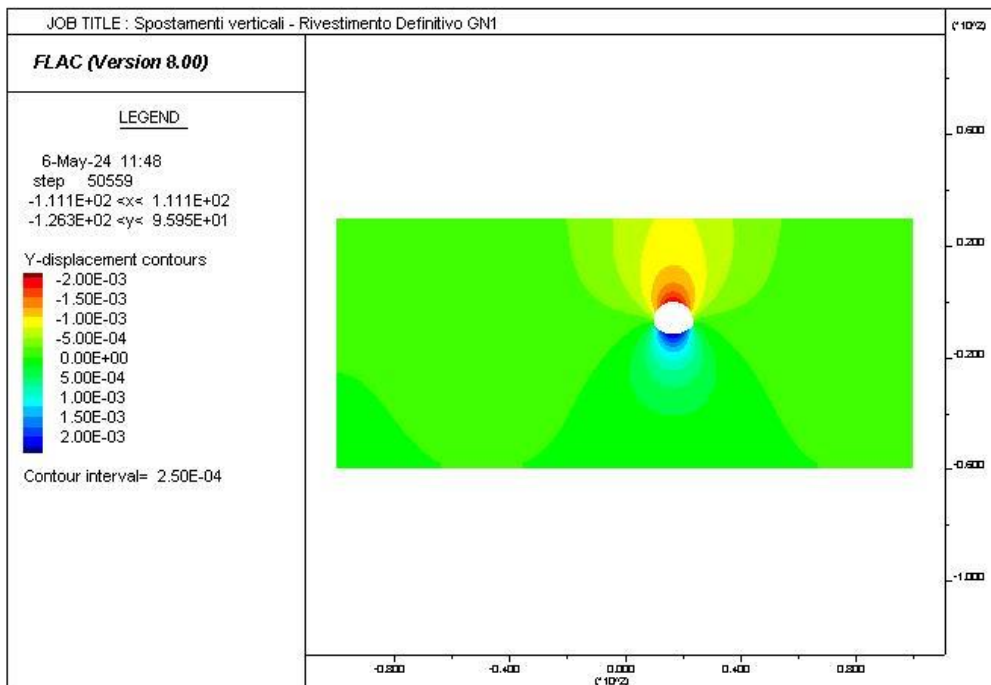
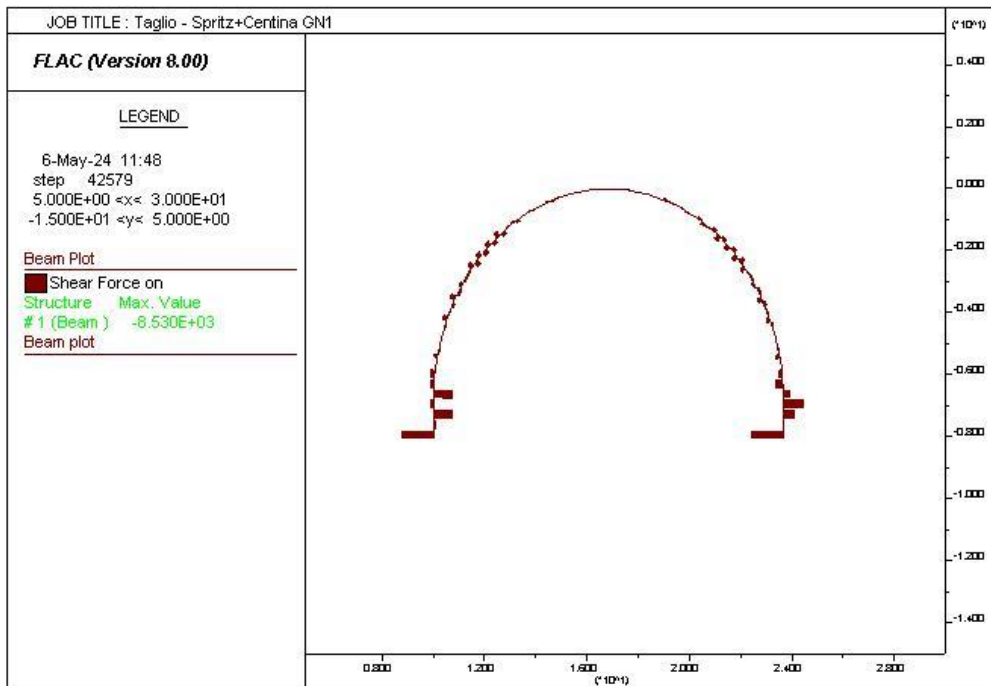
PROGETTAZIONE ATI:



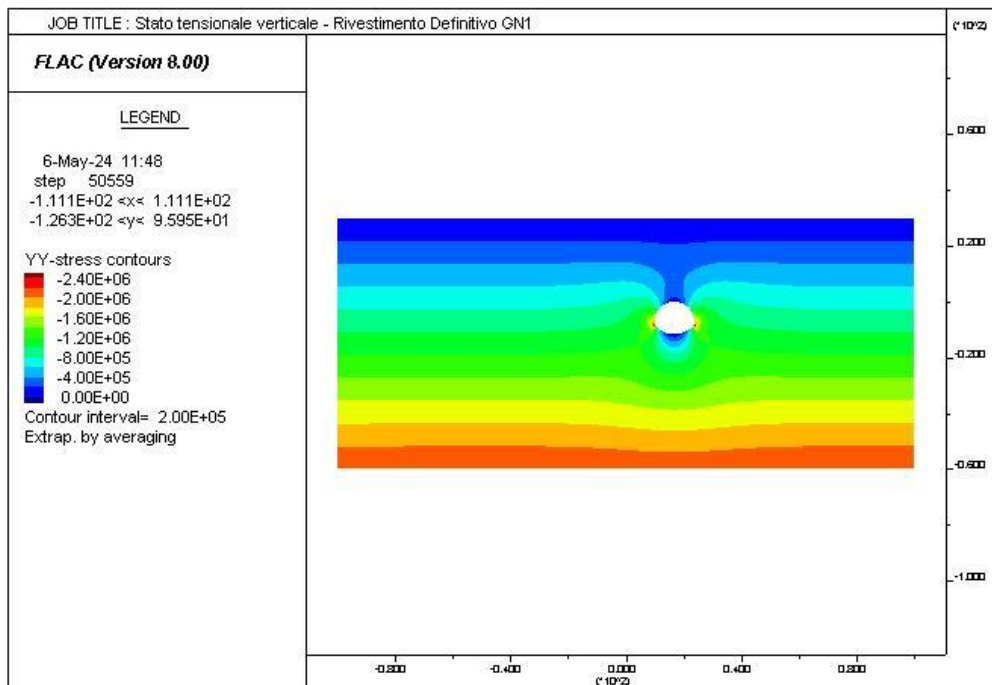
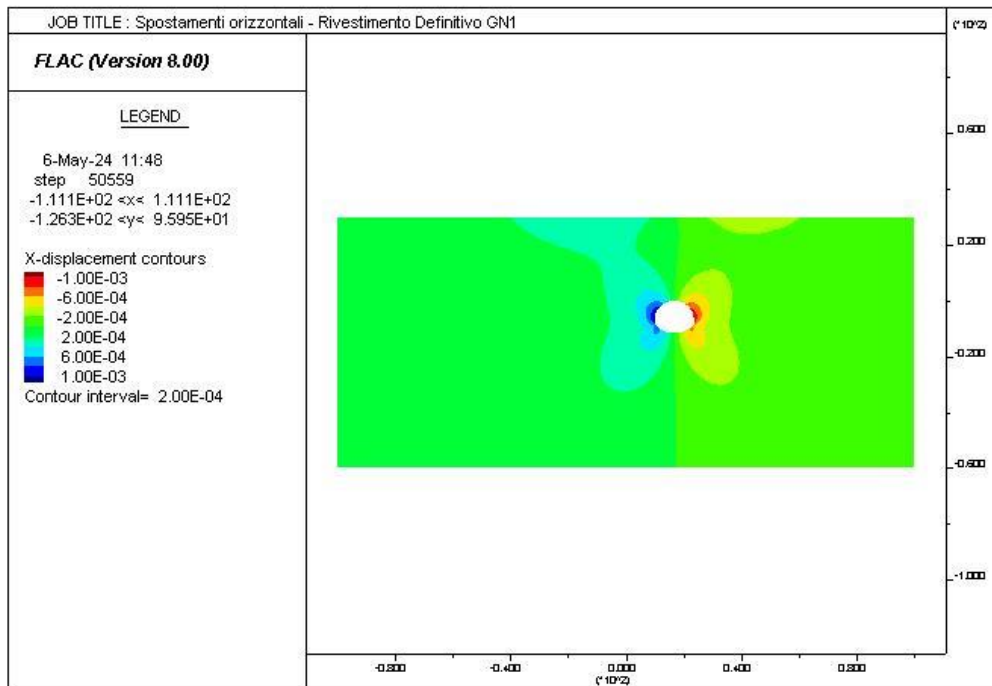
PROGETTAZIONE ATI:



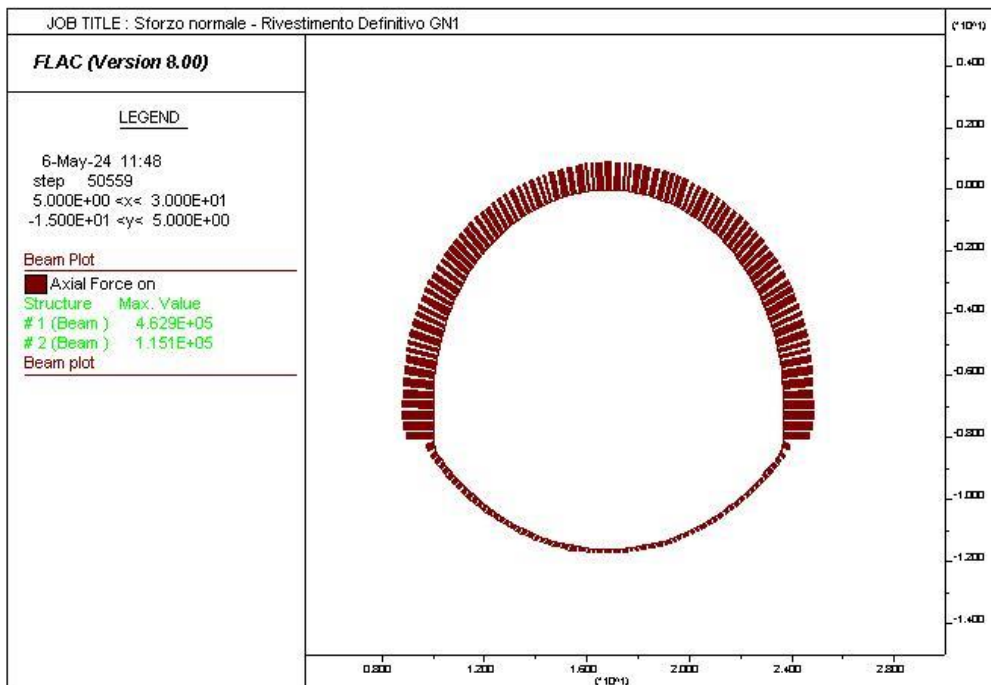
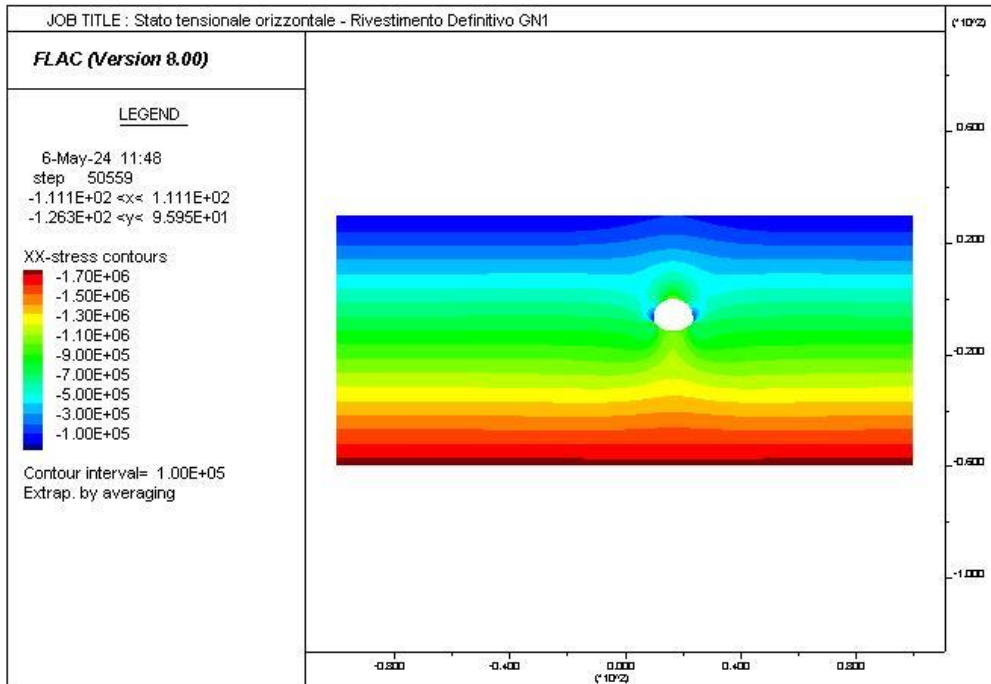
PROGETTAZIONE ATI:



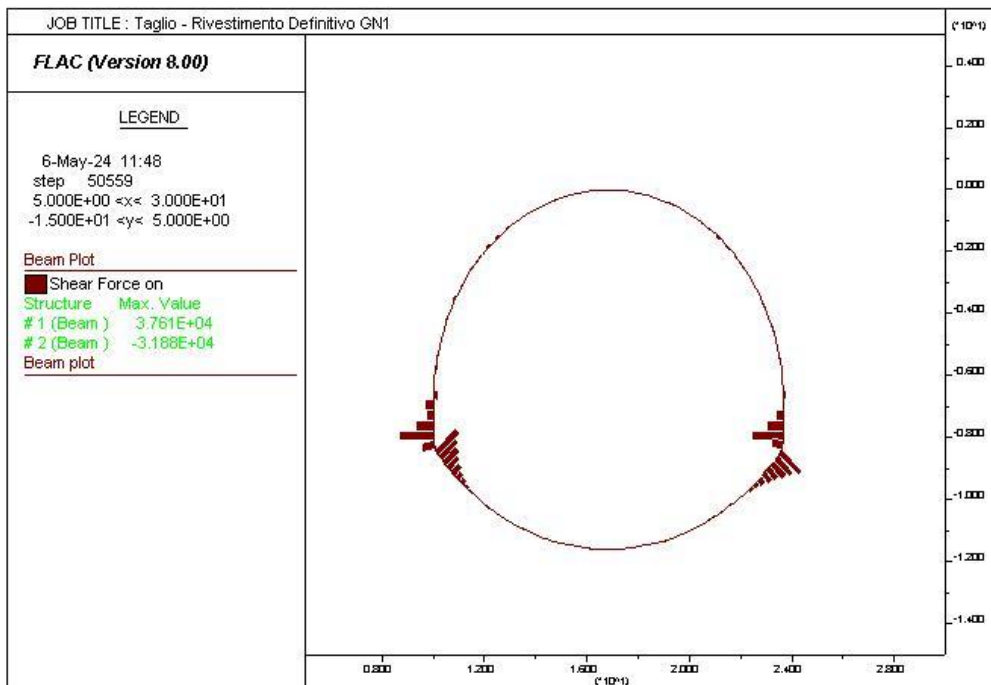
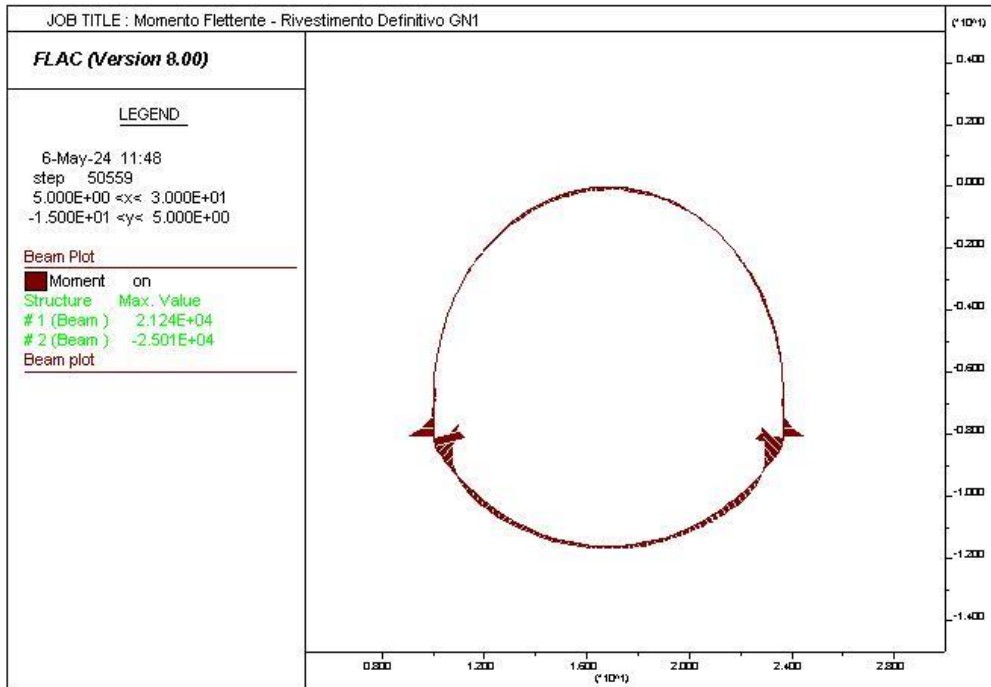
PROGETTAZIONE ATI:



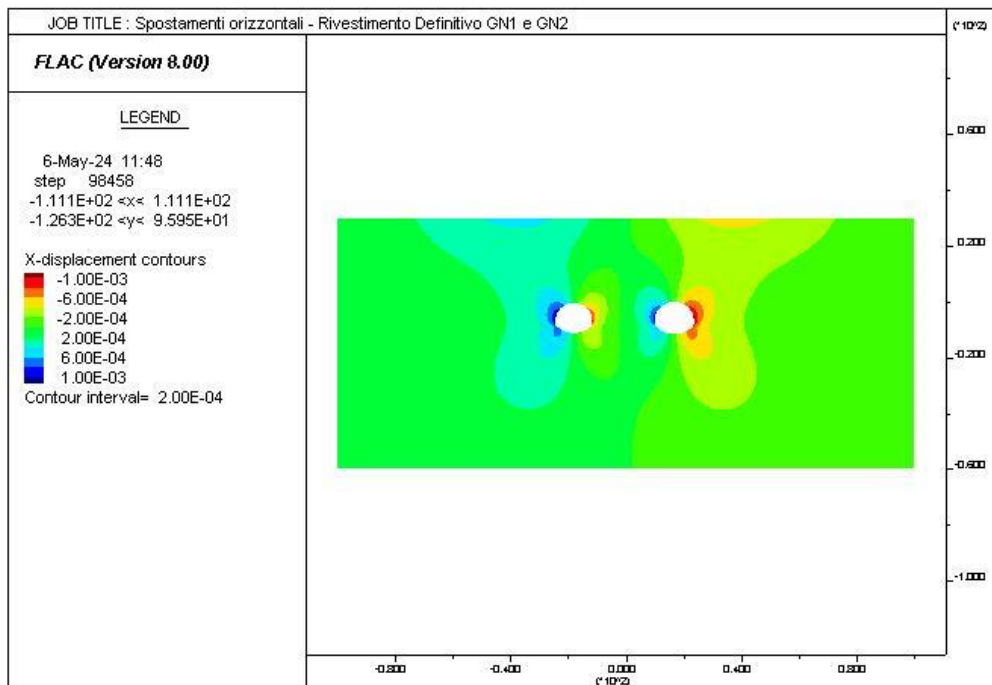
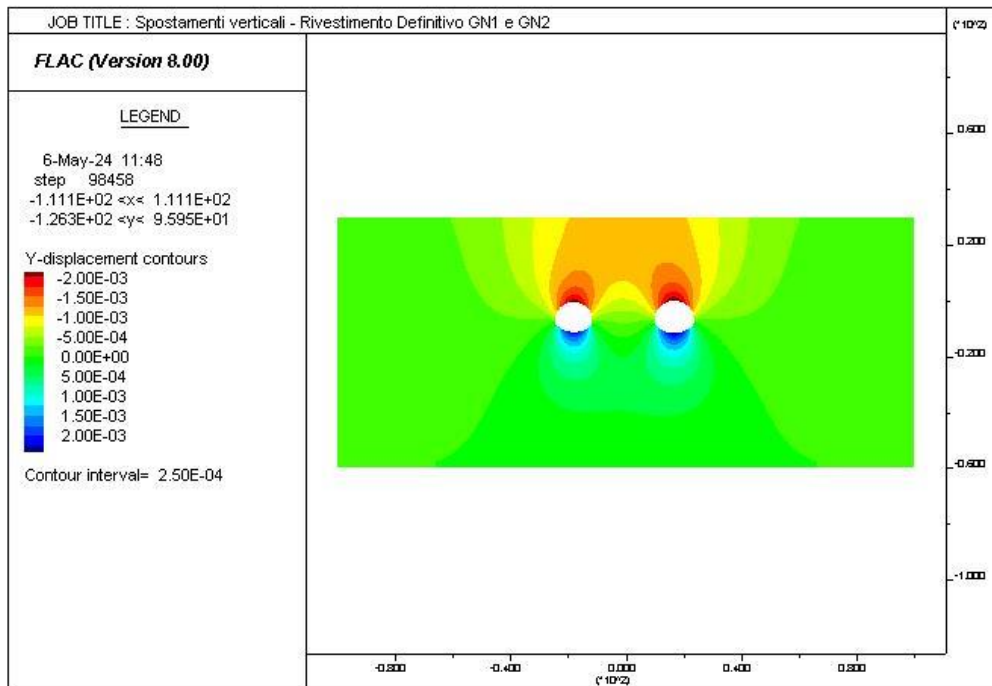
PROGETTAZIONE ATI:



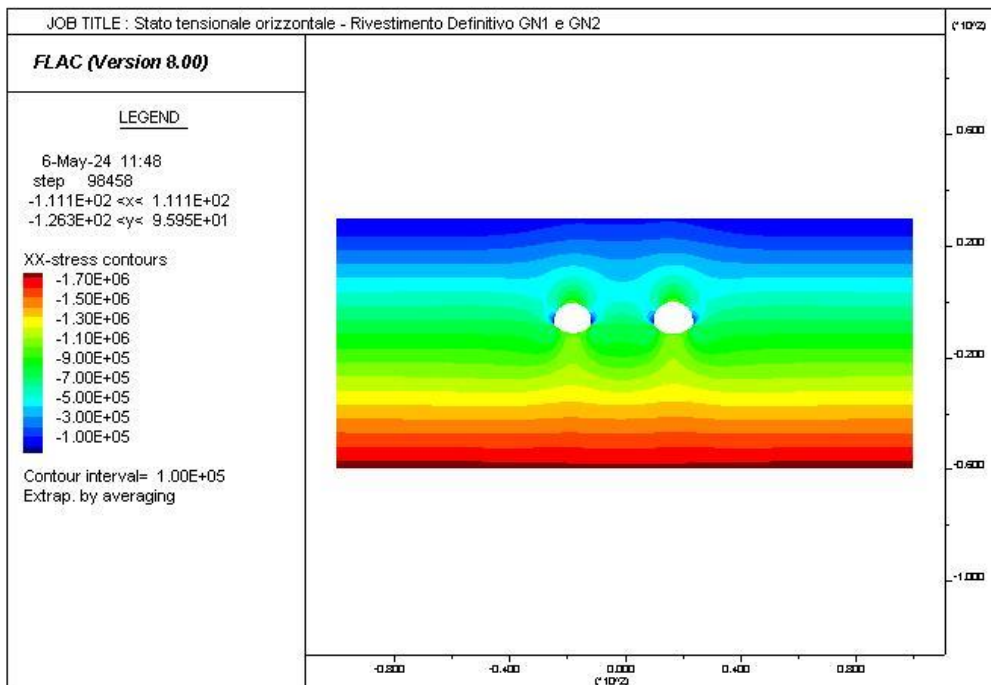
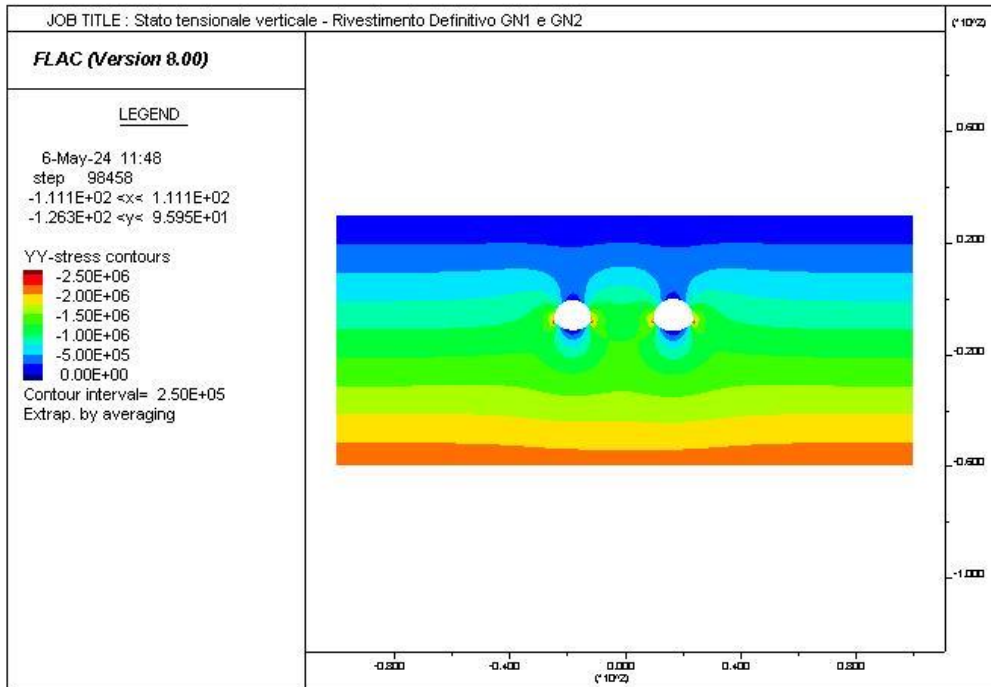
PROGETTAZIONE ATI:



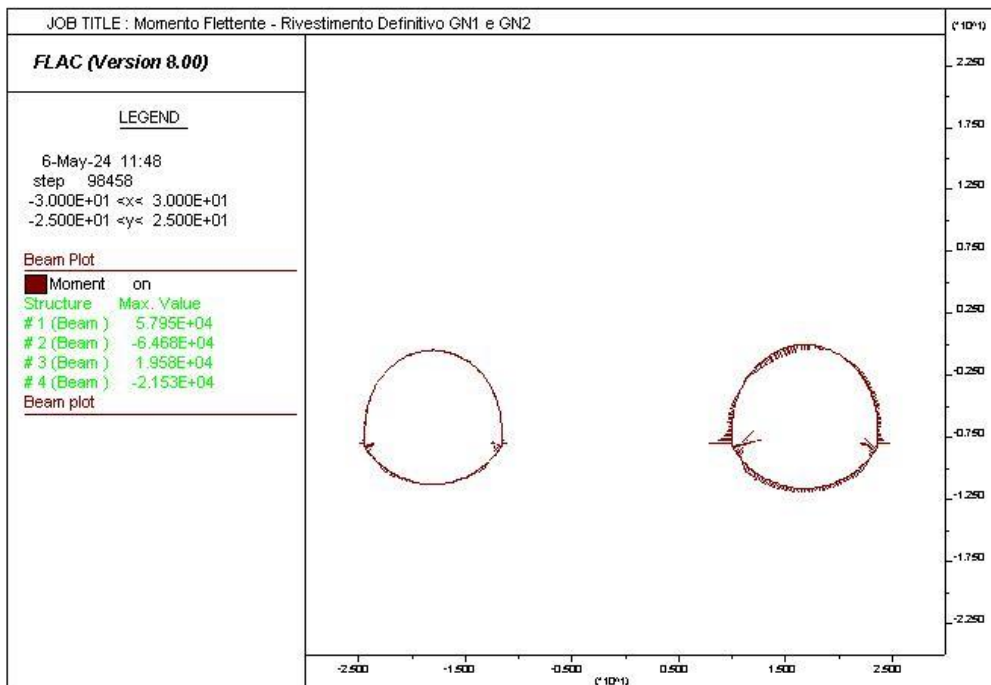
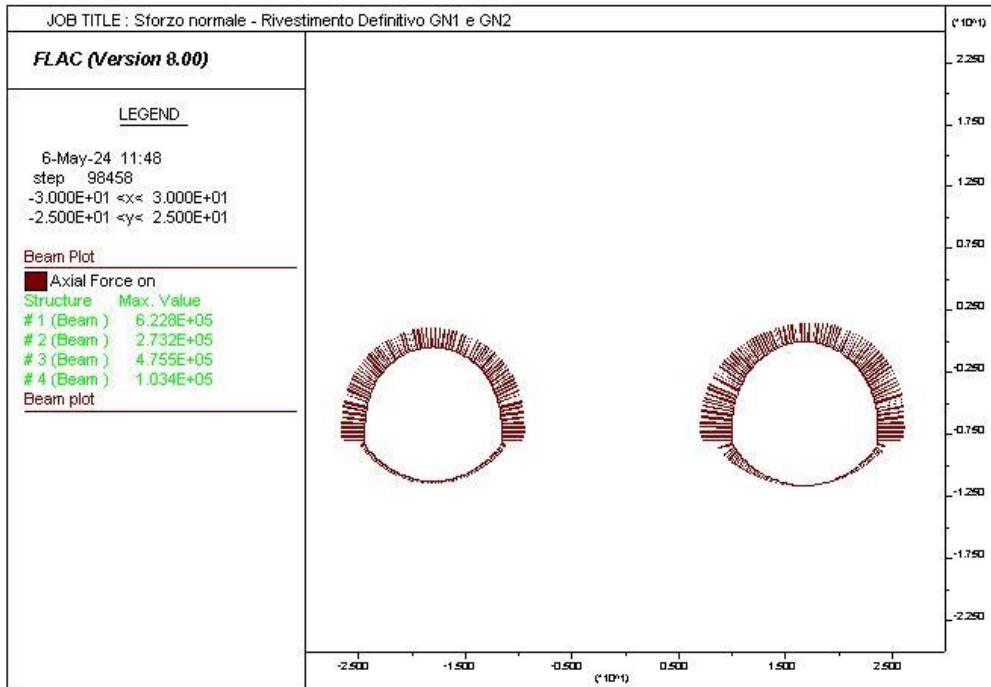
PROGETTAZIONE ATI:

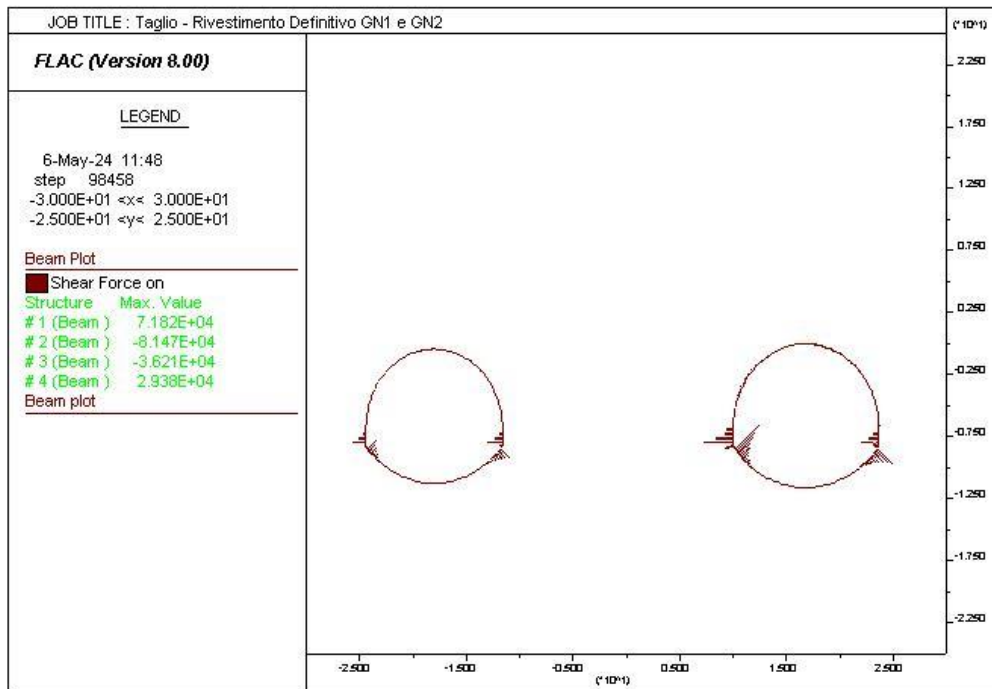


PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:





PROGETTAZIONE ATI:

8.7.2.2 Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine

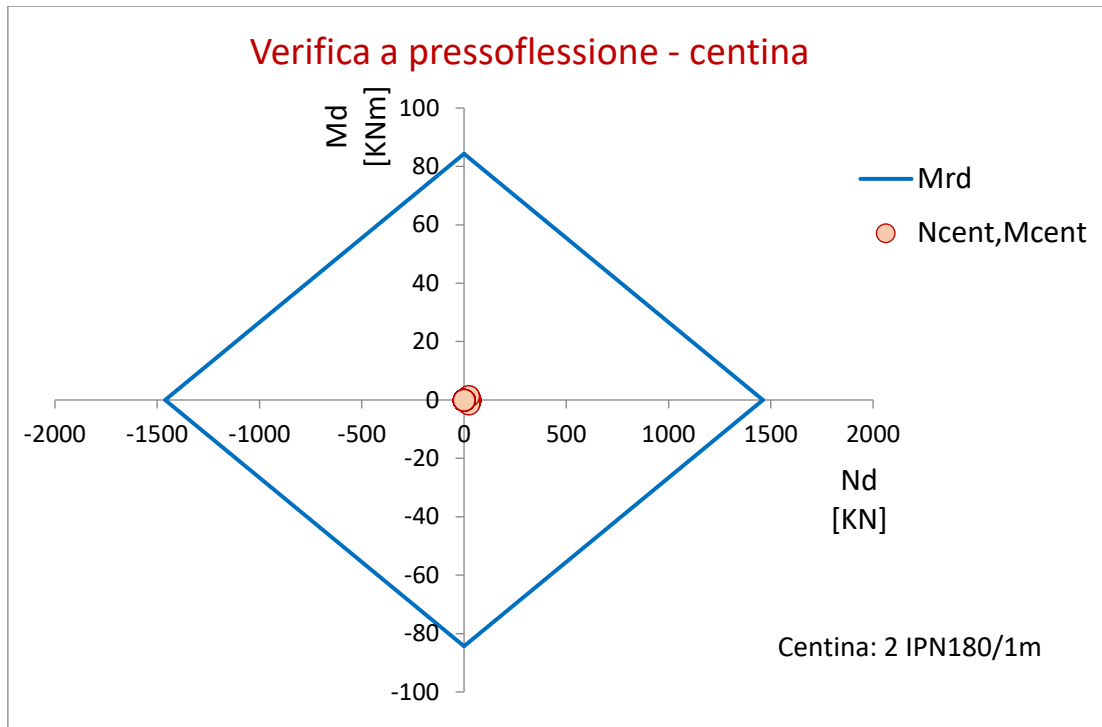


Figura 8-9: Dominio M-N (centina)

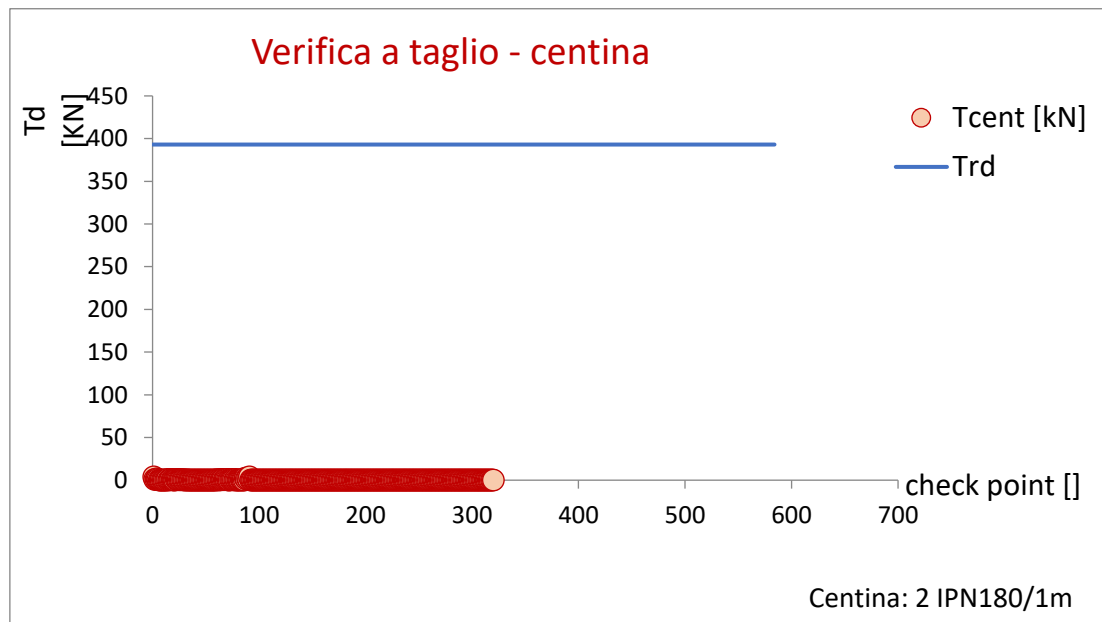


Figura 8-10: Verifica a taglio (centina)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.2.4 Verifiche SLU rivestimento provvisorio

Verifica a pressoflessione - centine+spritz

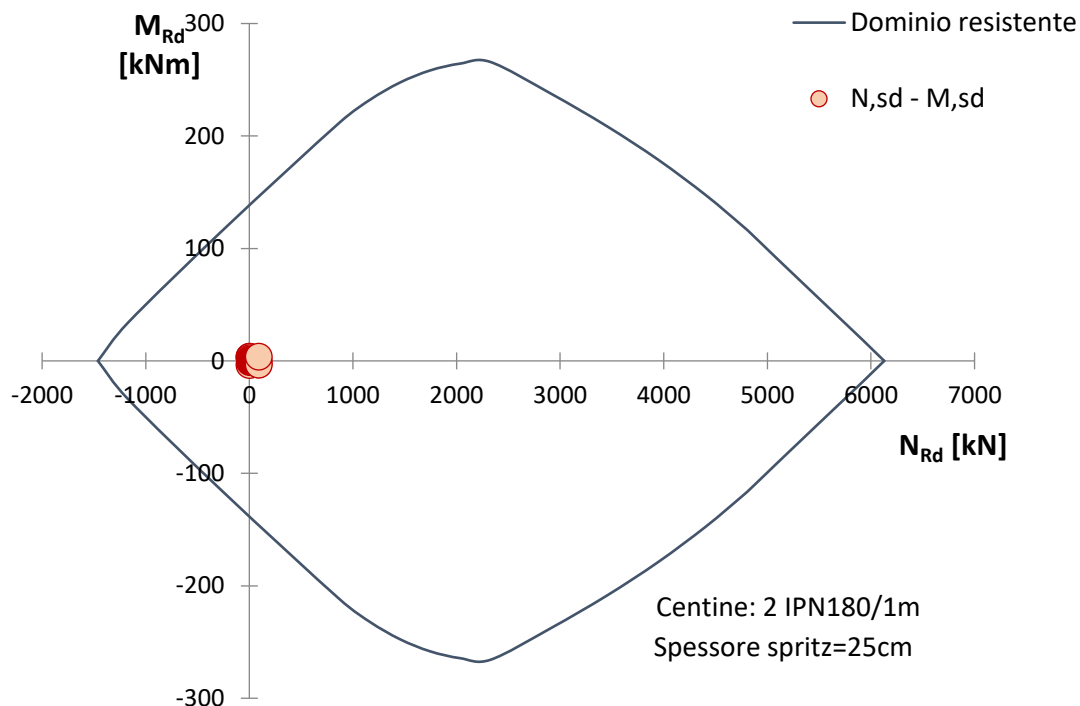


Figura 8-11: Dominio M-N (centina+spritz)

Verifica a taglio (solo centine)	
T_res	393 KN
T_soll	11 KN
Esito	Soddisfatta

Figura 8-12: Verifica a taglio (centina+spritz)

Le verifiche risultano soddisfatte.

8.7.2.6 Verifiche SLU rivestimento definitivo

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

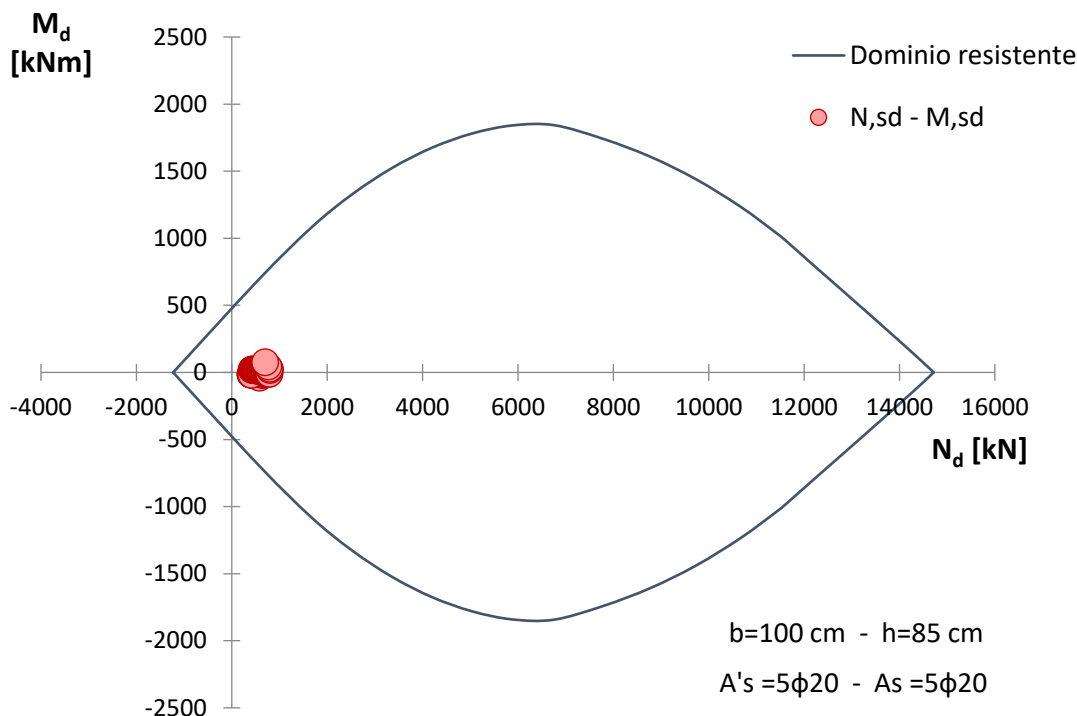


Figura 8-13: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
	Taglio agente	$V_{Ed} = 91.494$	kN
Altezza della sezione	$h =$	850	mm
Copriferro della sezione	$\delta =$	50	mm
Altezza utile della sezione	$d =$	800	mm
Diametro degli spilli	$d_w =$	12	mm
Numero di braccia	$n_w =$	2.5	n° spilli/m (direzione long.)
Area totale spilli	$A_{sw} =$	282.60	mm ²
Passo degli spilli	$s =$	200	mm
Inclinazione delle staffe	$\alpha =$	90	deg
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta =$	21.8	deg
Larghezza minima della sezione	$b_w =$	1000	mm
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c =$	1.2	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} =$	995.3	kN
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} =$	2452.1	kN
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} =$	995.3	kN
Esito della verifica		Soddisfatta	

Figura 8-14: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

Verifica a pressoflessione - arco rovescio

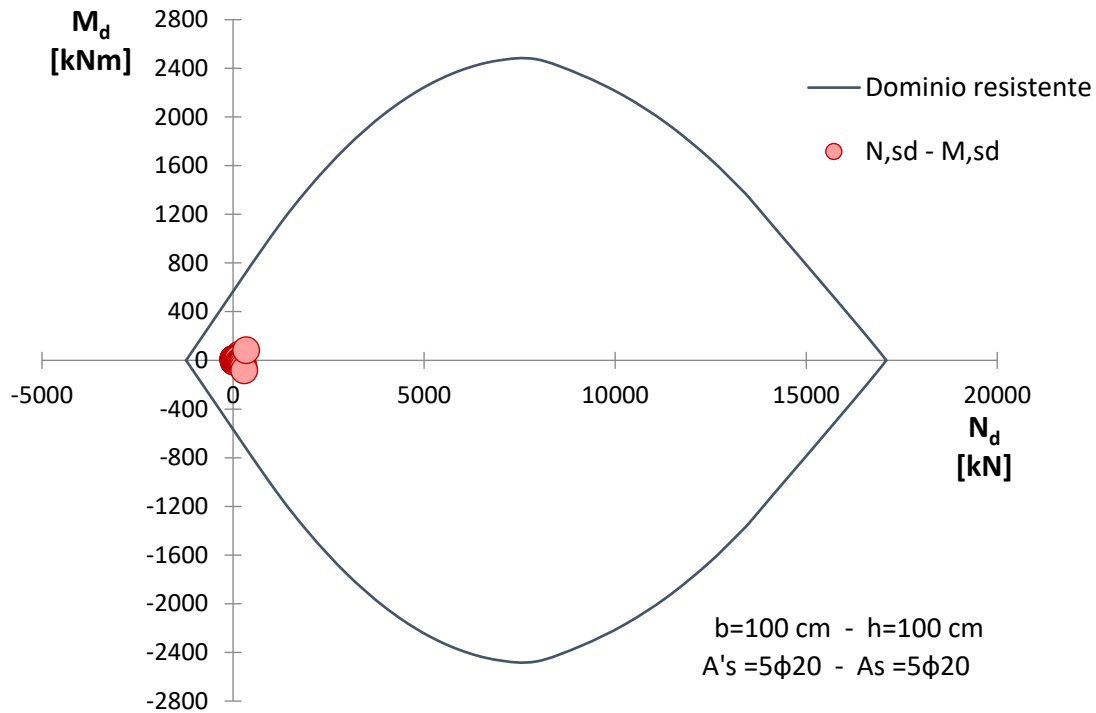


Figura 8-15: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio		
	Taglio agente	$V_{Ed} = 103.87 \text{ kN}$
Altezza della sezione	$h = 1000 \text{ mm}$	
Copriferro della sezione	$\delta = 50 \text{ mm}$	
Altezza utile della sezione	$d = 950 \text{ mm}$	
Diametro degli spilli	$d_w = 12 \text{ mm}$	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$	$\left n^\circ \text{ spilli /m (direzione long.)} \right.$
Area totale spilli	$A_{s,w} = 282.60 \text{ mm}^2$	$\left \text{passo in direzione trasv.} \right.$
Passo degli spilli	$s = 200 \text{ mm}$	$\left \begin{array}{l} 1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \\ \cot(\theta) = 2.5015776 \quad \left 21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \end{array} \right. \right.$
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90 \text{ deg}$	
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8 \text{ deg}$	
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000 \text{ mm}$	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 1181.9 \text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{s,w}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} = 2911.9 \text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 1181.9 \text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta	

Figura 8-16: Verifica a taglio (arco rovescio)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.2.7 Verifiche SLE

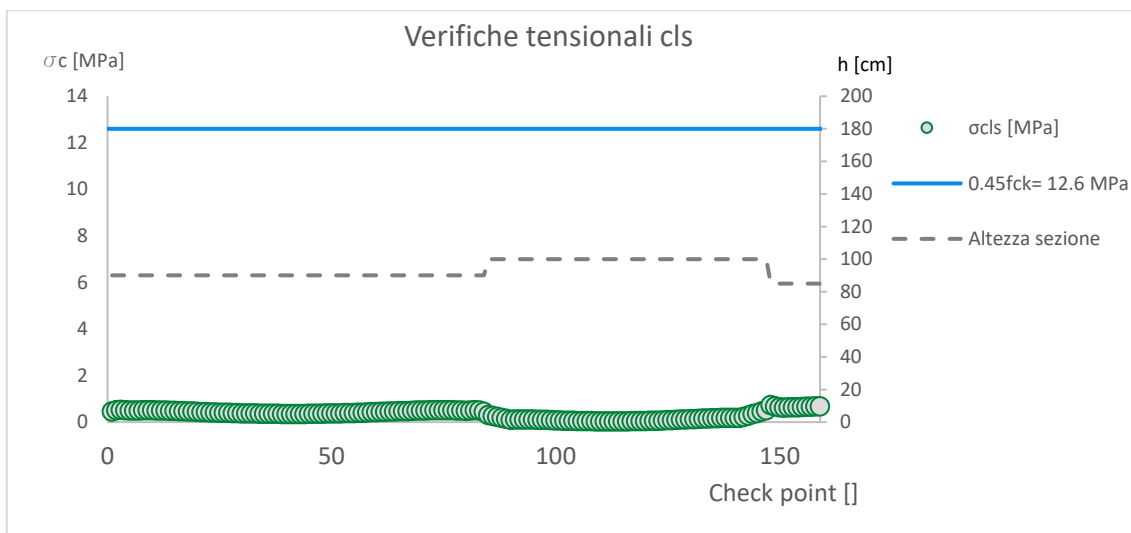


Figura 8-17: Verifiche tensionali cls

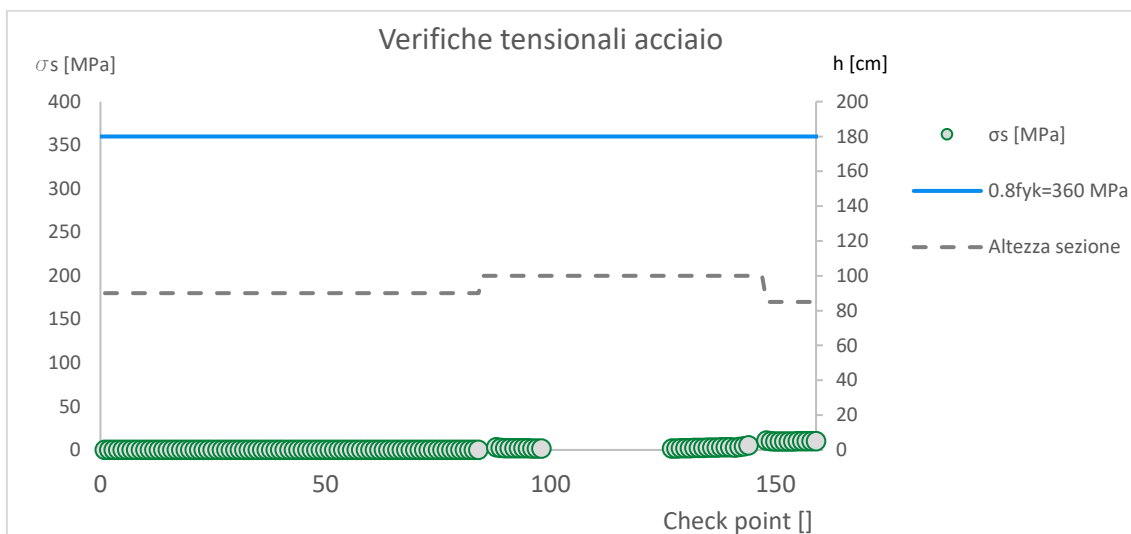


Figura 8-18: Verifiche tensionali acciaio

PROGETTAZIONE ATI:

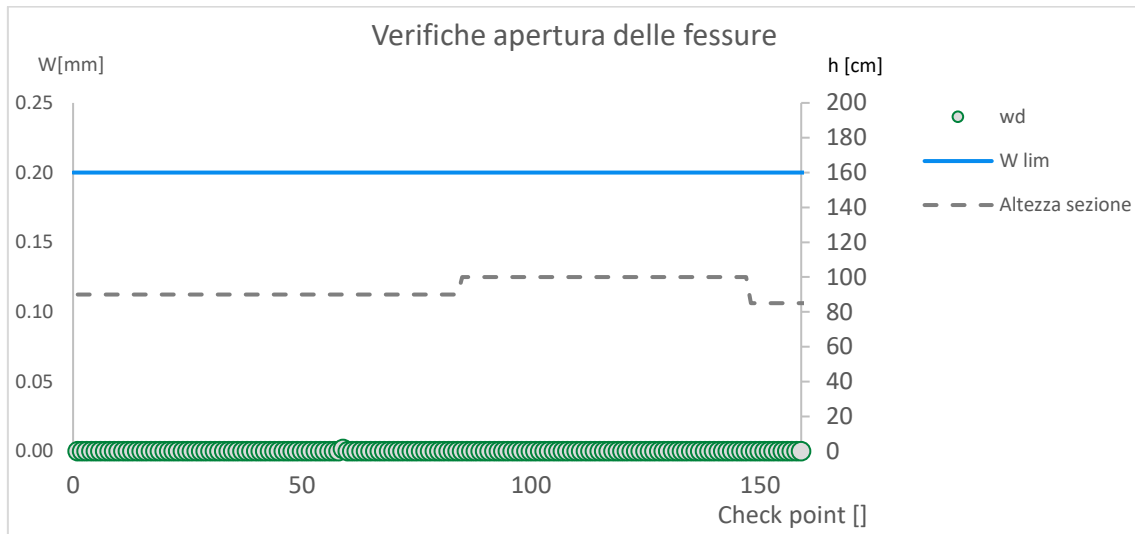


Figura 8-19: Verifiche apertura delle fessure

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.2.9 Verifiche SLU rivestimento definitivo – Condizioni Sismiche

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

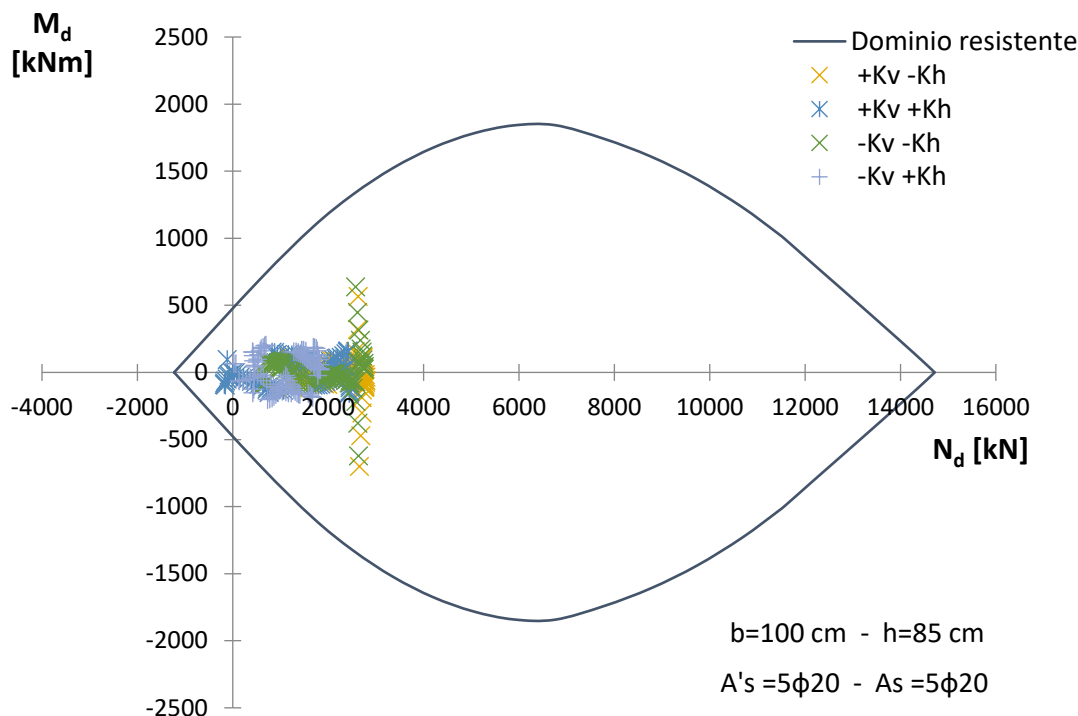


Figura 8-20: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
Taglio agente	$V_{Ed} = 974.22$	kN	
Altezza della sezione	$h = 850$	mm	
Copriferro della sezione	$\delta = 50$	mm	
Altezza utile della sezione	$d = 800$	mm	
Diametro degli spilli	$d_w = 12$	mm	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$		n° spilli/m (direzione long.)
Area totale spilli	$A_{sw} = 282.60$	mm ²	
Passo degli spilli	$s = 200$	mm	passo in direzione trasv.
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90$	deg	
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8$	deg	$\cot(\theta) = 2.5$ $1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5$ $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000$	mm	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$		
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 995.3$	kN	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + \cot\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compresione"	$V_{Rcd} = 2452.1$	kN	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\cot\alpha + \cot\theta) / (1 + \cot^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 995.3$	kN	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta		

Figura 8-21: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

Verifica a pressoflessione - arco rovescio

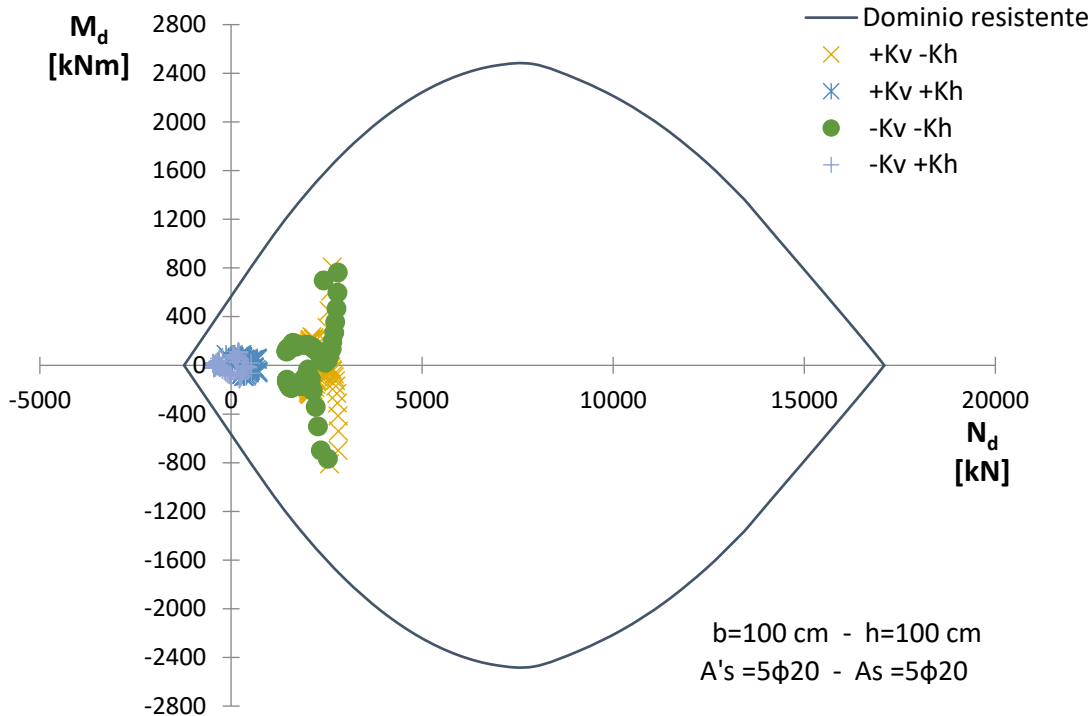


Figura 8-22: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio		
	<i>Taglio agente</i>	$V_{Ed} = 1105.39 \text{ kN}$
Altezza della sezione	$h = 1000 \text{ mm}$	
Copriferro della sezione	$\delta = 50 \text{ mm}$	
Altezza utile della sezione	$d = 950 \text{ mm}$	
Diametro degli spilli	$d_w = 12 \text{ mm}$	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$	$\left n^\circ \text{ spilli /m (direzione long.)} \right.$
Area totale spilli	$A_{s,w} = 282.60 \text{ mm}^2$	$\left \text{passo in direzione trasv.} \right.$
Passo degli spilli	$s = 200 \text{ mm}$	$\left \begin{array}{l} 1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \\ \cot(\theta) = 2.5015776 \end{array} \right. \left \begin{array}{l} 21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \end{array} \right.$
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90 \text{ deg}$	
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8 \text{ deg}$	
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000 \text{ mm}$	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 1181.9 \text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{s,w}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} = 2911.9 \text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 1181.9 \text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta	

Figura 8-23: Verifica a taglio (arco rovescio)

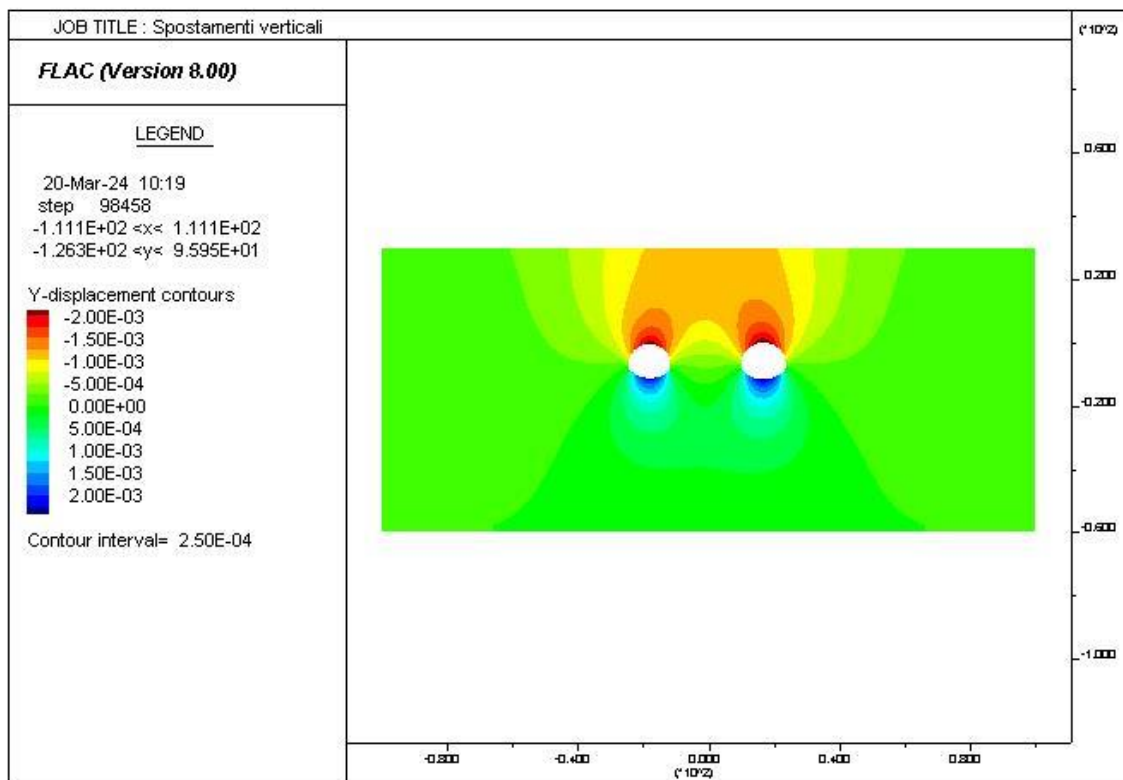
Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.2.10 Subsidenze attese

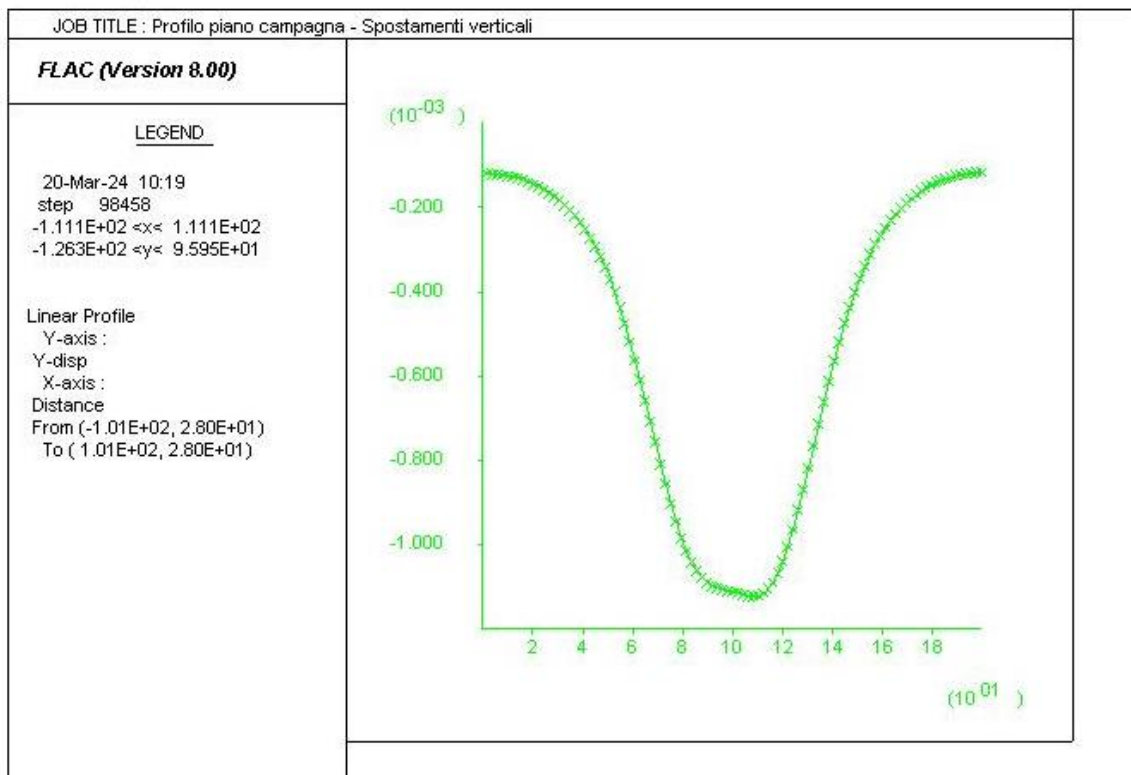
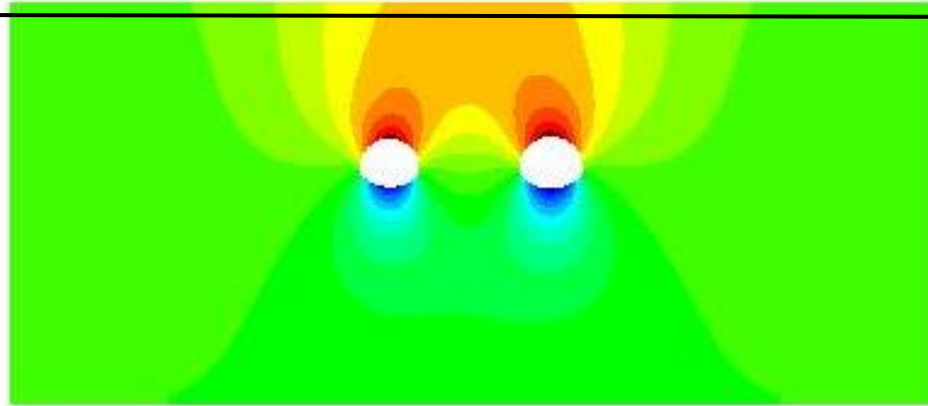
In corrispondenza della sezione di calcolo a basse coperture è stata condotta una analisi agli elementi finiti al fine anche di creare un profilo di subsidenze indotte dallo scavo della galleria.

Di seguito si riporta il contour degli spostamenti verticali nelle condizioni di lungo termine.



PROGETTAZIONE ATI:

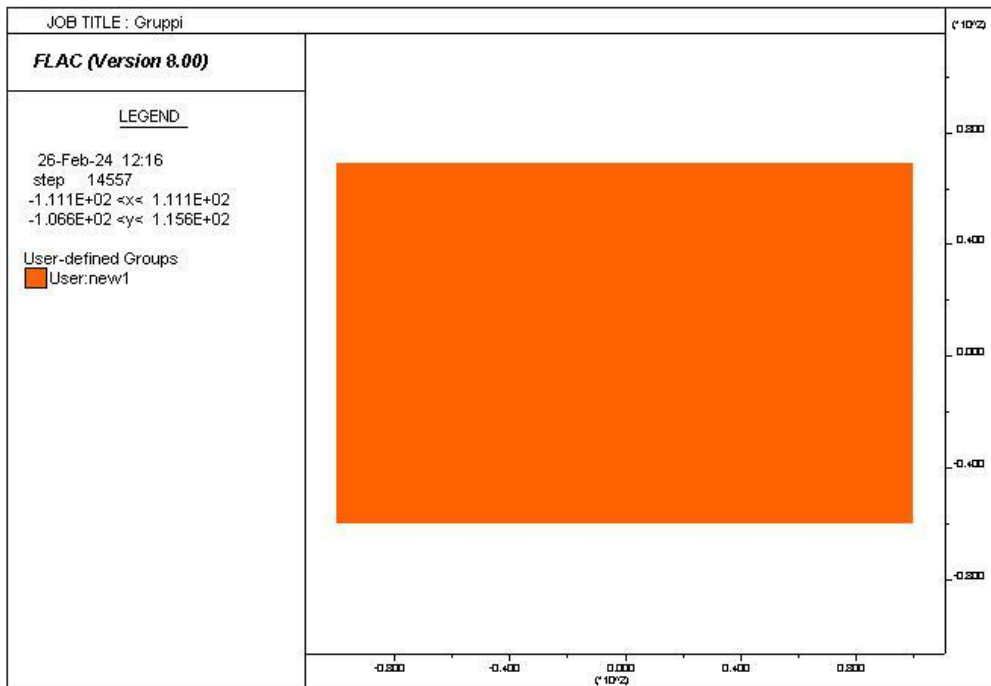
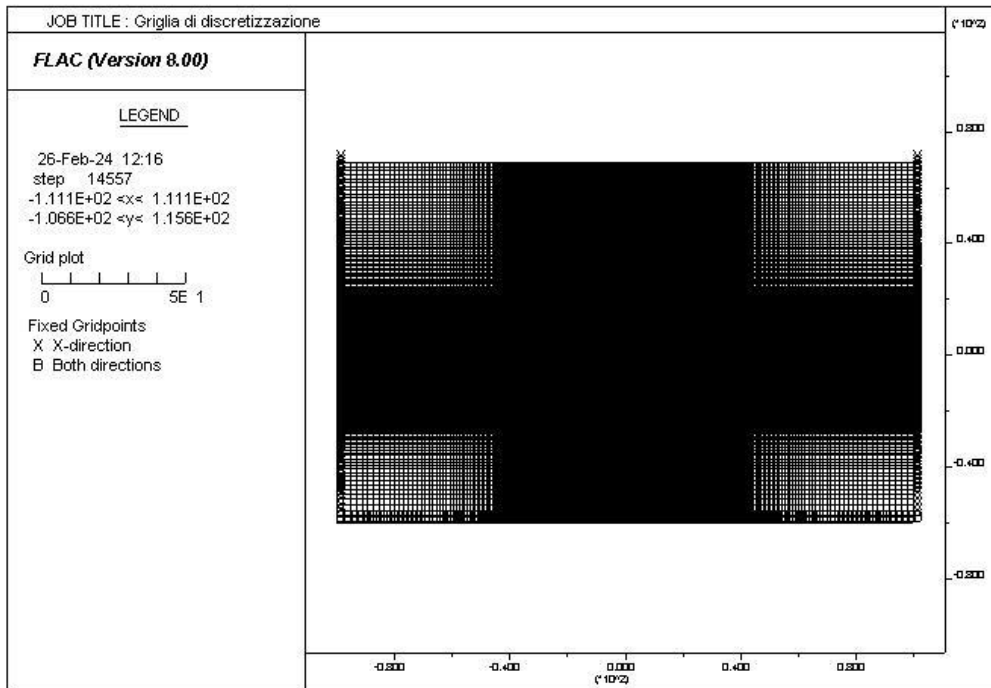
Di seguito si riporta il profilo degli spostamenti verticali in corrispondenza del piano campagna.



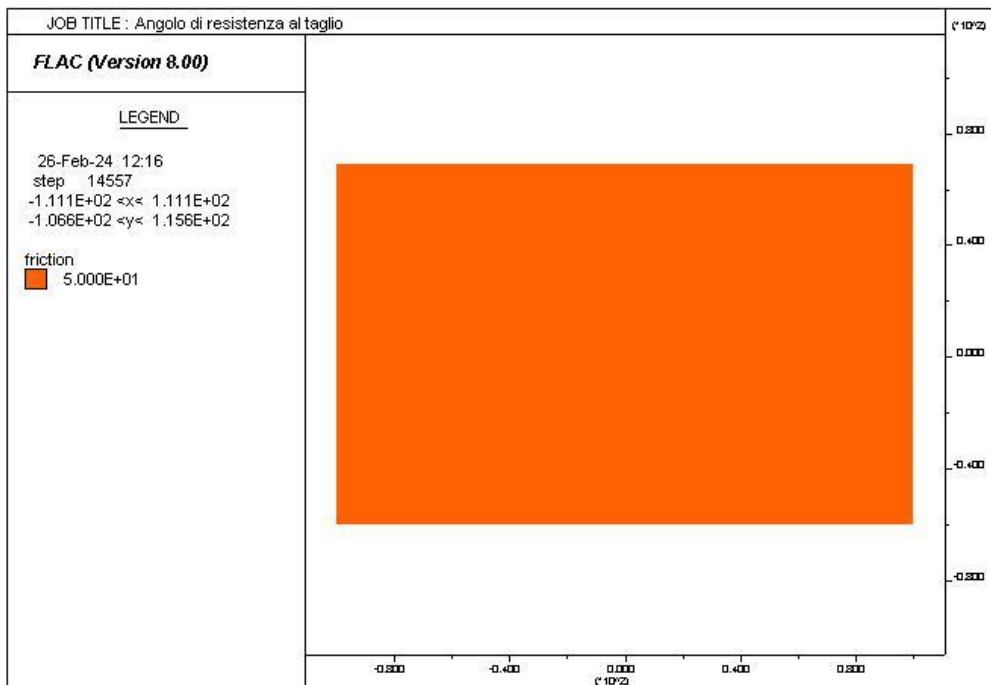
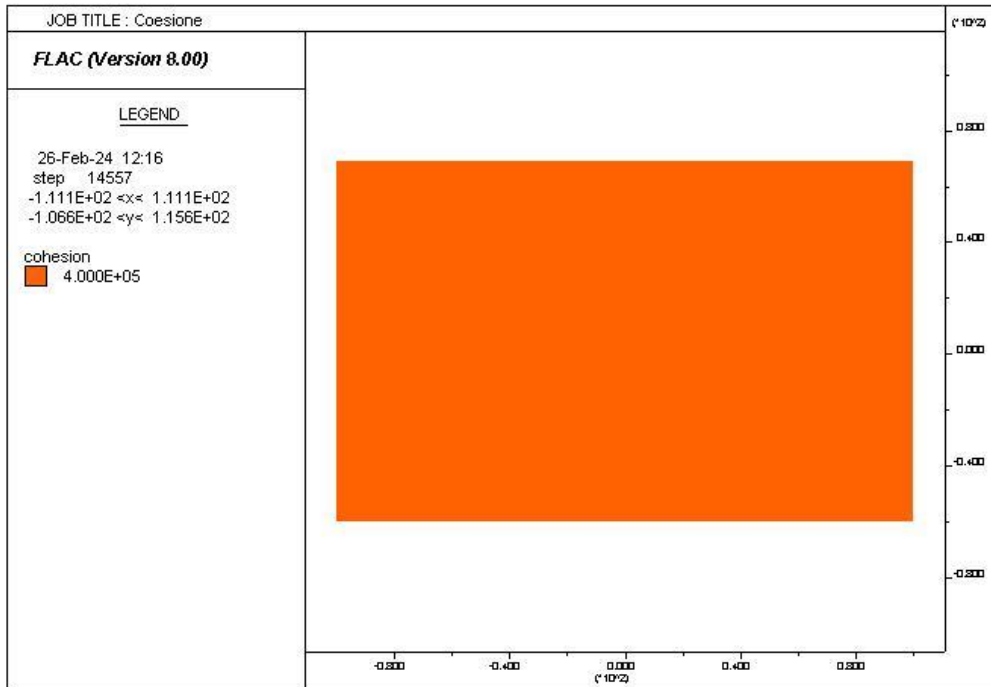
Dal calcolo si riscontrano spostamenti verticali massimi dell'ordine di 1.1 mm, in asse galleria.

PROGETTAZIONE ATI:

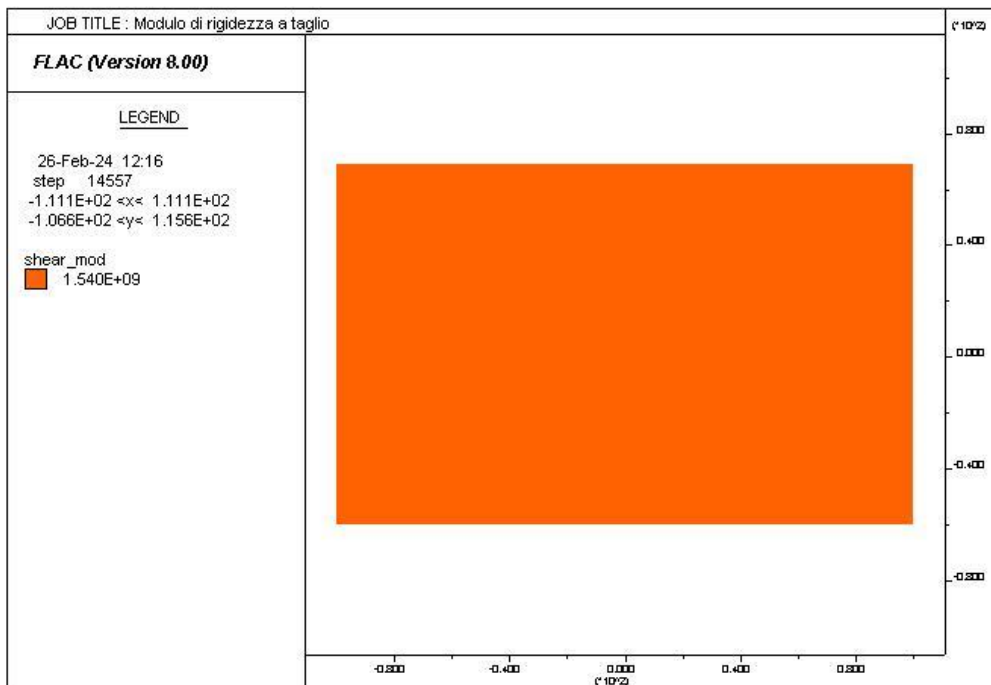
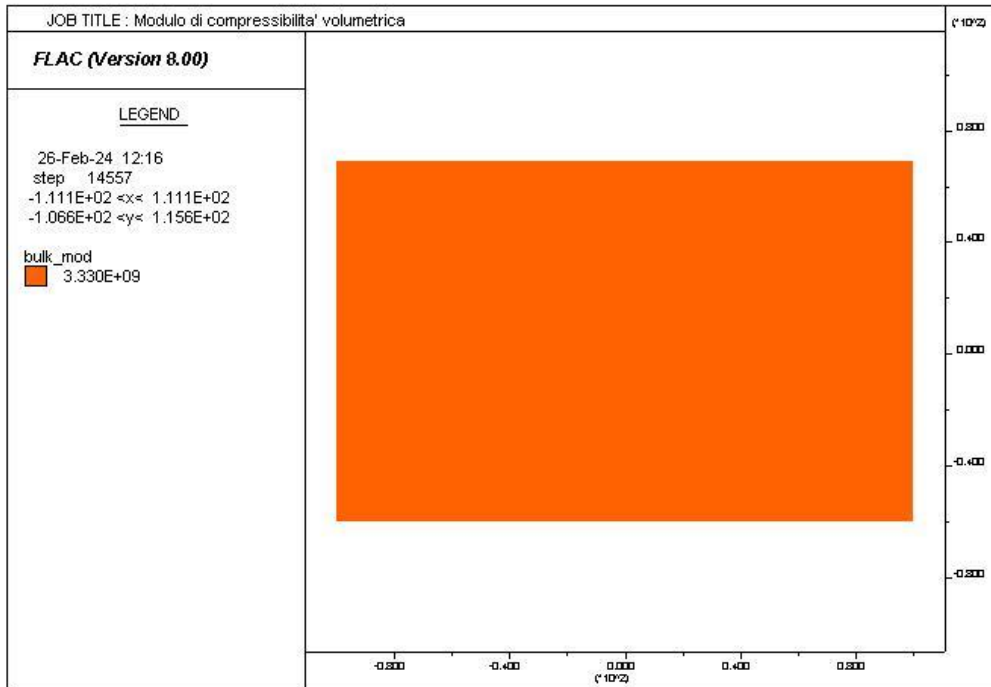
8.7.4 SEZIONE TIPO A0 – SEZ 2



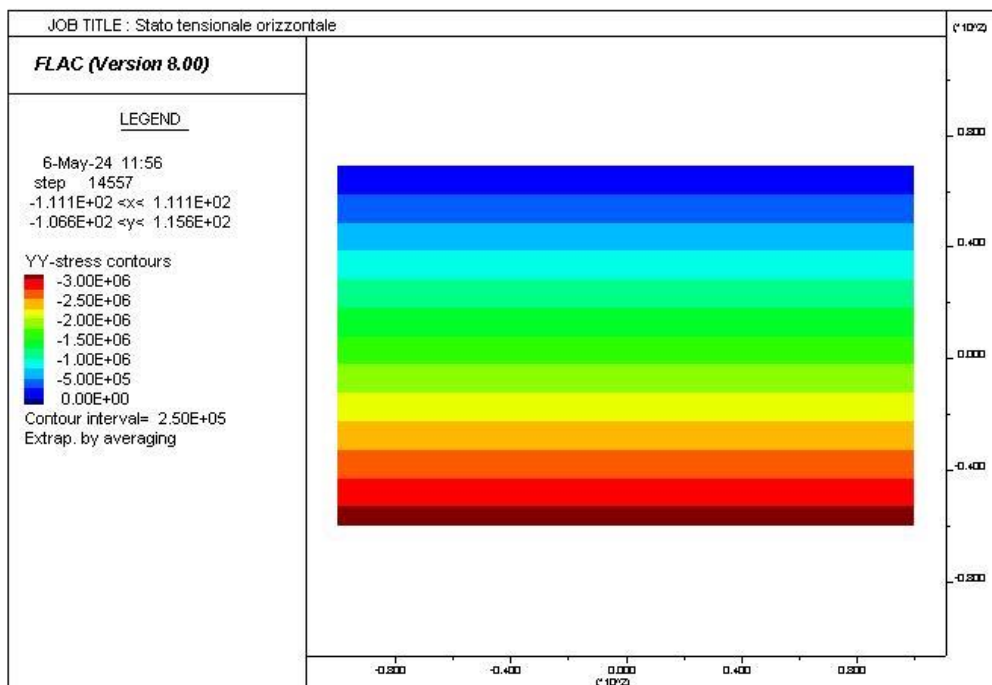
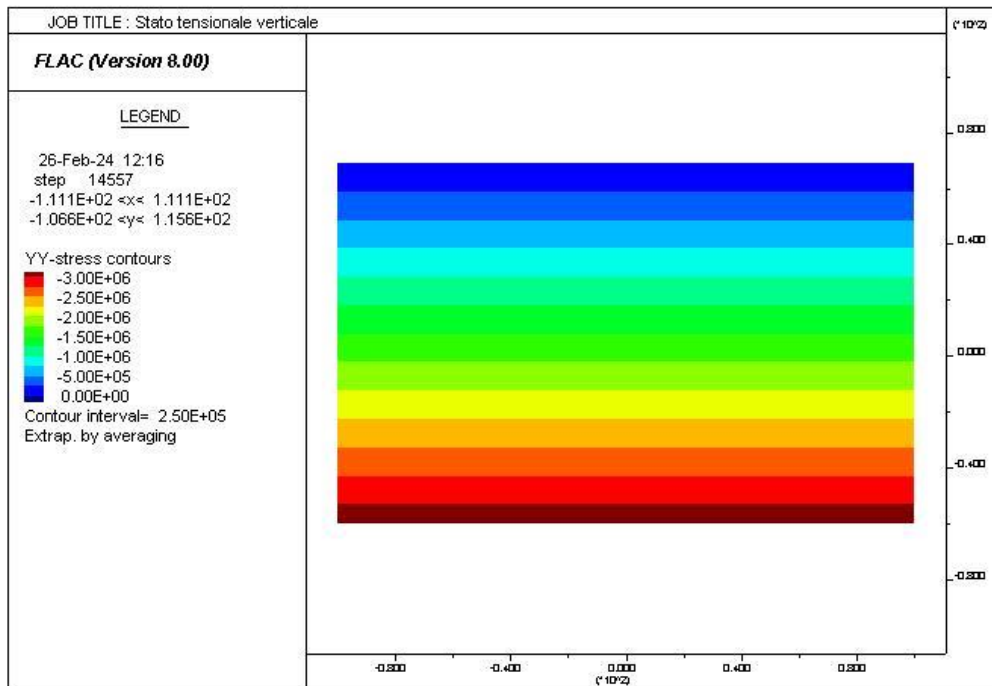
PROGETTAZIONE ATI:



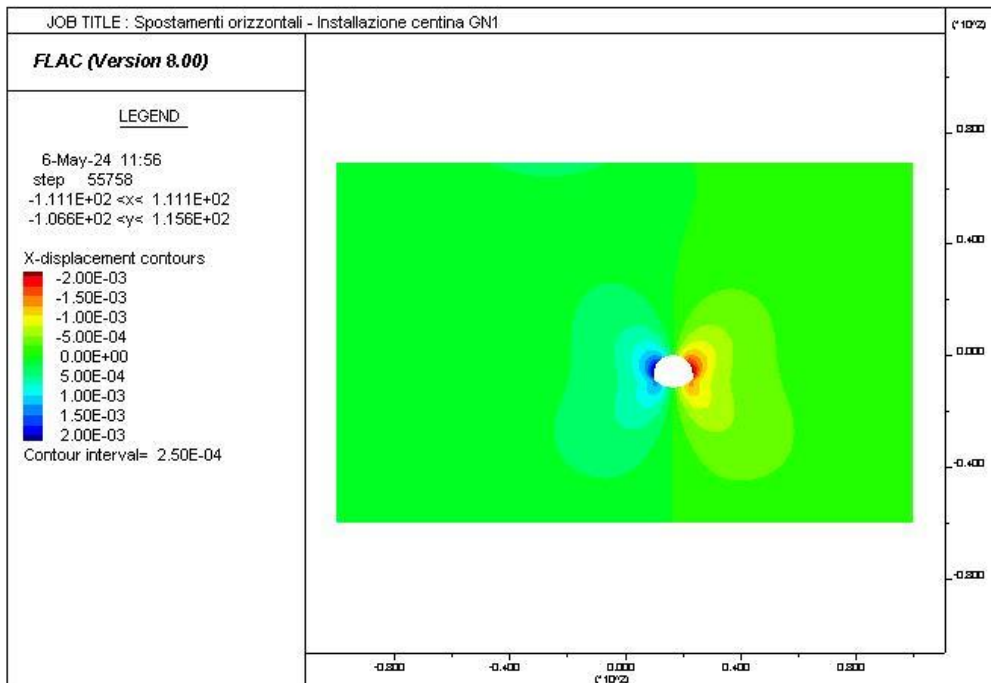
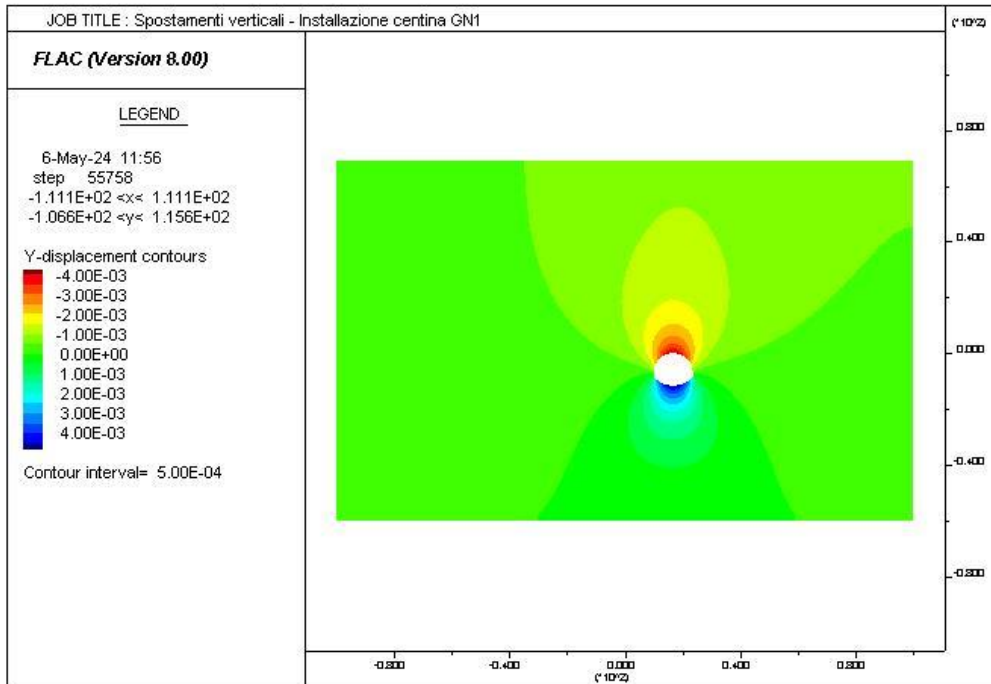
PROGETTAZIONE ATI:



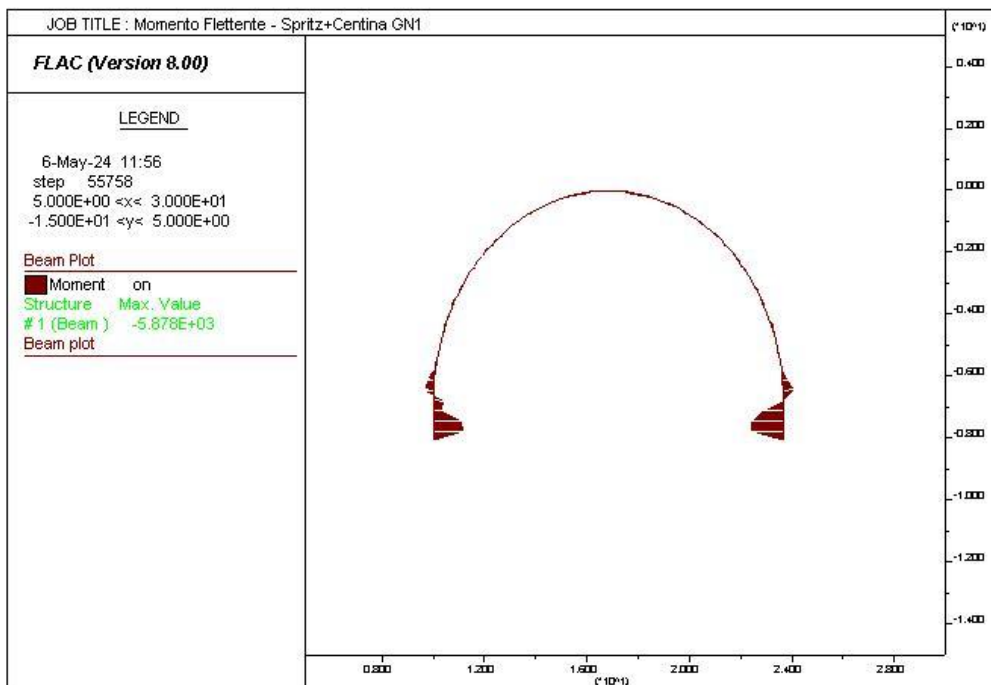
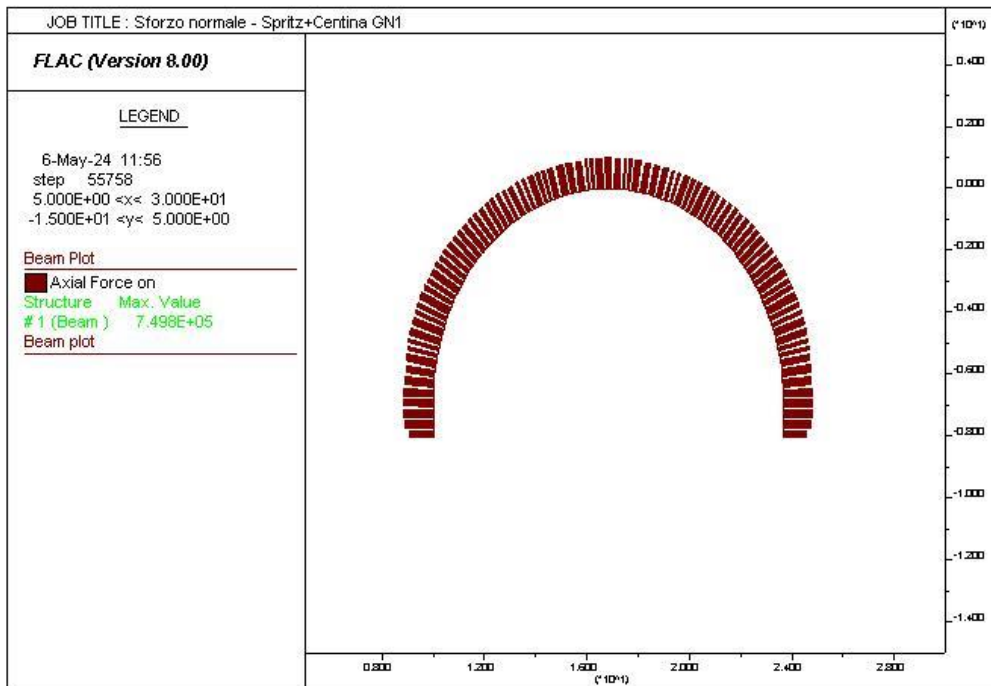
PROGETTAZIONE ATI:



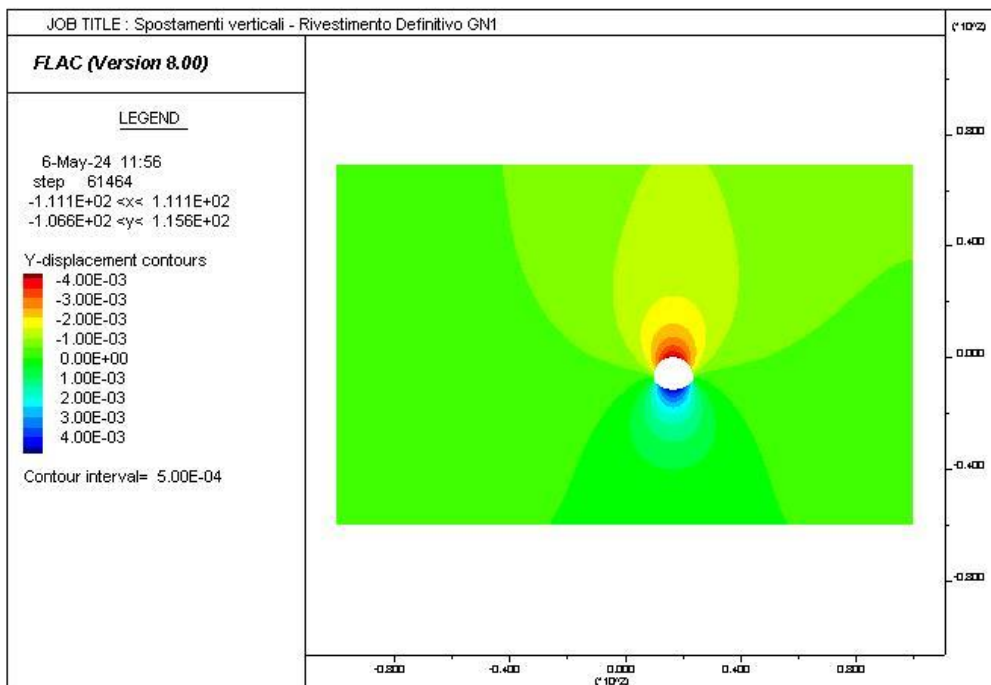
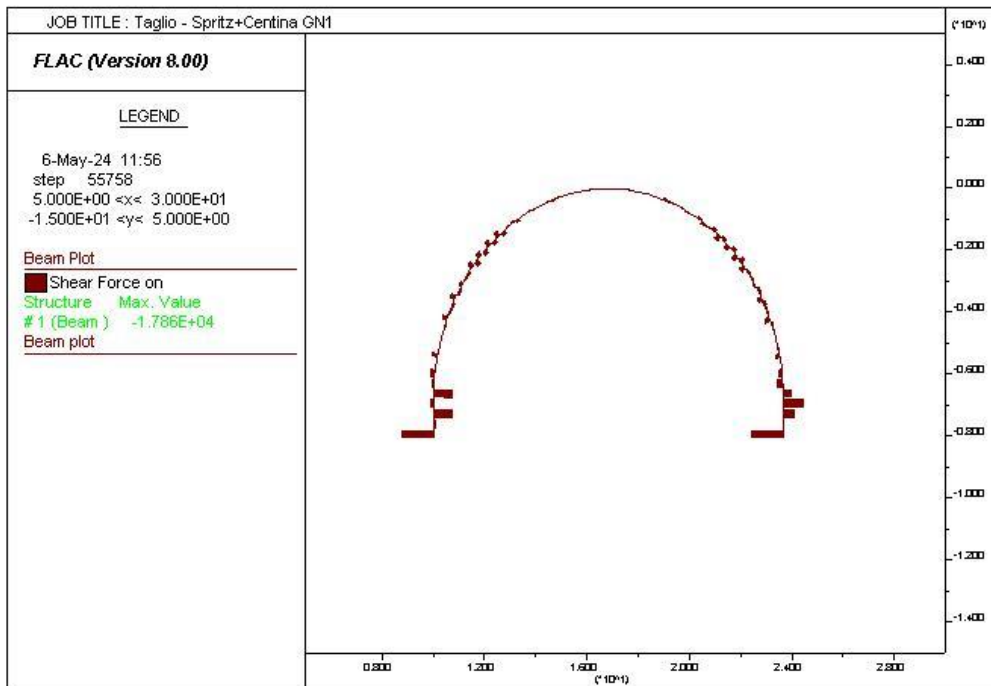
PROGETTAZIONE ATI:



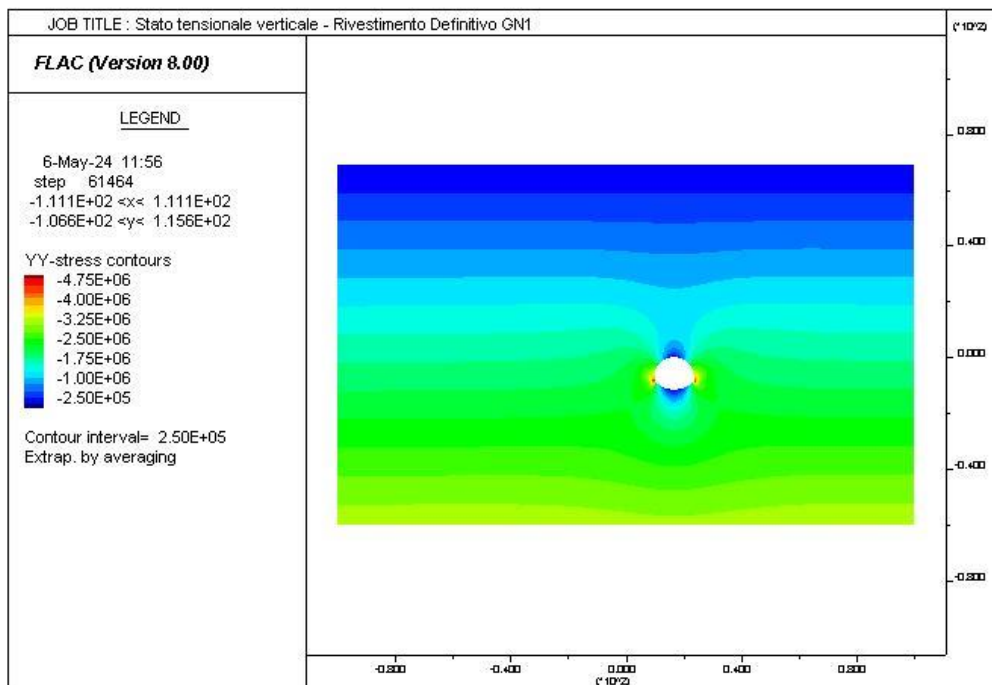
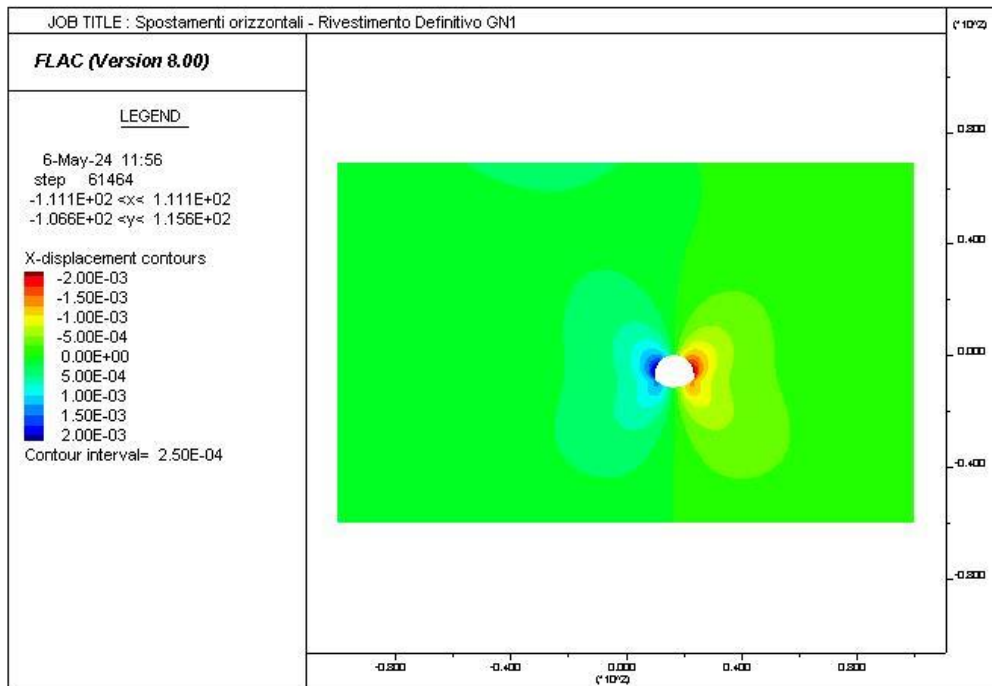
PROGETTAZIONE ATI:



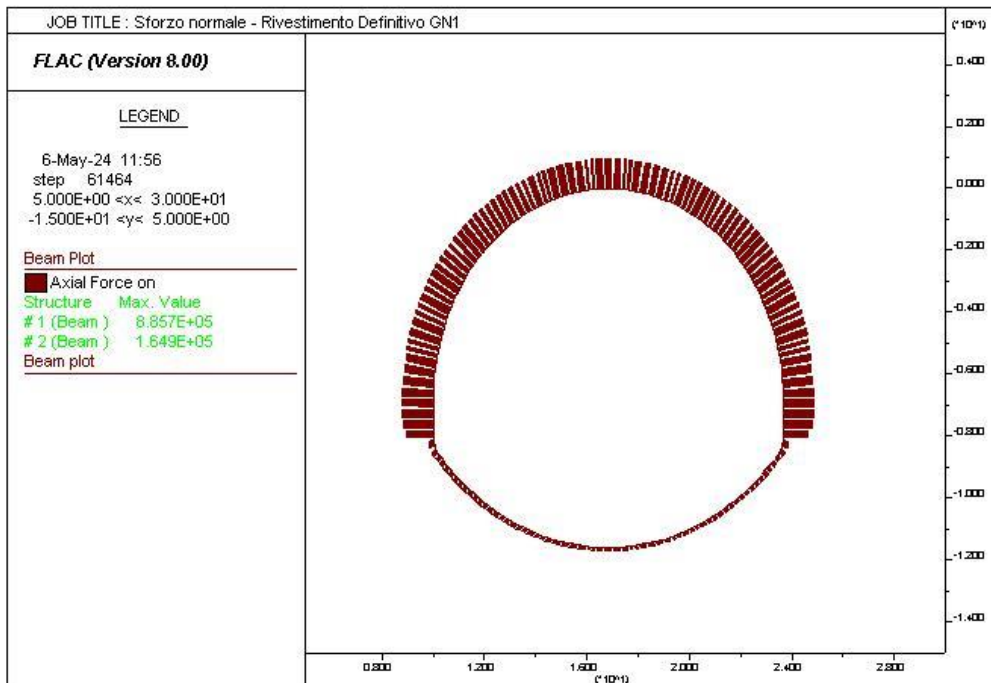
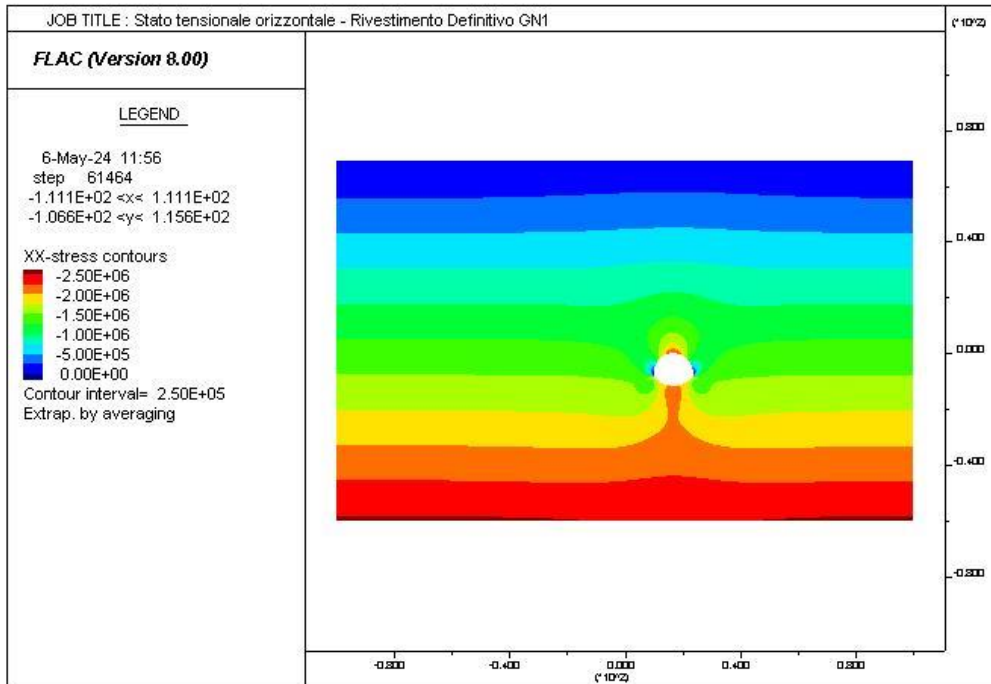
PROGETTAZIONE ATI:



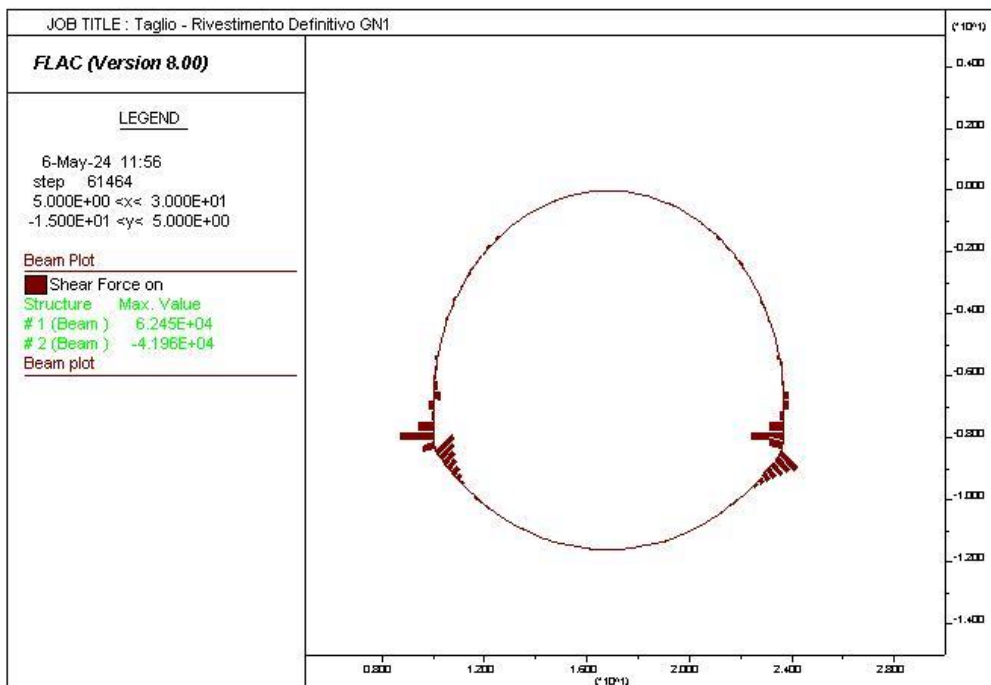
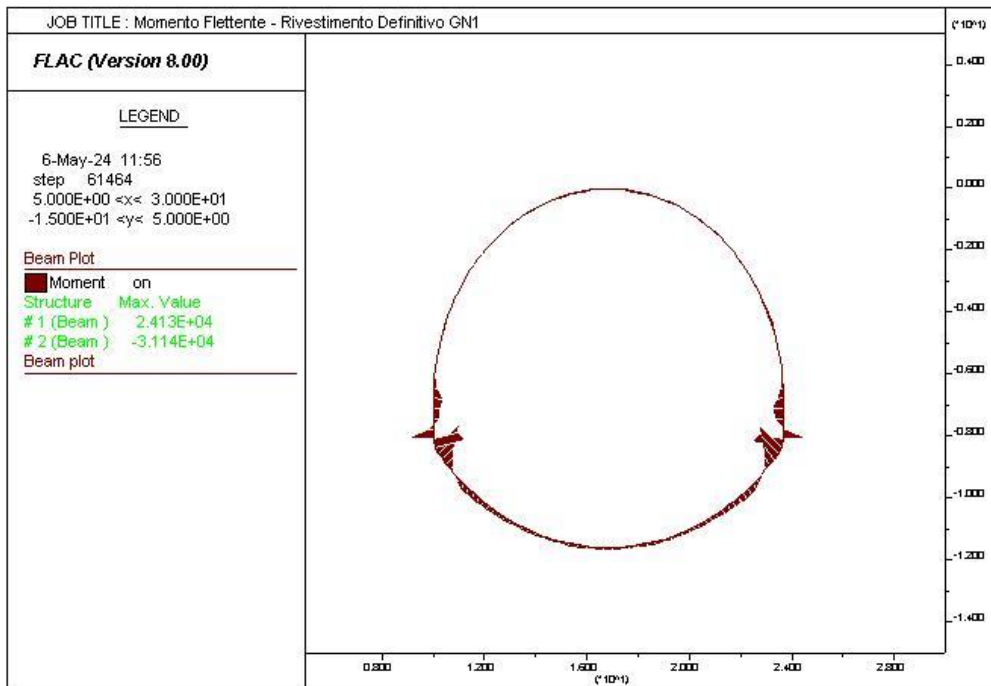
PROGETTAZIONE ATI:



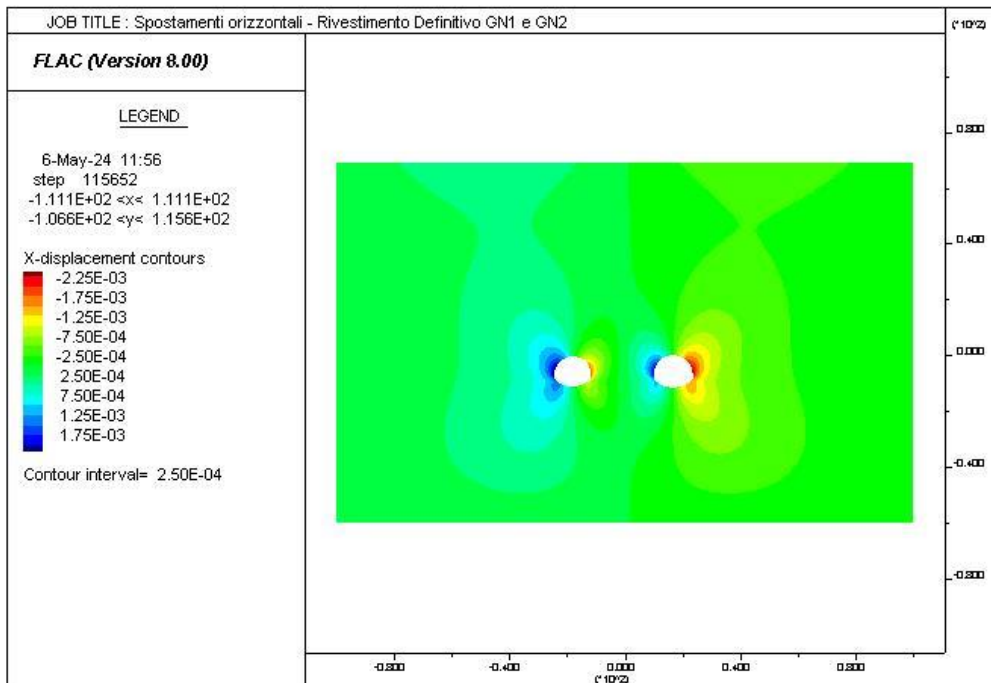
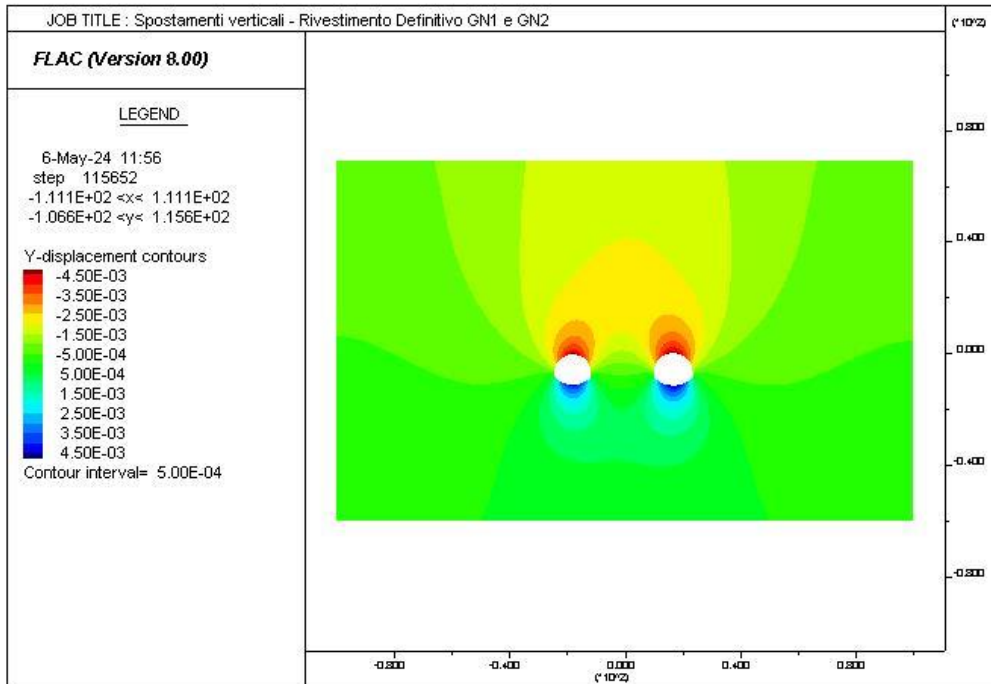
PROGETTAZIONE ATI:



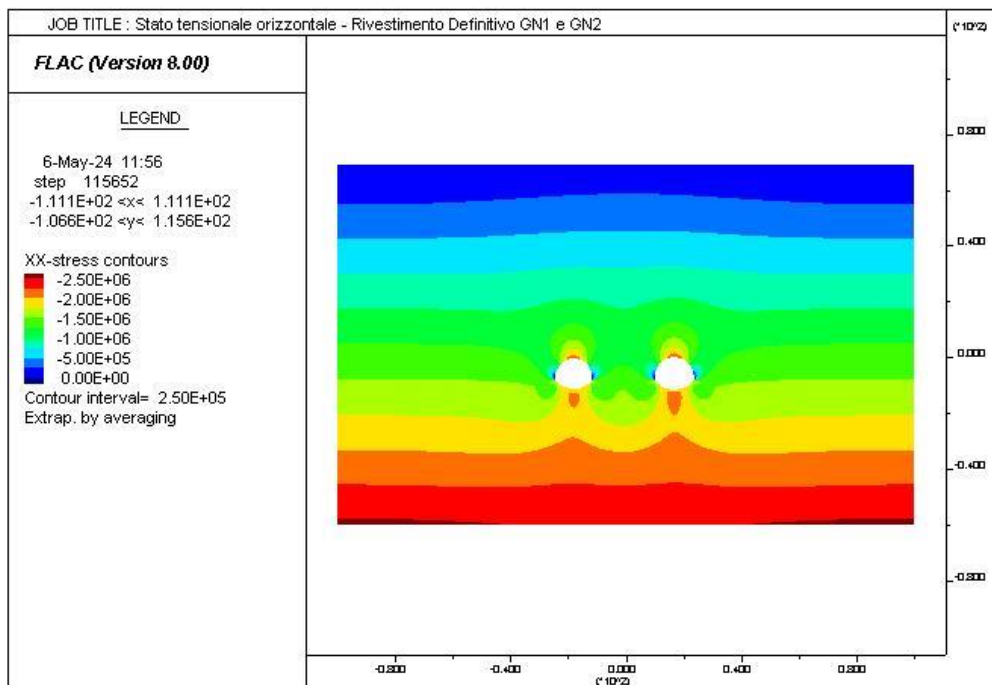
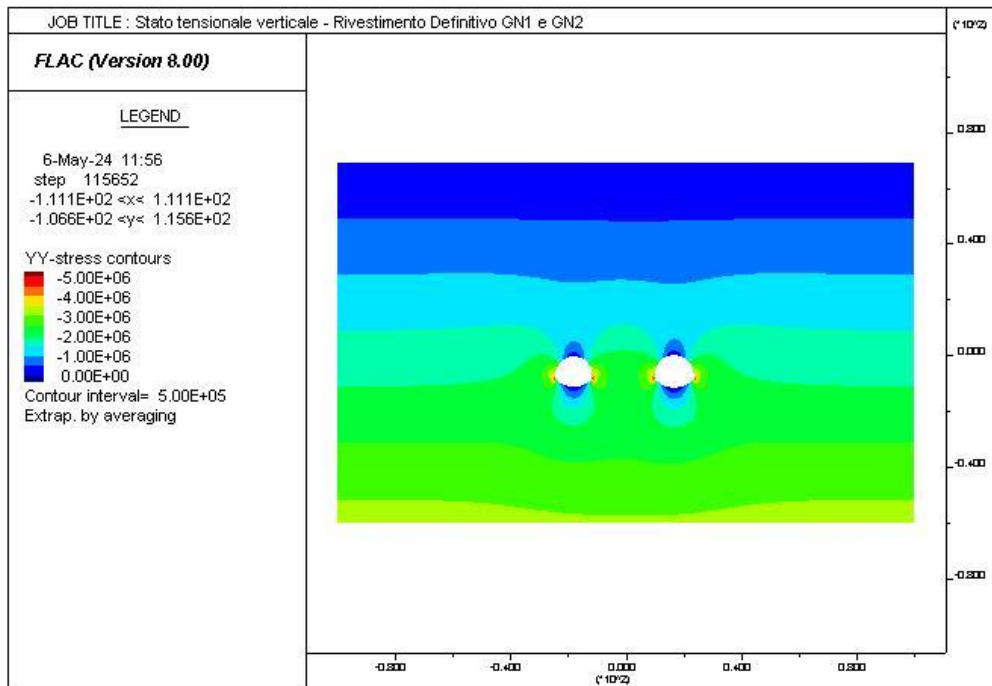
PROGETTAZIONE ATI:



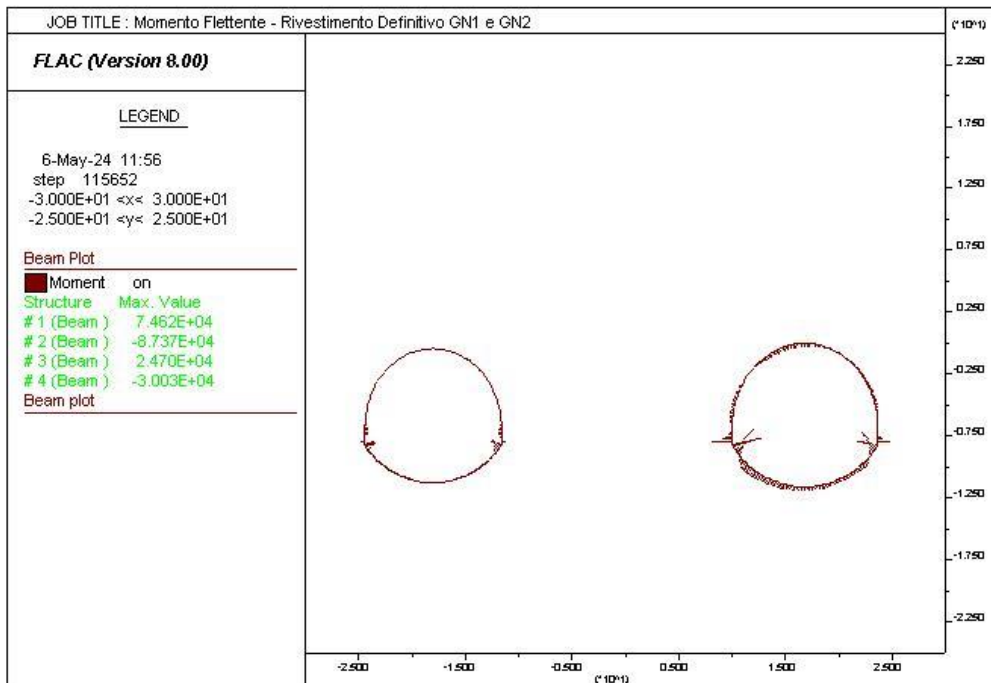
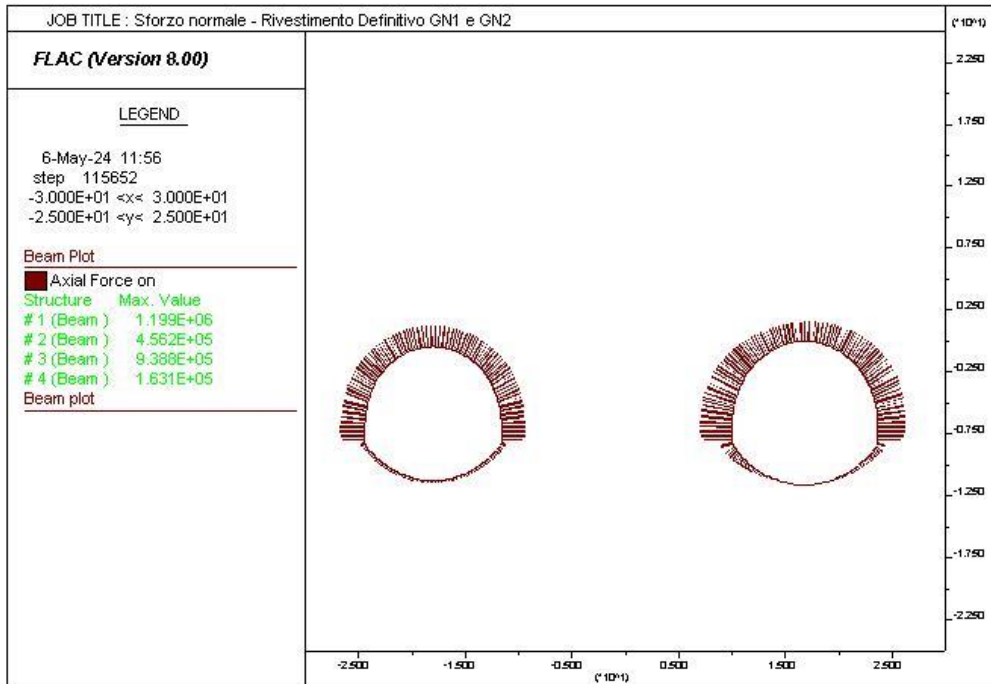
PROGETTAZIONE ATI:



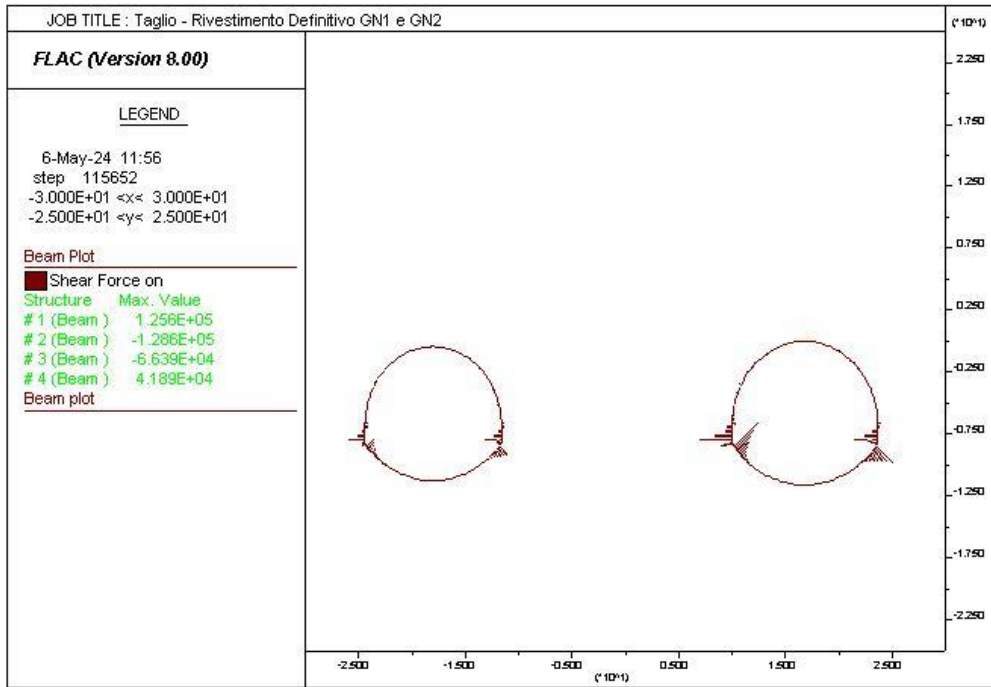
PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:

8.7.4.2 Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine

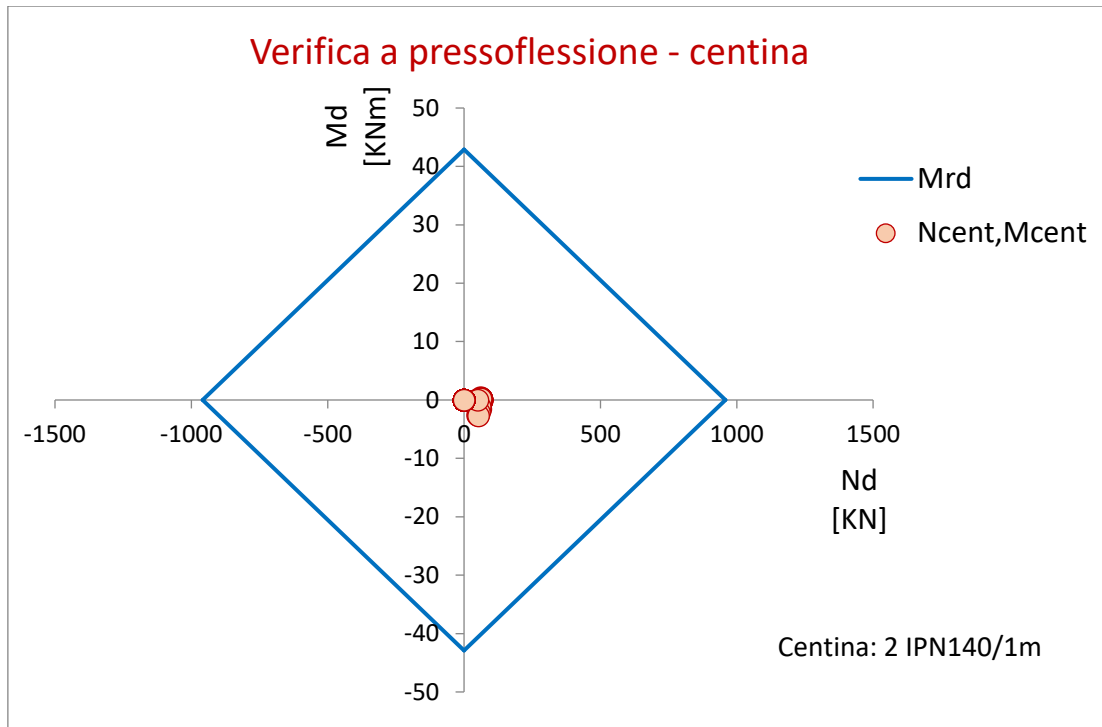


Figura 8-24: Dominio M-N (centina)

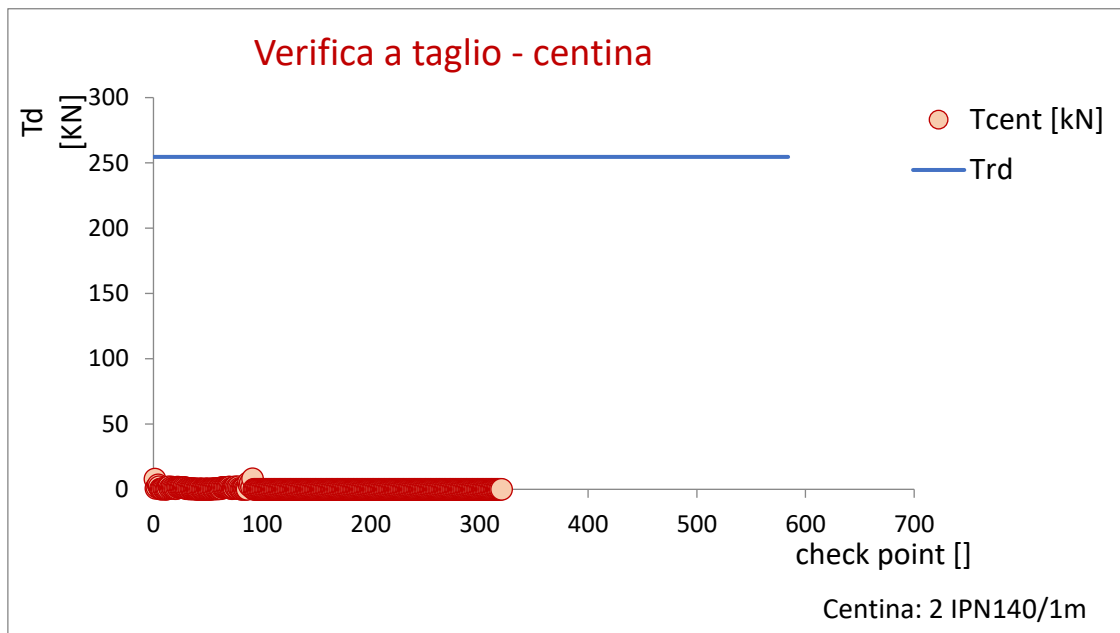


Figura 8-25: Verifica a taglio (centina)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.4.4 Verifiche SLU rivestimento provvisorio

Verifica a pressoflessione - centine+spritz

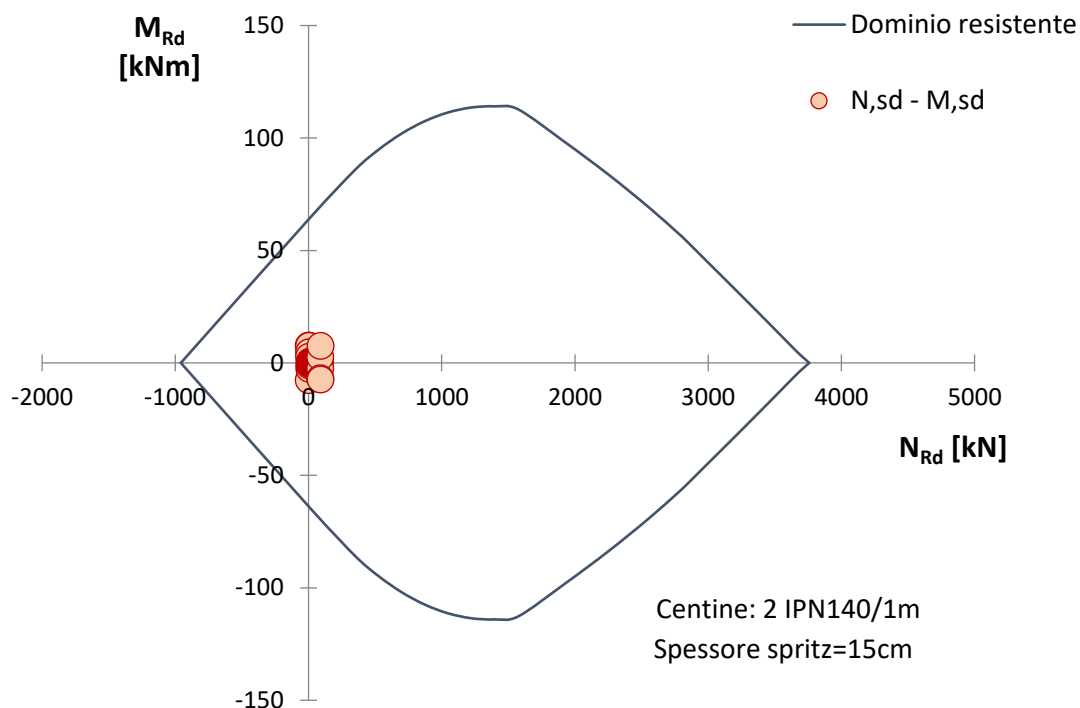


Figura 8-26: Dominio M-N (centina+spritz)

Verifica a taglio (solo centine)	
T_res	255 KN
T_soll	23 KN
Esito	Soddisfatta

Figura 8-27: Verifica a taglio (centina+spritz)

Le verifiche risultano soddisfatte.

8.7.4.6 Verifiche SLU rivestimento definitivo

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

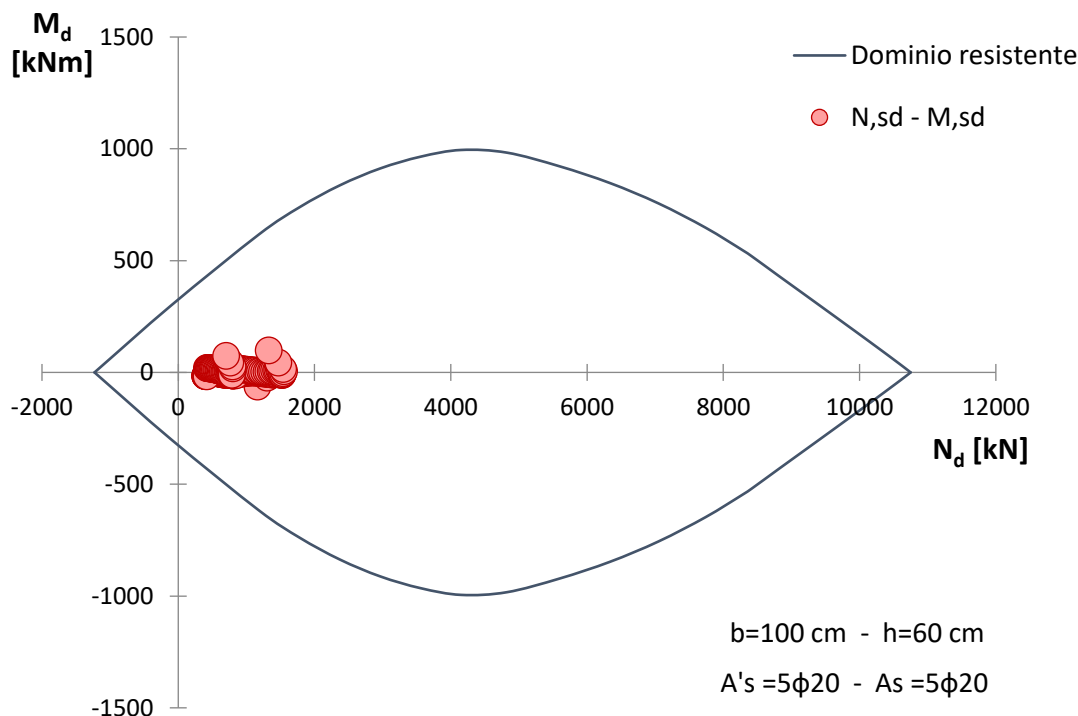


Figura 8-28: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
	Taglio agente	$V_{Ed} = 163.28$	kN
Altezza della sezione	$h = 600$	mm	
Copriferro della sezione	$\delta = 50$	mm	
Altezza utile della sezione	$d = 550$	mm	
Diametro degli spilli	$d_w = 12$	mm	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$		n° spilli/m (direzione long.)
Area totale spilli	$A_{sw} = 282.60$	mm ²	
Passo degli spilli	$s = 200$	mm	passo in direzione trasv.
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90$	deg	
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8$	deg	$\cot(\theta) = 2.5$
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000$	mm	$1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5$ $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$		
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 684.3$	kN	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + \cot\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} = 1685.8$	kN	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\cot\alpha + \cot\theta) / (1 + \cot^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 684.3$	kN	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta		

Figura 8-29: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

Verifica a pressoflessione - arco rovescio

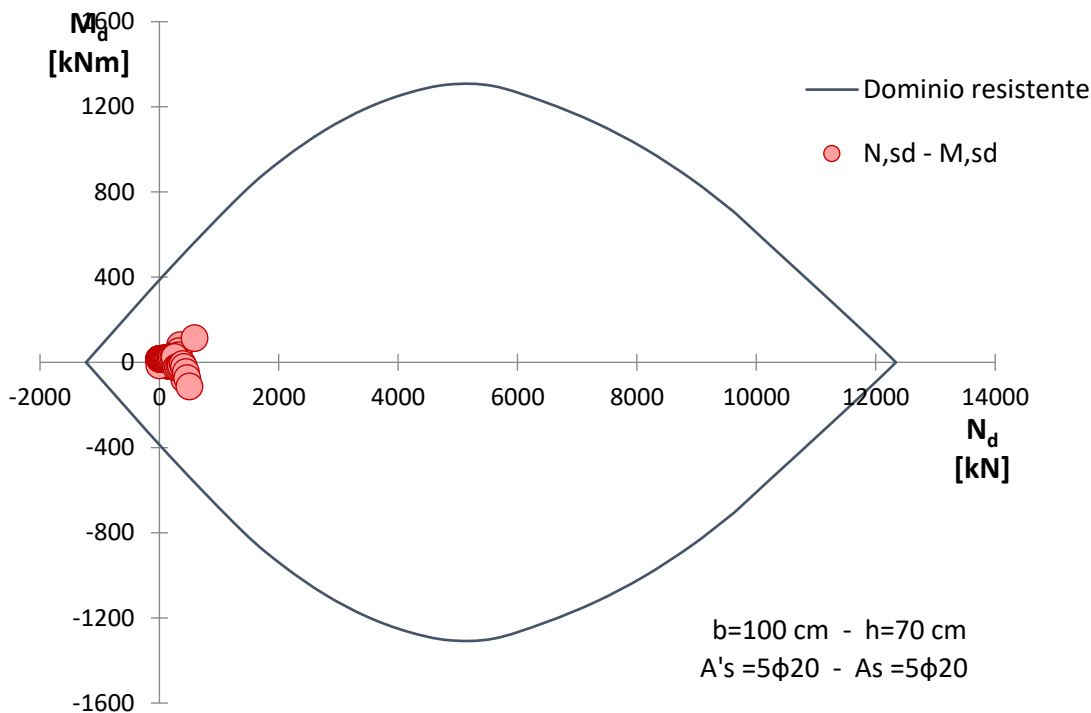


Figura 8-30: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio

Taglio agente	$V_{Ed} = 167.18$	kN
Altezza della sezione	h =	700 mm
Copriferro della sezione	δ =	50 mm
Altezza utile della sezione	d =	650 mm
Diametro degli spilli	d_w =	12 mm
Numero di braccia	n_w =	2.5
Area totale spilli	A_s,w =	282.60 mm ²
Passo degli spilli	s =	200 mm
Inclinazione delle staffe	α =	90 deg
Inclinazione delle bielle compresse	θ =	21.8 deg
Larghezza minima della sezione	b_w =	1000 mm
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	α_c =	1.2
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} =$	808.7 kN
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} =$	1992.3 kN
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} =$	808.7 kN

$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{s,w}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
 $V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
 $V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$

Esito della verifica Soddisfatta

Figura 8-31: Verifica a taglio (arco rovescio)

Le verifiche risultano soddisfatte.

8.7.4.7 Verifiche SLE

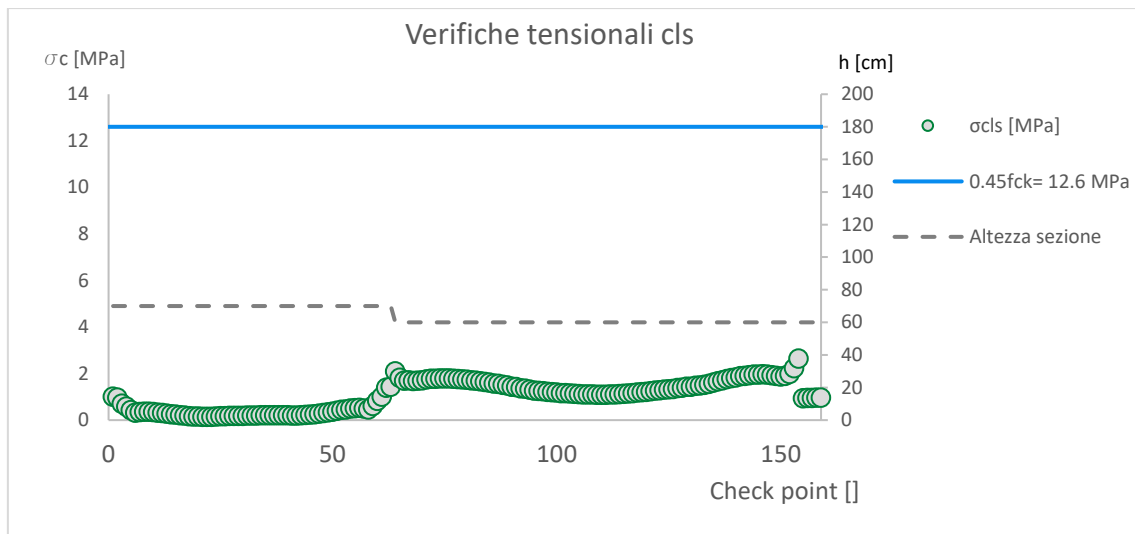


Figura 8-32: Verifiche tensionali cls

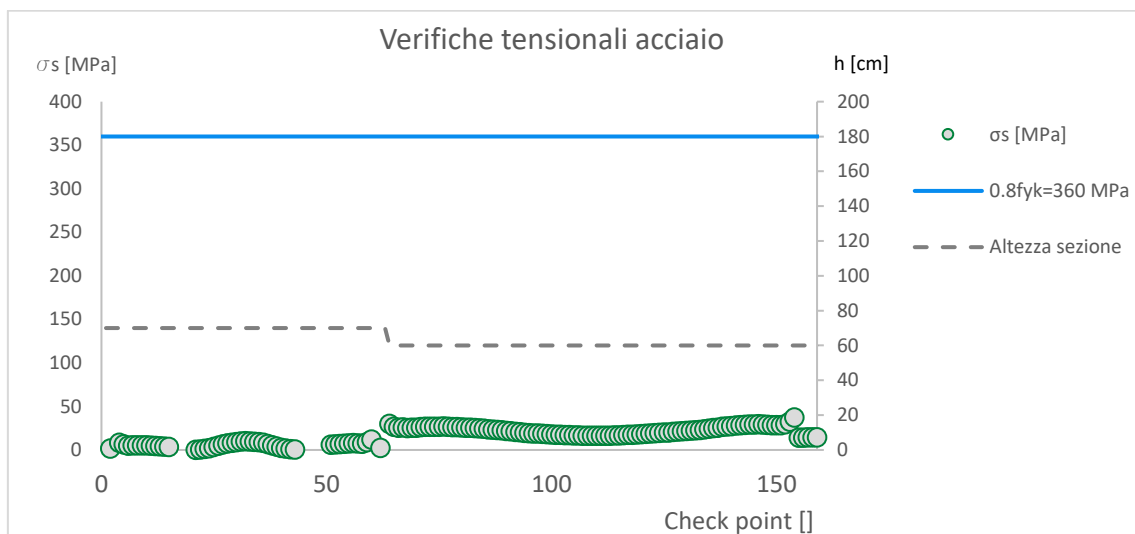


Figura 8-33: Verifiche tensionali acciaio

PROGETTAZIONE ATI:

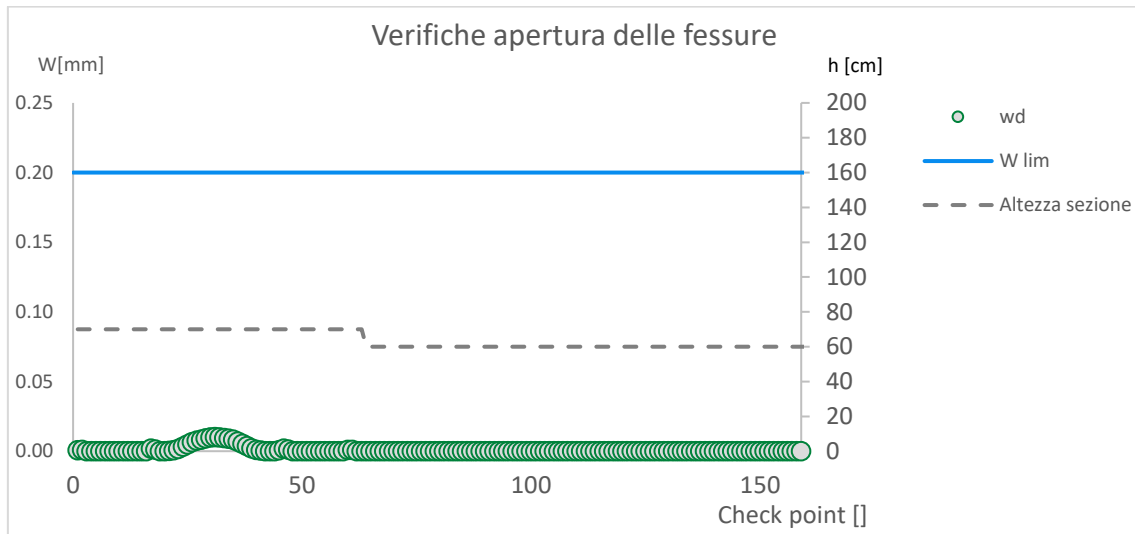
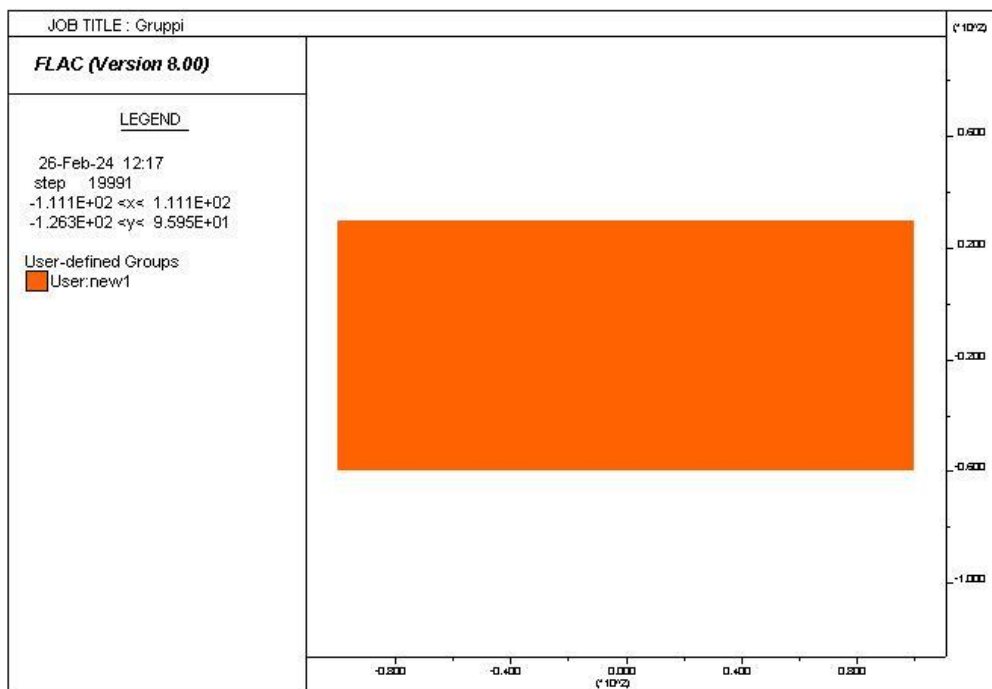
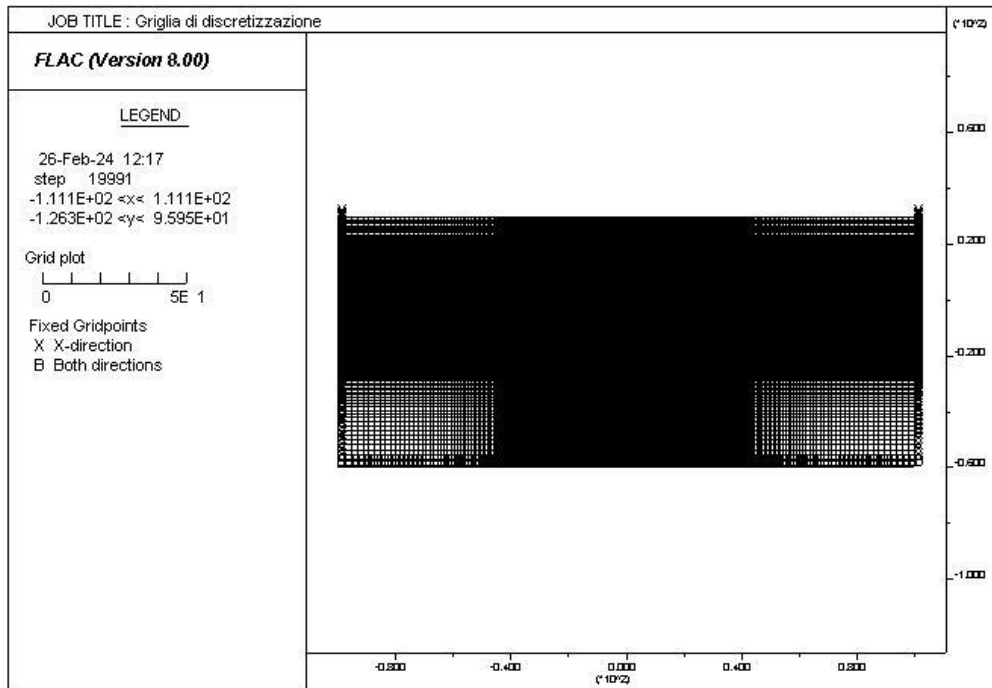


Figura 8-34: Verifiche apertura delle fessure

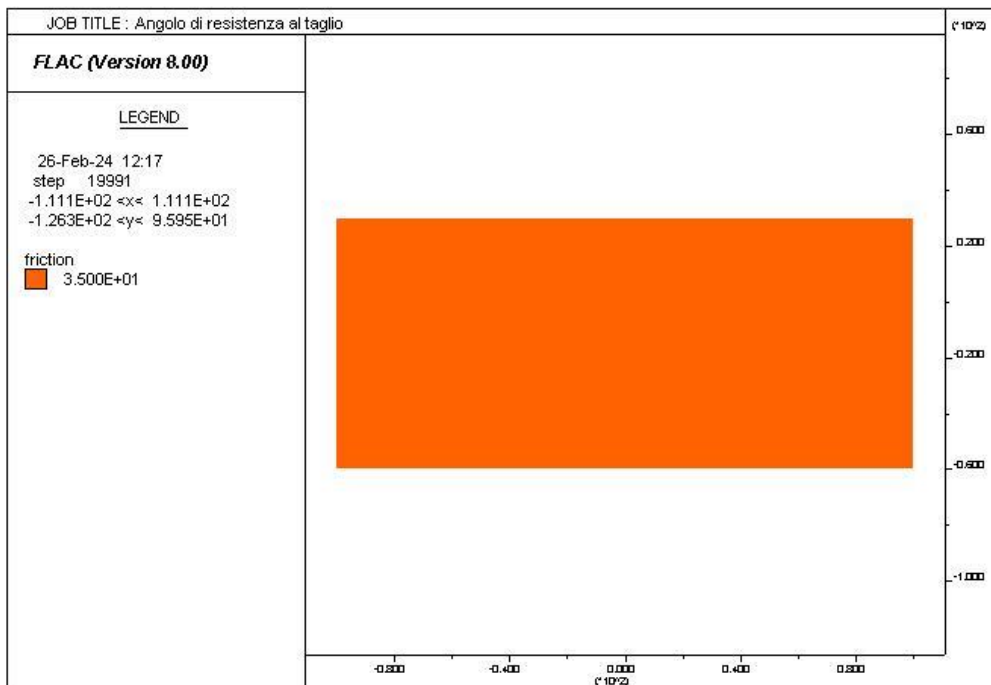
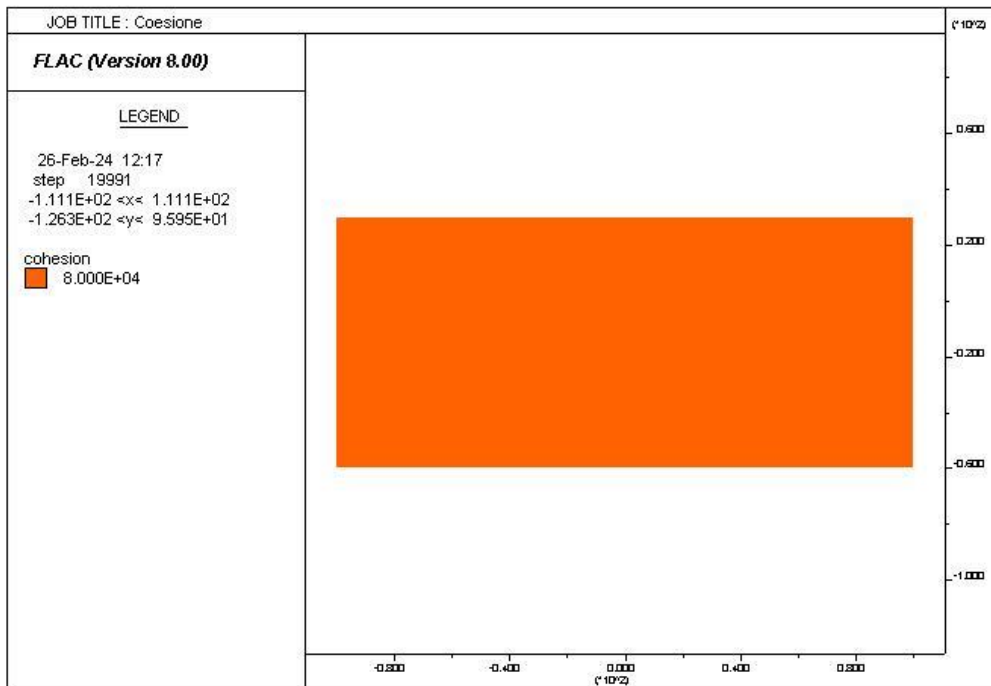
Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

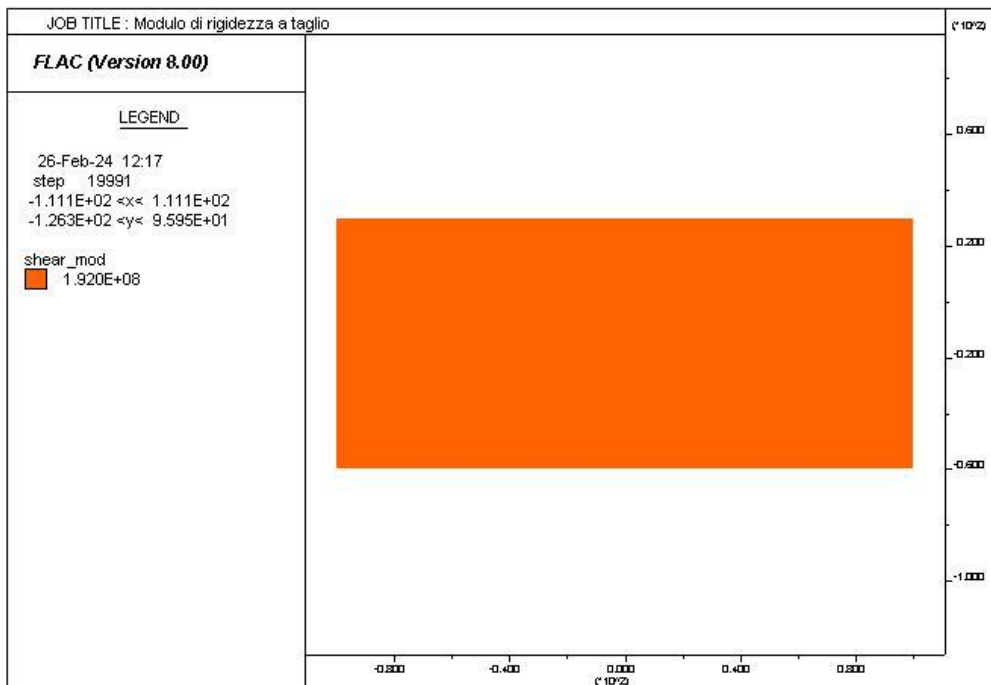
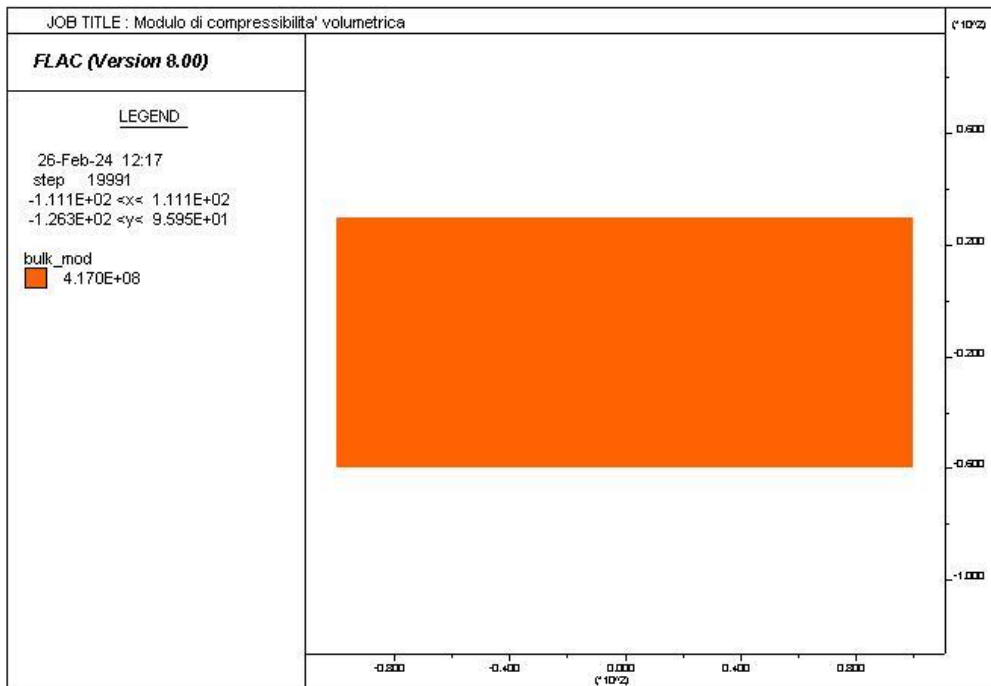
8.7.6 SEZIONE TIPO B2V – SEZ 3



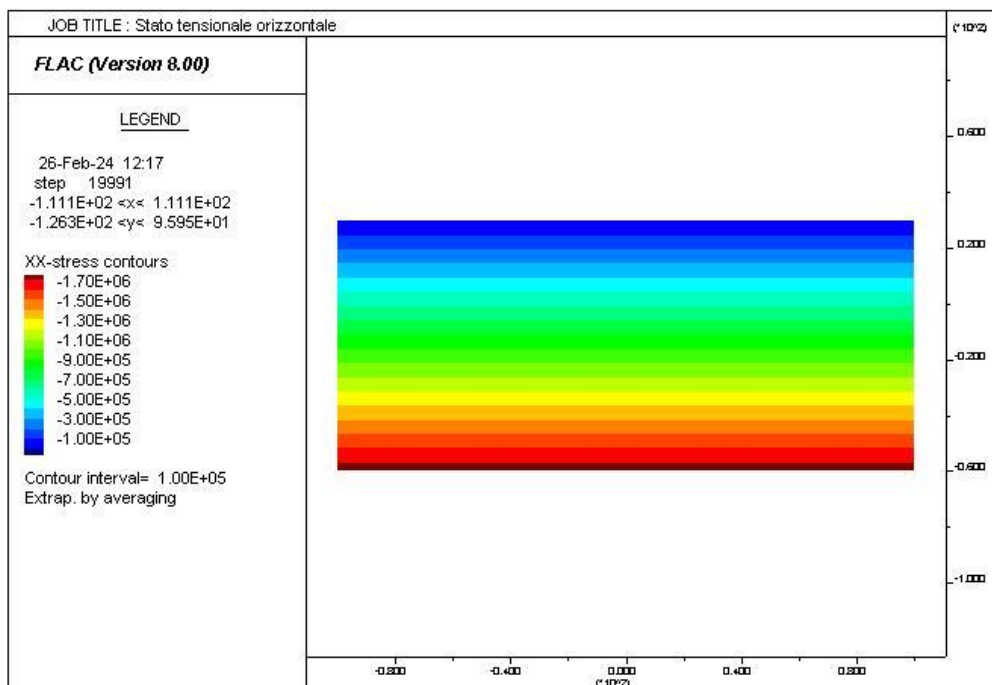
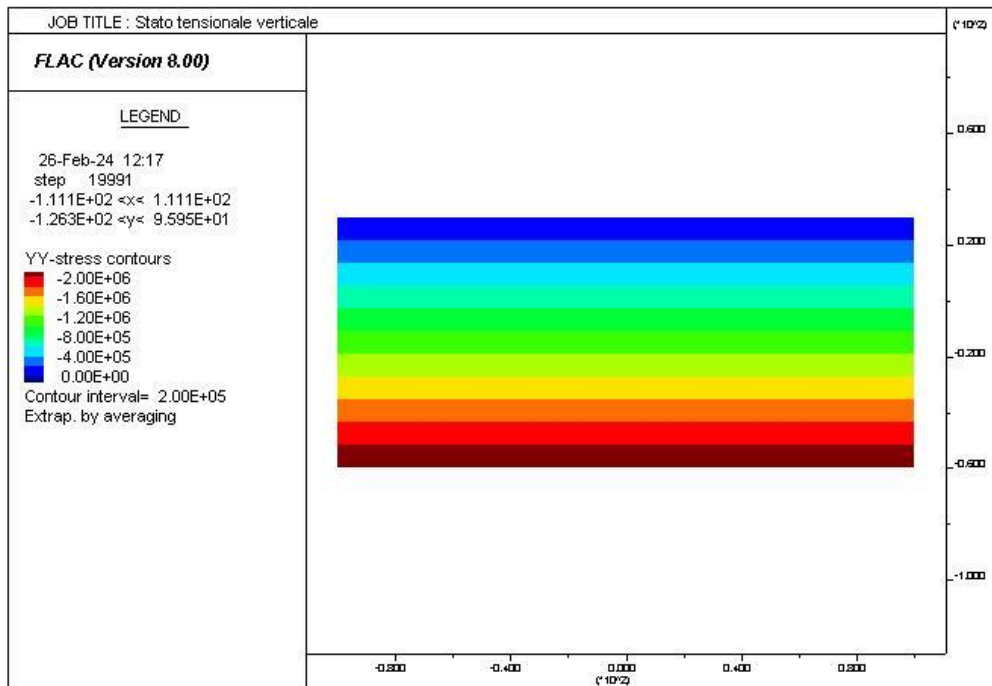
PROGETTAZIONE ATI:



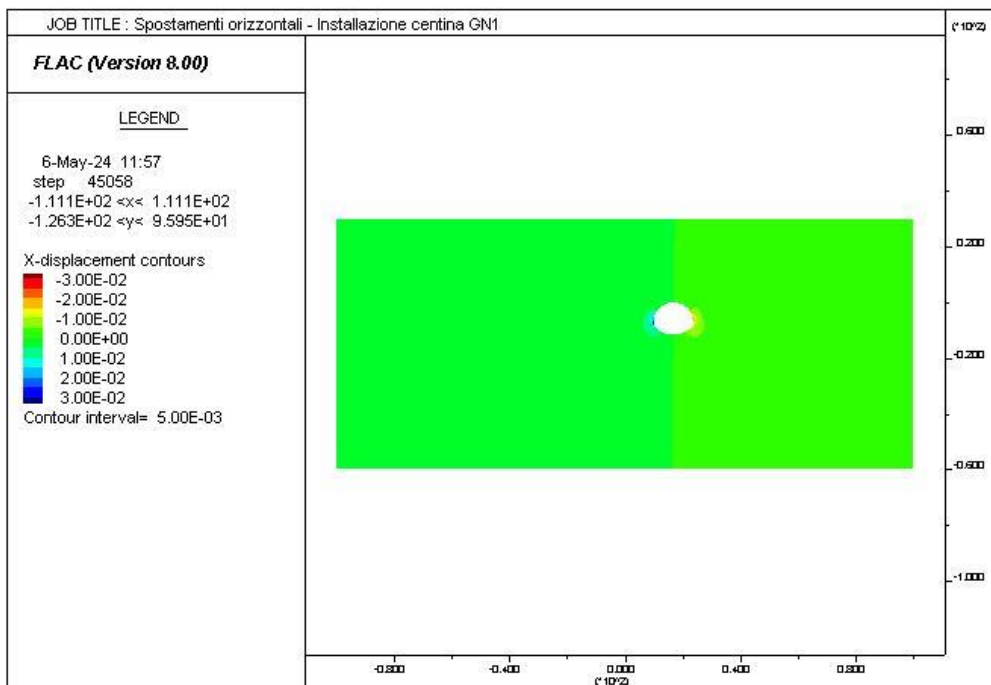
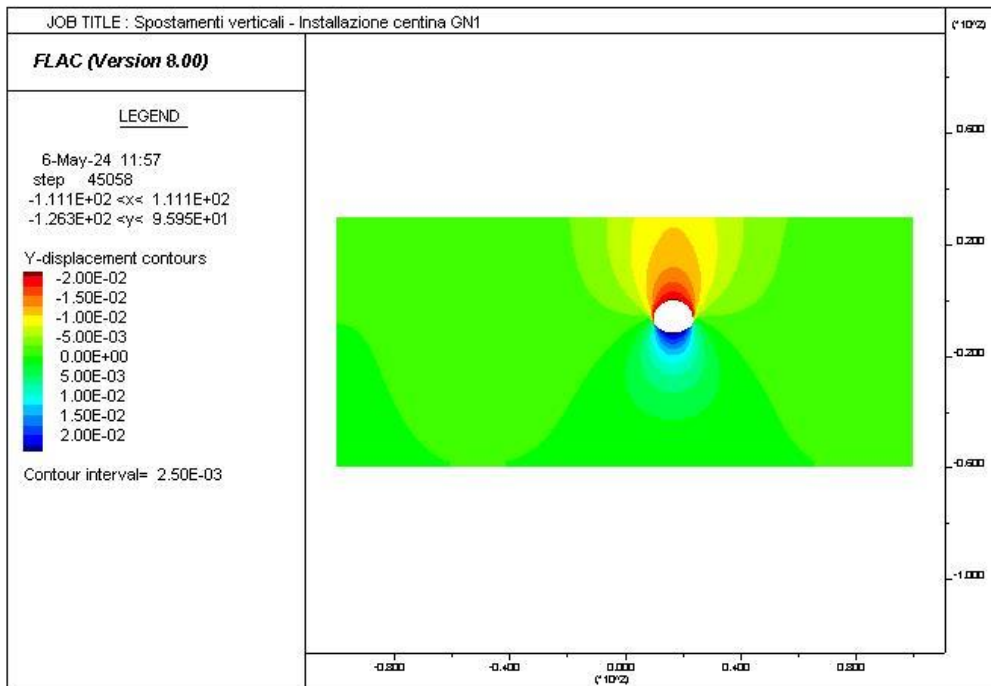
PROGETTAZIONE ATI:



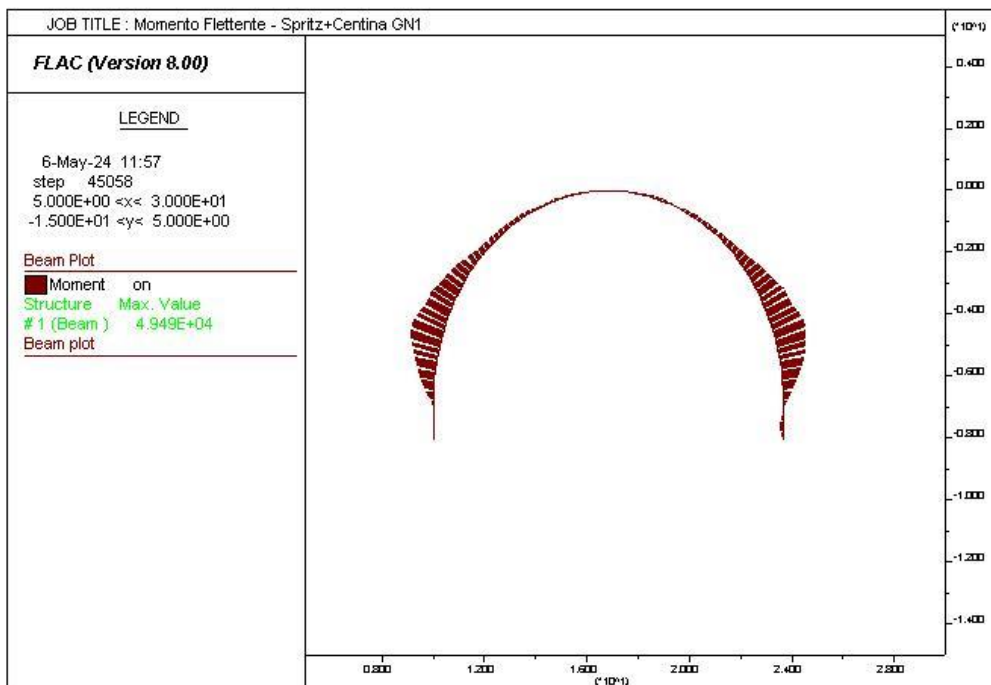
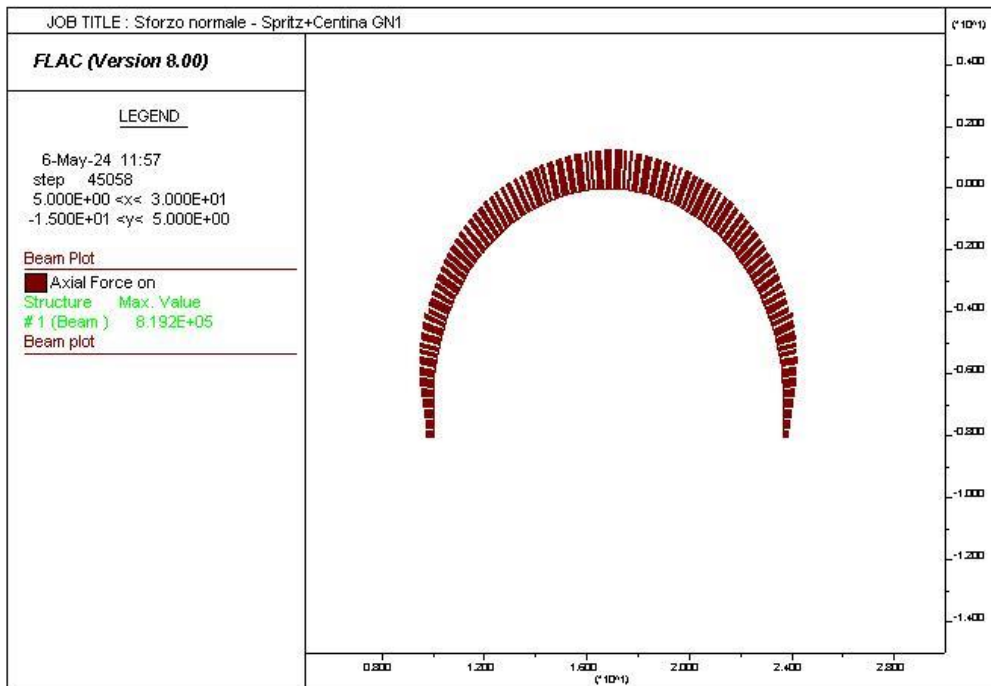
PROGETTAZIONE ATI:

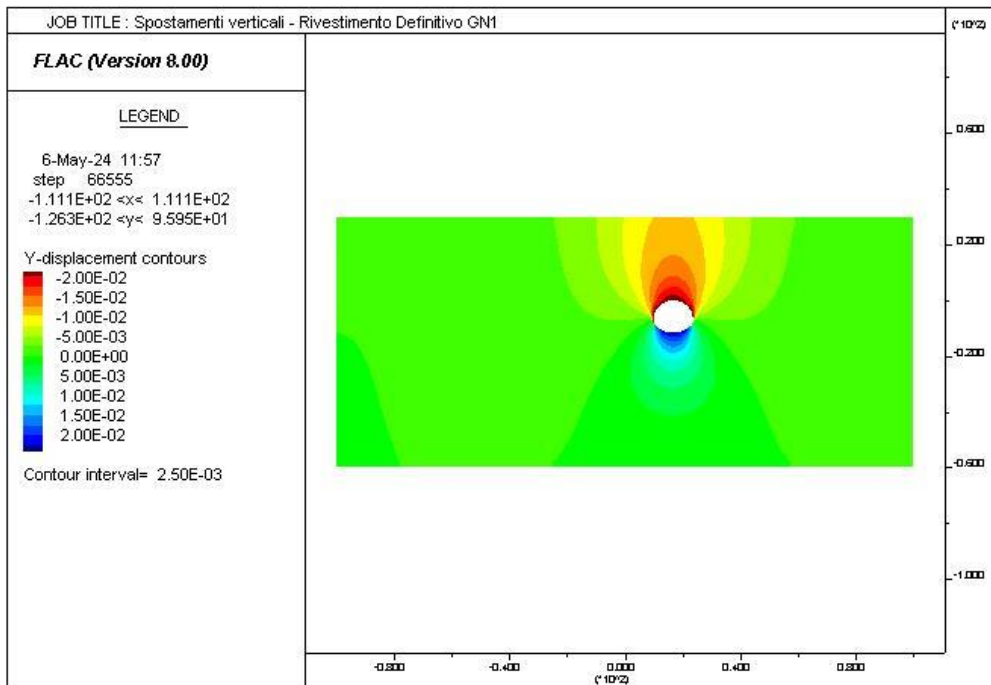
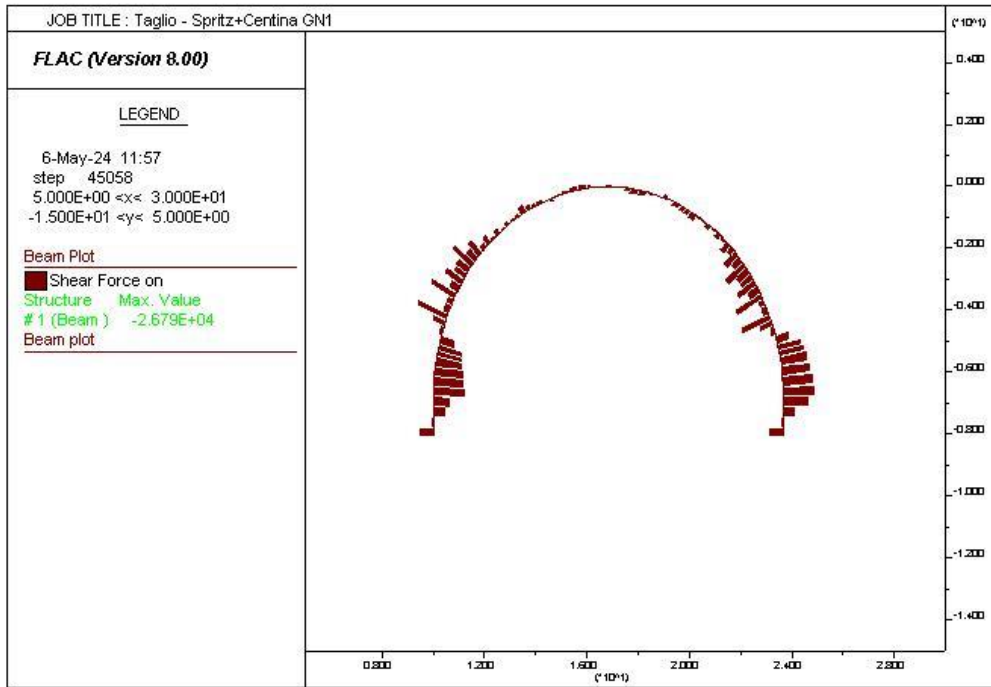


PROGETTAZIONE ATI:

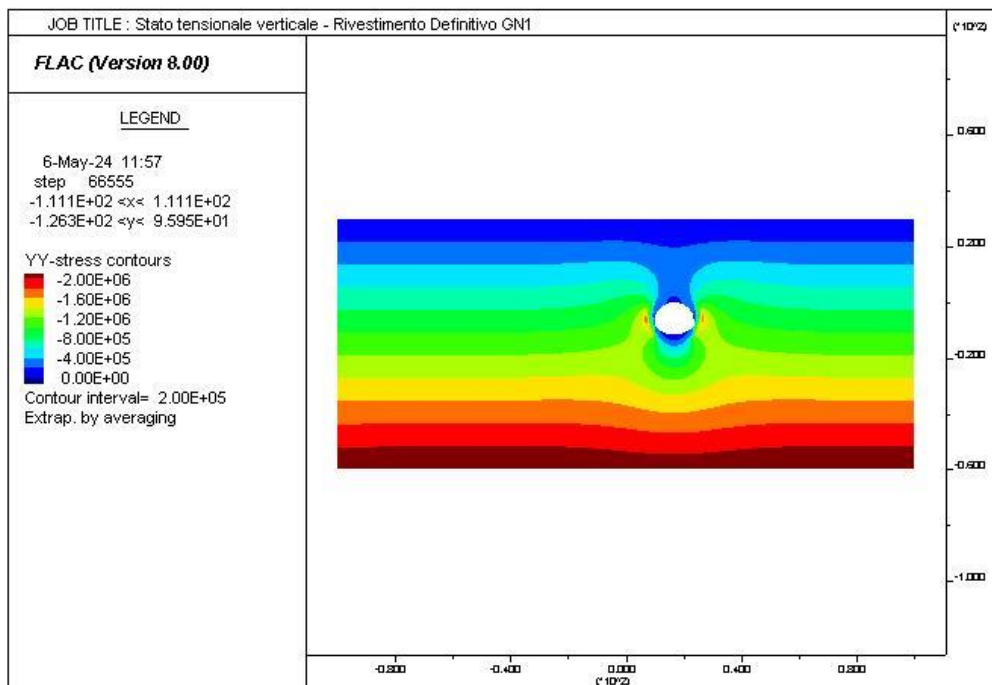
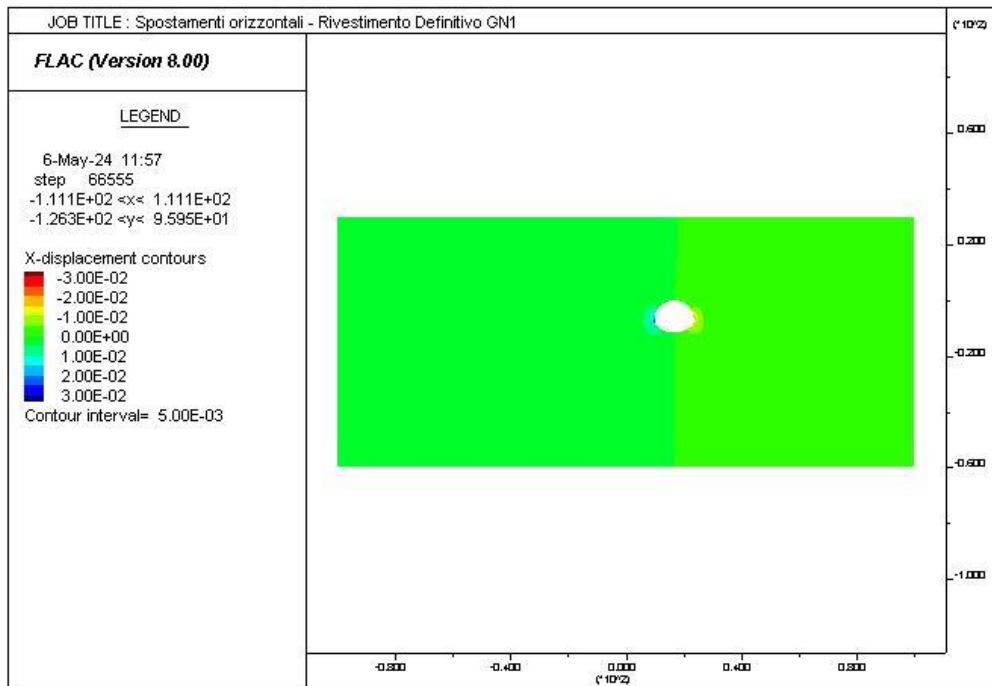


PROGETTAZIONE ATI:

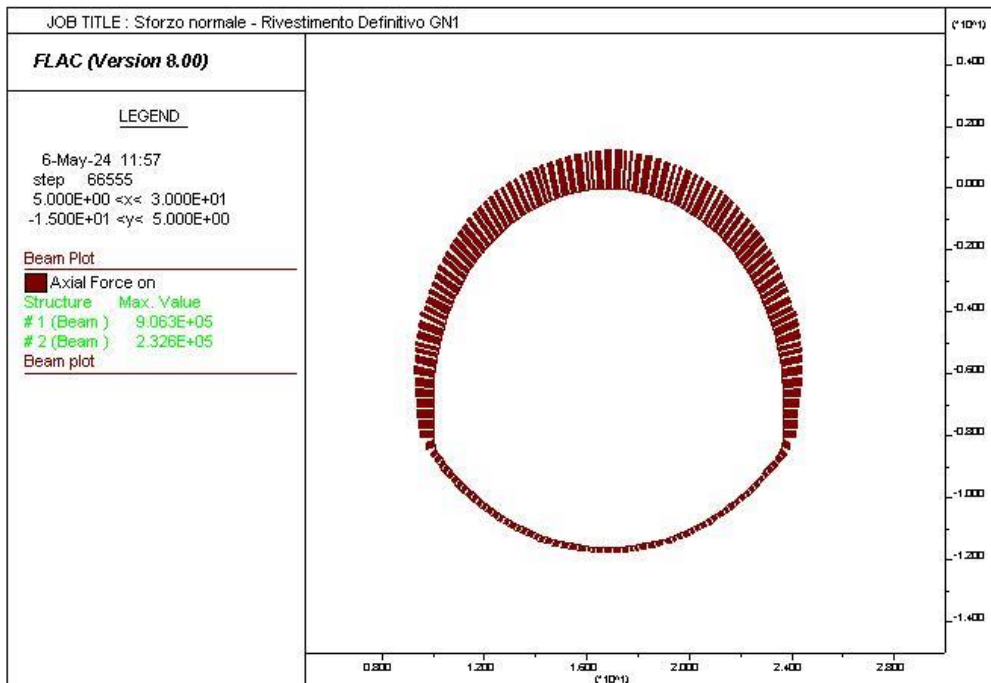
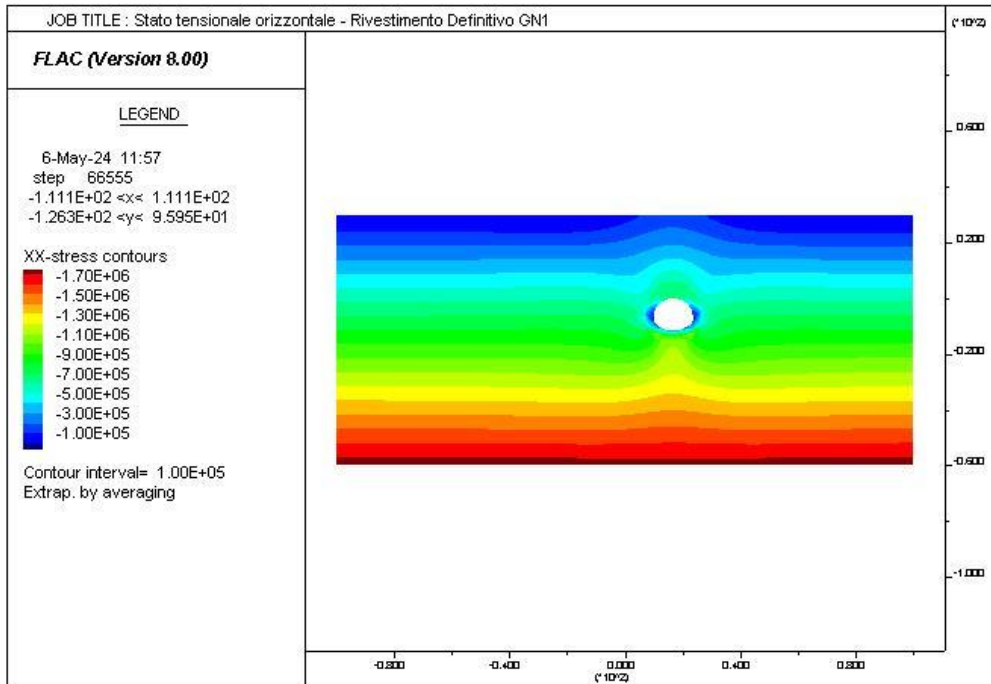




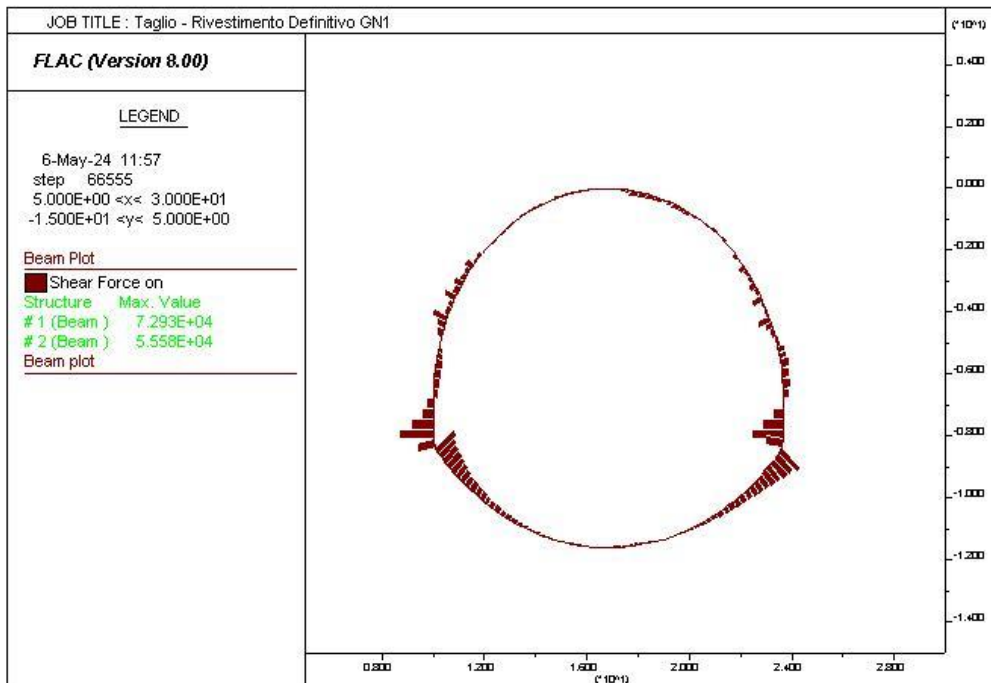
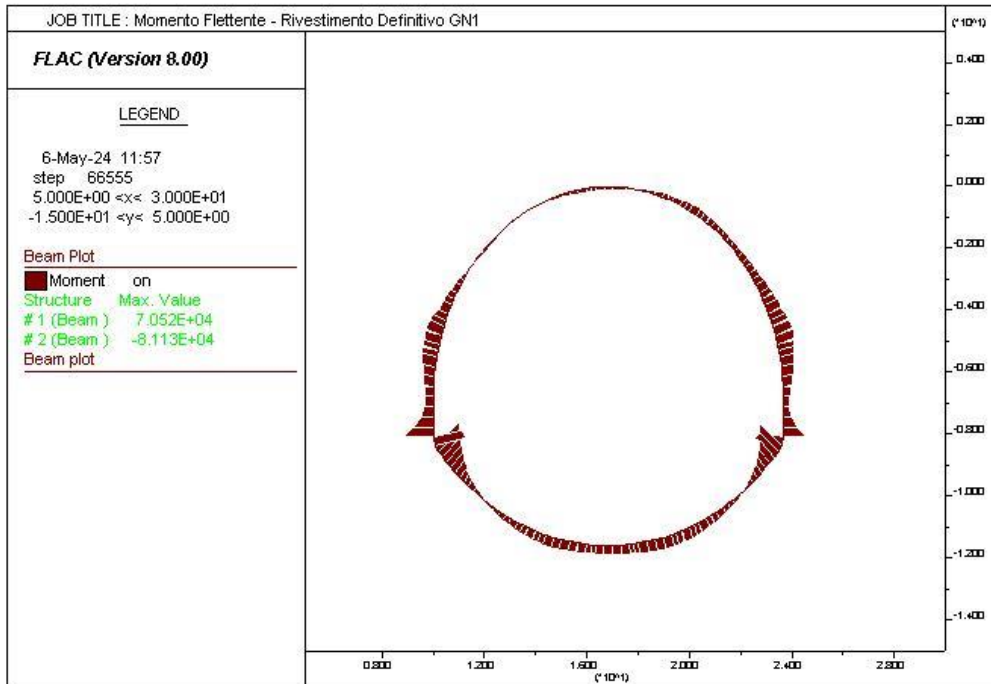
PROGETTAZIONE ATI:



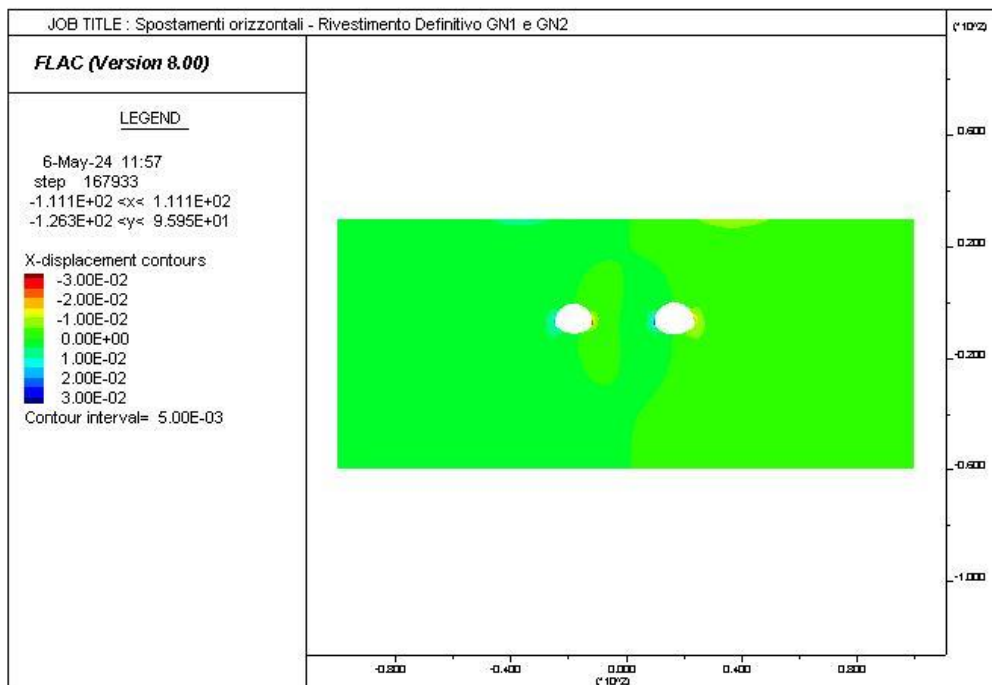
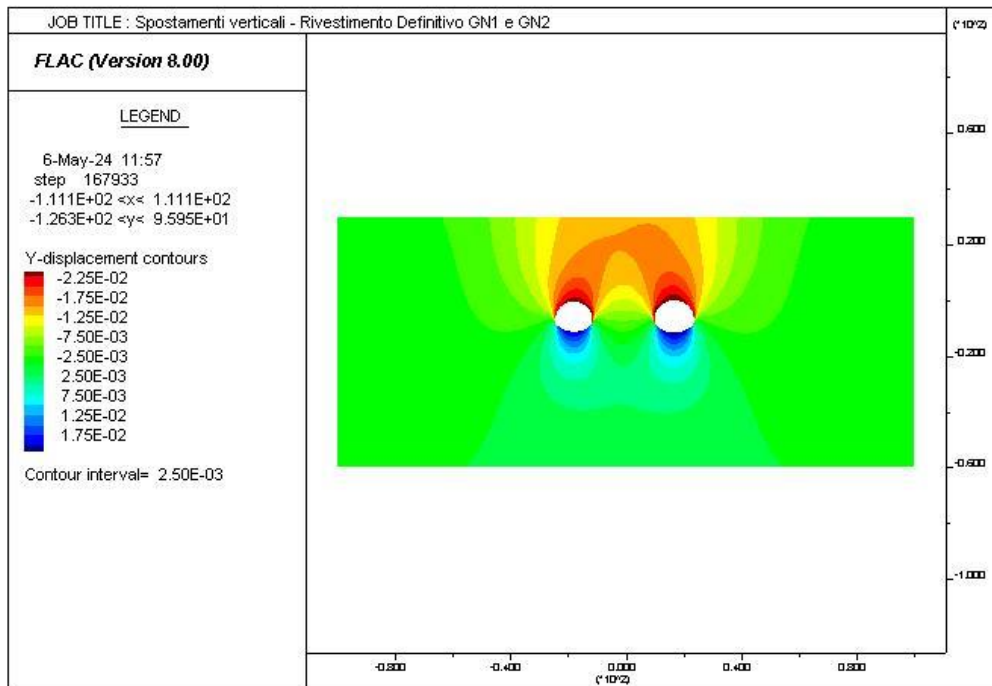
PROGETTAZIONE ATI:



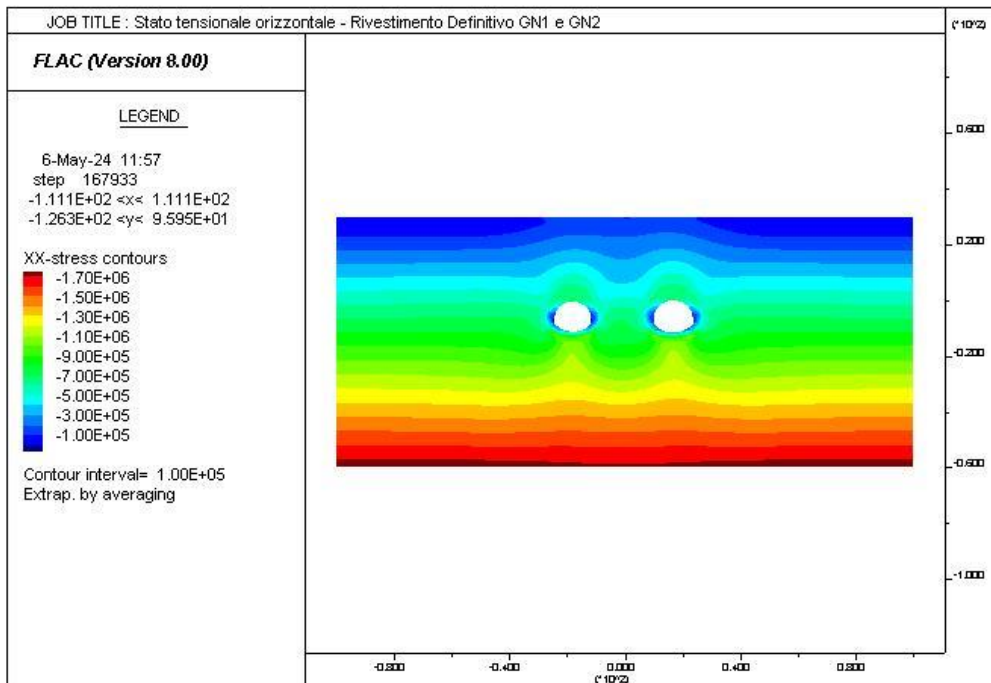
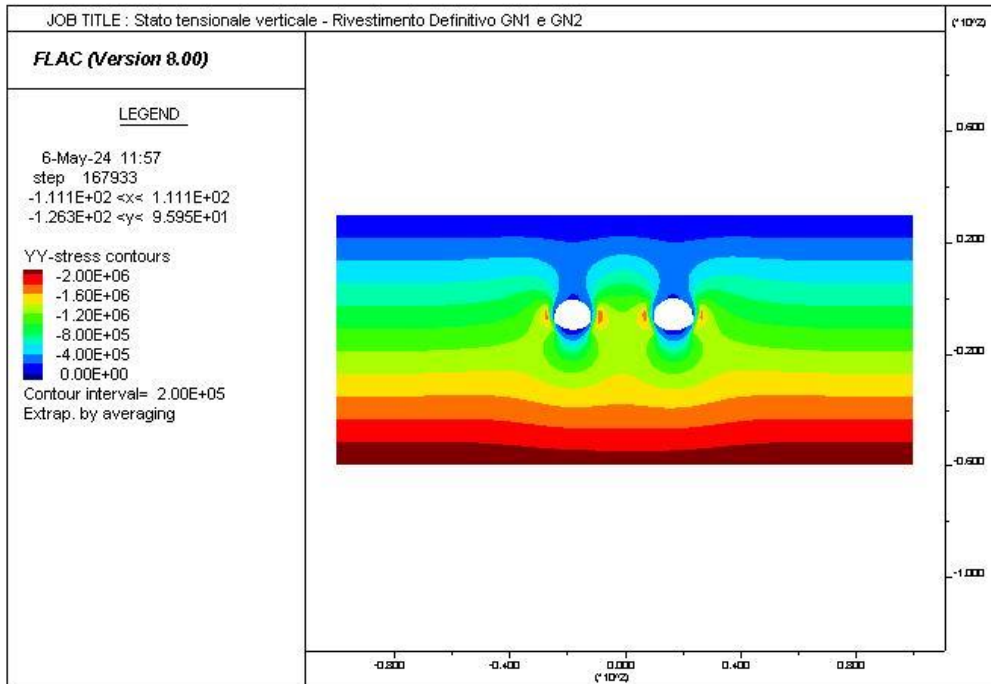
PROGETTAZIONE ATI:



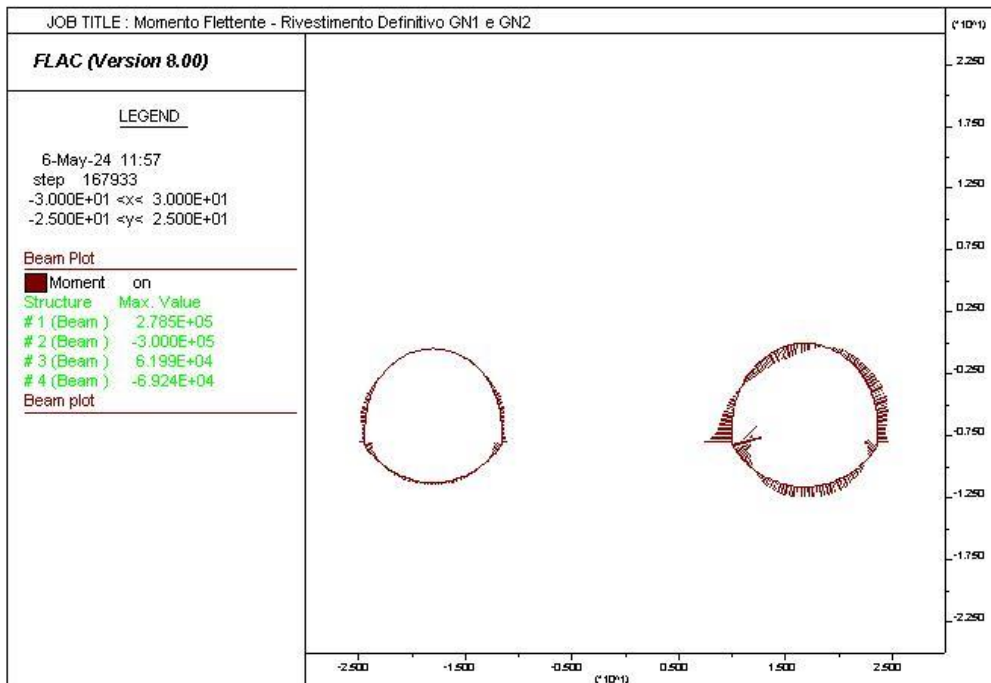
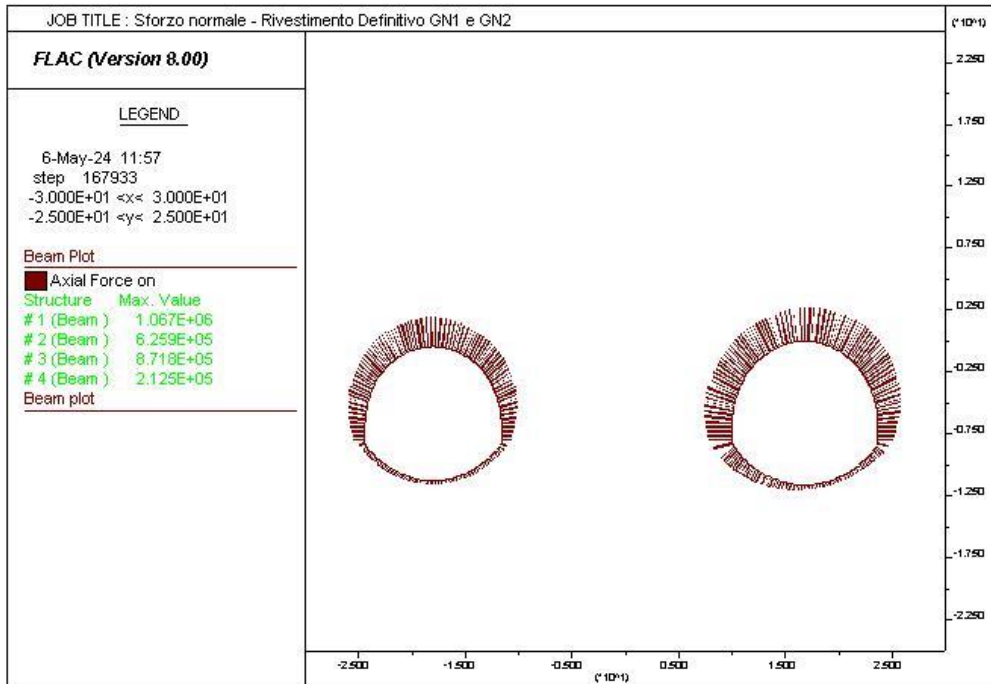
PROGETTAZIONE ATI:



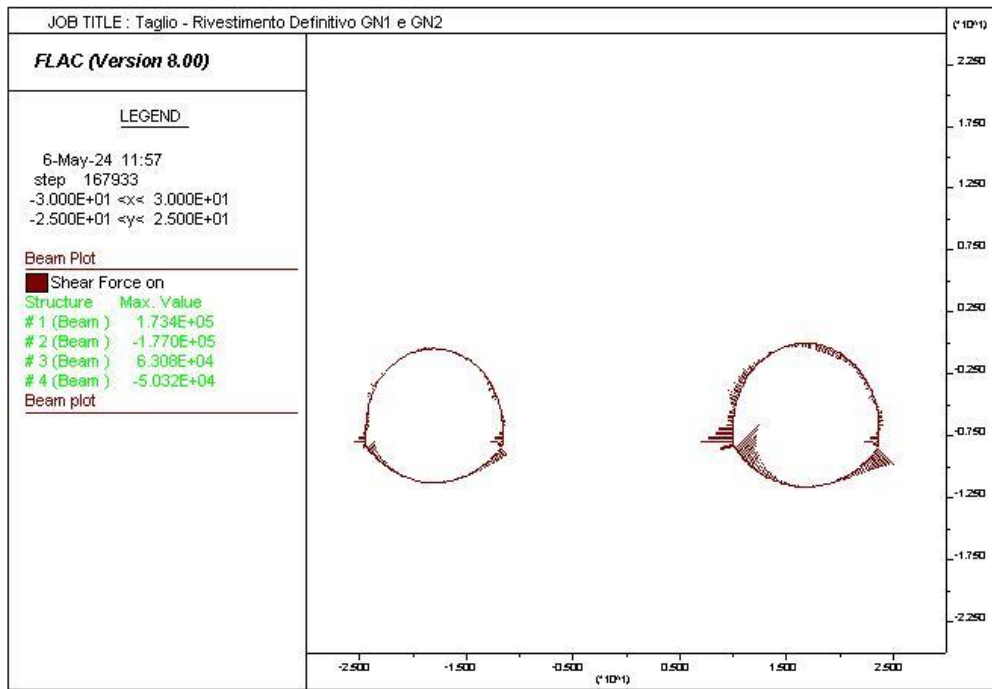
PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:

8.7.6.2 Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine

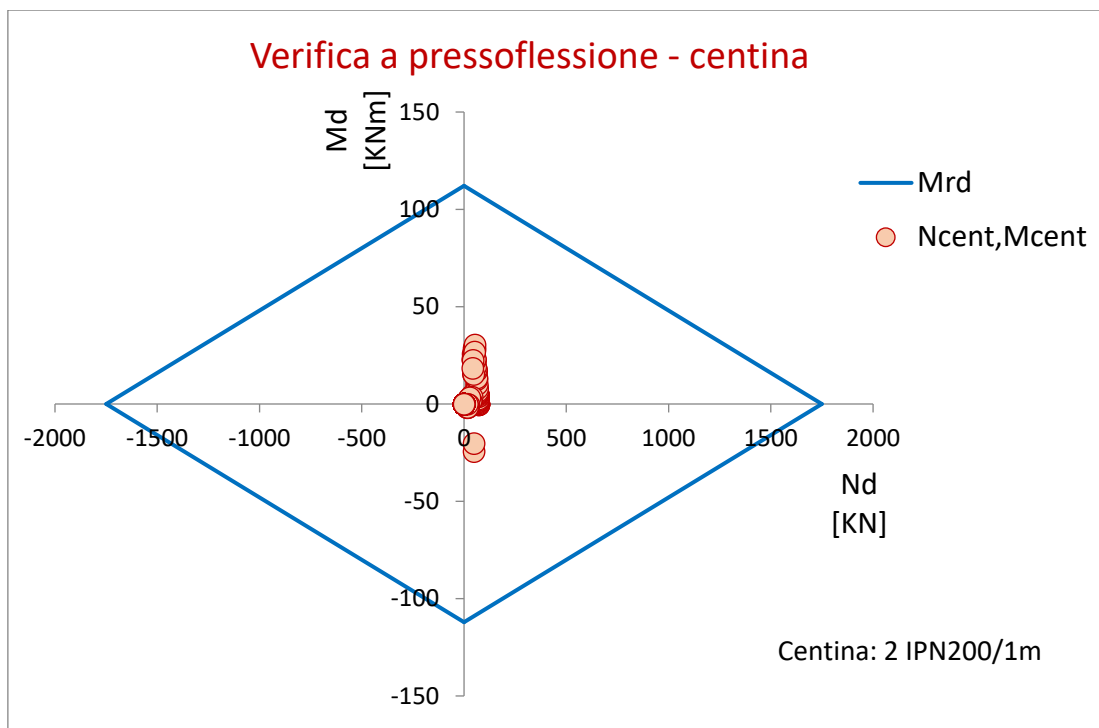


Figura 8-35: Dominio M-N (centina)



Figura 8-36: Verifica a taglio (centina)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.6.3 Verifiche SLU rivestimento provvisorio

Verifica a pressoflessione - centine+spritz

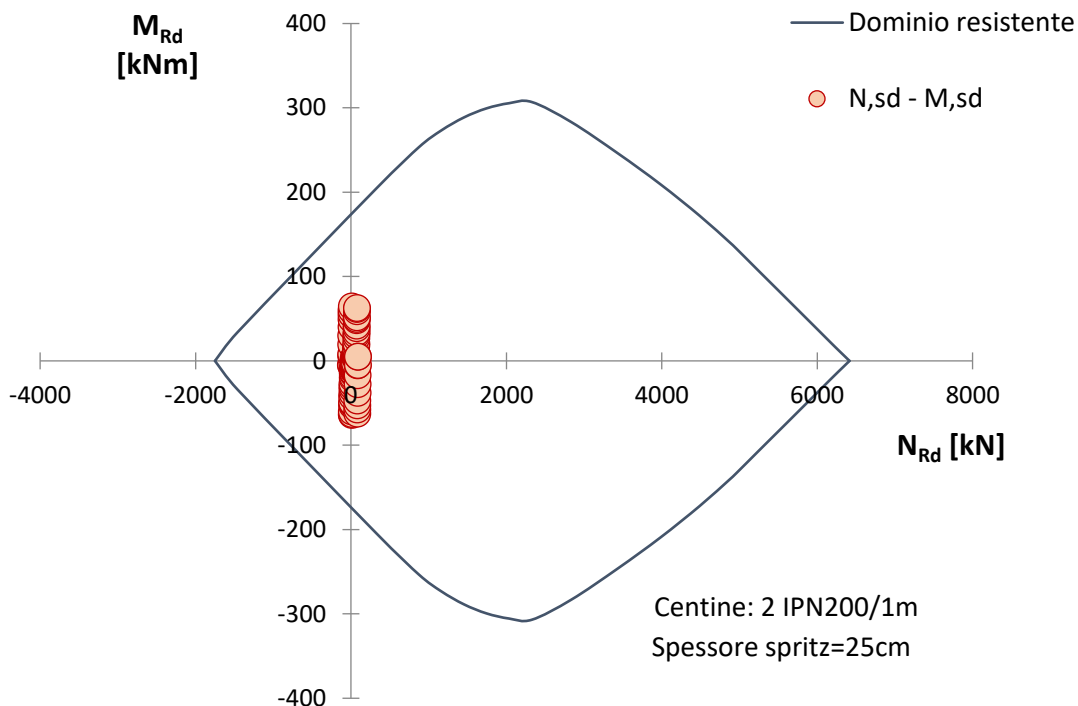


Figura 8-37: Dominio M-N (centina+spritz)

Verifica a taglio (solo centine)	
T_res	472 KN
T_soll	35 KN
Esito	Soddisfatta

Figura 8-38: Verifica a taglio (centina+spritz)

Le verifiche risultano soddisfatte.

8.7.6.5 Verifiche SLU rivestimento definitivo

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

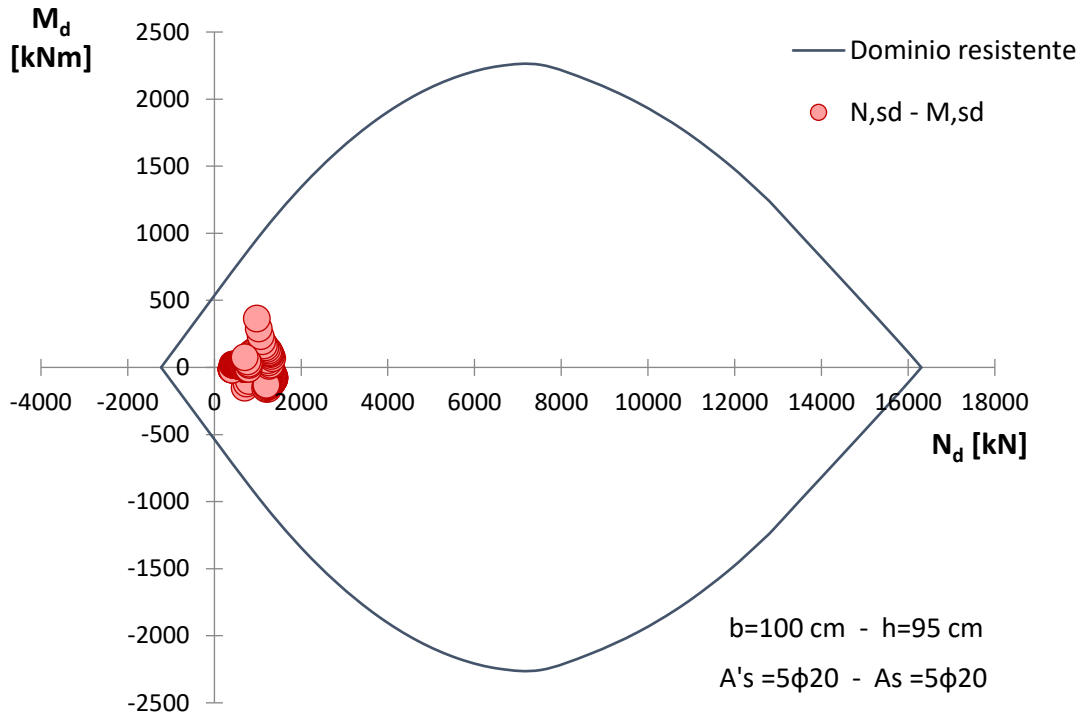


Figura 8-39: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio

	Taglio agente	$V_{Ed} = 225.42 \text{ kN}$	
Altezza della sezione	$h = 950 \text{ mm}$		
Copriferro della sezione	$\delta = 50 \text{ mm}$		
Altezza utile della sezione	$d = 900 \text{ mm}$		
Diametro degli spilli	$d_w = 12 \text{ mm}$		
Numero di braccia	$n_w = 2.5$		$n^\circ \text{ spilli/m (direzione long.)}$
Area totale spilli	$A_{sw} = 282.60 \text{ mm}^2$		
Passo degli spilli	$s = 200 \text{ mm}$		$\text{passo in direzione trasv.}$
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90 \text{ deg}$		
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8 \text{ deg}$		$\cot(\theta) = 2.5$
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000 \text{ mm}$		$1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5$ $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$		
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 1119.7 \text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \sin \alpha$	
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} = 2758.6 \text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) / (1 + \cot^2 \theta)$	
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 1119.7 \text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$	
Esito della verifica	Soddisfatta		

Figura 8-40: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

Verifica a pressoflessione - arco rovescio

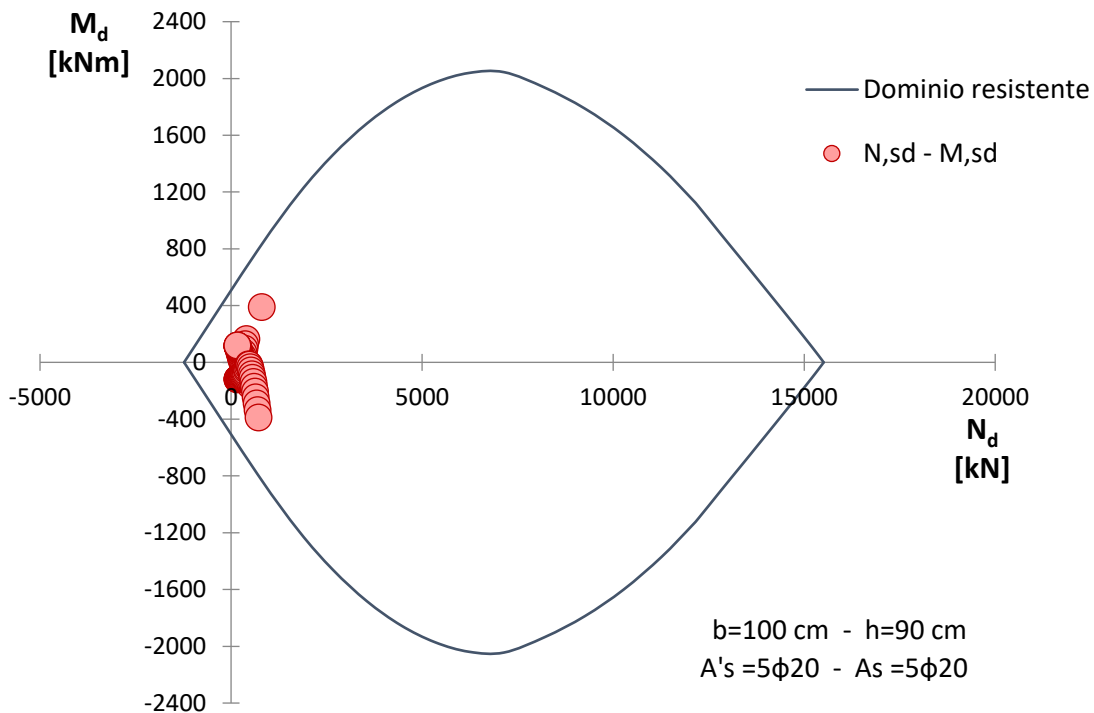


Figura 8-41: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
	<i>Taglio agente</i>	$V_{Ed} = 230.1 \text{ kN}$	
Altezza della sezione		$h = 900 \text{ mm}$	
Copriferro della sezione		$\delta = 50 \text{ mm}$	
Altezza utile della sezione		$d = 850 \text{ mm}$	
Diametro degli spilli		$d_w = 12 \text{ mm}$	
Numero di braccia		$n_w = 2.5$	$\left n^\circ \text{ spilli /m (direzione long.)} \right.$
Area totale spilli		$A_{s,w} = 282.60 \text{ mm}^2$	
Passo degli spilli		$s = 200 \text{ mm}$	$\left \text{passo in direzione trasv.} \right.$
Inclinazione delle staffe		$\alpha = 90 \text{ deg}$	$\left \begin{array}{l} 1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \\ \cot(\theta) = 2.5015776 \quad \quad 21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \end{array} \right.$
Inclinazione delle bielle compresse		$\theta = 21.8 \text{ deg}$	
Larghezza minima della sezione		$b_w = 1000 \text{ mm}$	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse		$\alpha_c = 1.2$	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"		$V_{Rsd} = 1057.5 \text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{s,w}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"		$V_{Rcd} = 2605.3 \text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione		$V_{Rd} = 1057.5 \text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica		Soddisfatta	

Figura 8-42: Verifica a taglio (arco rovescio)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.6.6 Verifiche SLE

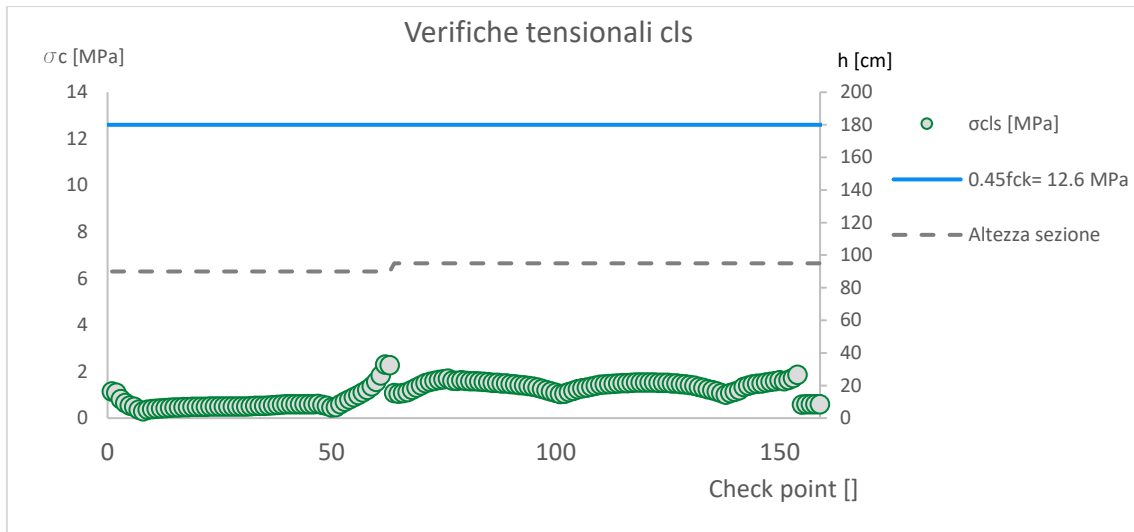


Figura 8-43: Verifiche tensionali cls

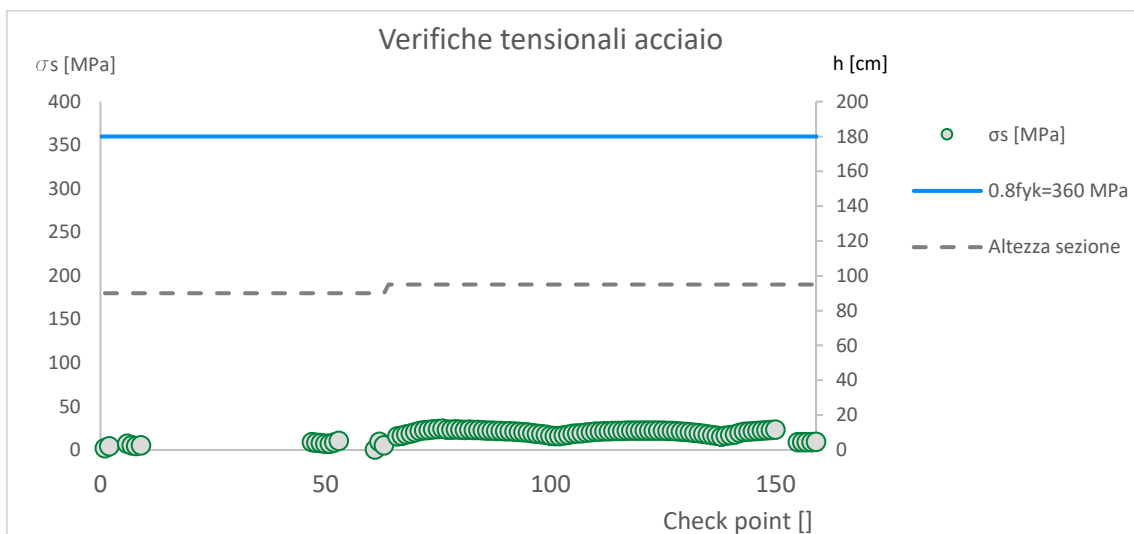


Figura 8-44: Verifiche tensionali acciaio

PROGETTAZIONE ATI:

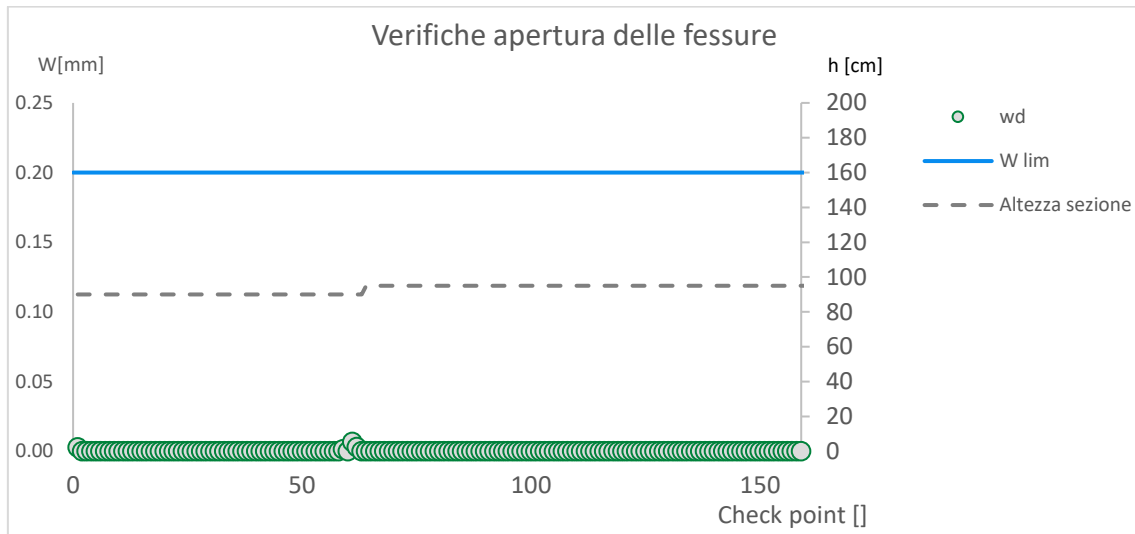


Figura 8-45: Verifiche apertura delle fessure

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.6.8 Verifiche SLU rivestimento definitivo – Condizioni Sismiche

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

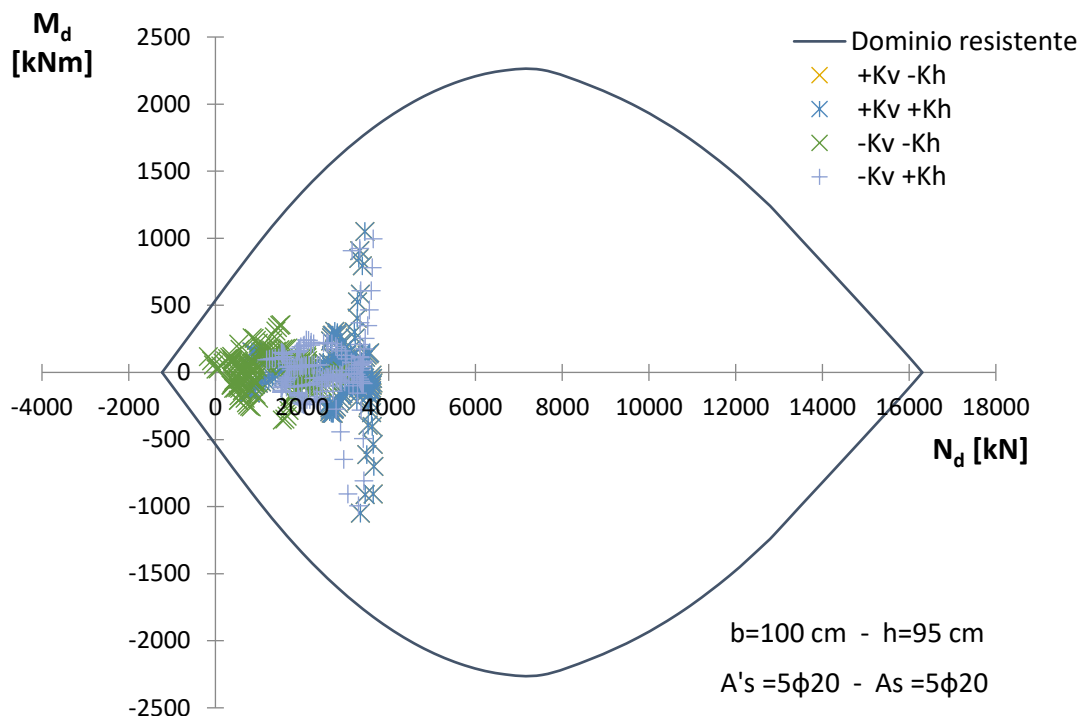


Figura 8-46: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
	Taglio agente	$V_{Ed} = 853.8$	kN
Altezza della sezione	$h = 950$	mm	
Copriferro della sezione	$\delta = 50$	mm	
Altezza utile della sezione	$d = 900$	mm	
Diametro degli spilli	$d_w = 12$	mm	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$		n° spilli/m (direzione long.)
Area totale spilli	$A_{sw} = 282.60$	mm ²	
Passo degli spilli	$s = 200$	mm	passo in direzione trasv.
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90$	deg	
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8$	deg	$\cot(\theta) = 2.5$ $1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5$ $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000$	mm	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$		
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 1119.7$	kN	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \sin \alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compresione"	$V_{Rcd} = 2758.6$	kN	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) / (1 + \cot^2 \theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 1119.7$	kN	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta		

Figura 8-47: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

Verifica a pressoflessione - arco rovescio

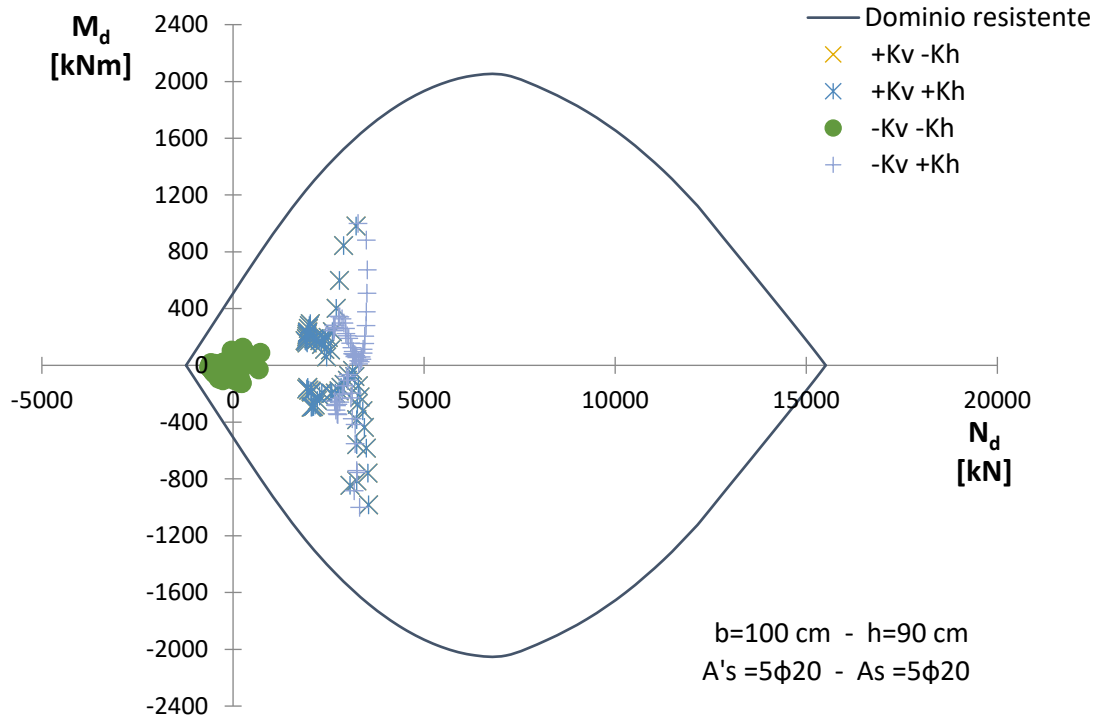


Figura 8-48: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio		
	Taglio agente	$V_{Ed} = 812.7 \text{ kN}$
Altezza della sezione	$h = 900 \text{ mm}$	
Copriferro della sezione	$\delta = 50 \text{ mm}$	
Altezza utile della sezione	$d = 850 \text{ mm}$	
Diametro degli spilli	$d_w = 12 \text{ mm}$	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$	$\left n^\circ \text{ spilli /m (direzione long.)} \right.$
Area totale spilli	$A_{s,w} = 282.60 \text{ mm}^2$	
Passo degli spilli	$s = 200 \text{ mm}$	$\left \text{passo in direzione trasv.} \right.$
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90 \text{ deg}$	$\left. \begin{array}{l} 1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \\ 21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \end{array} \right\}$
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8 \text{ deg}$	
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000 \text{ mm}$	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 1057.5 \text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{s,w}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} = 2605.3 \text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 1057.5 \text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta	

Figura 8-49: Verifica a taglio (arco rovescio)

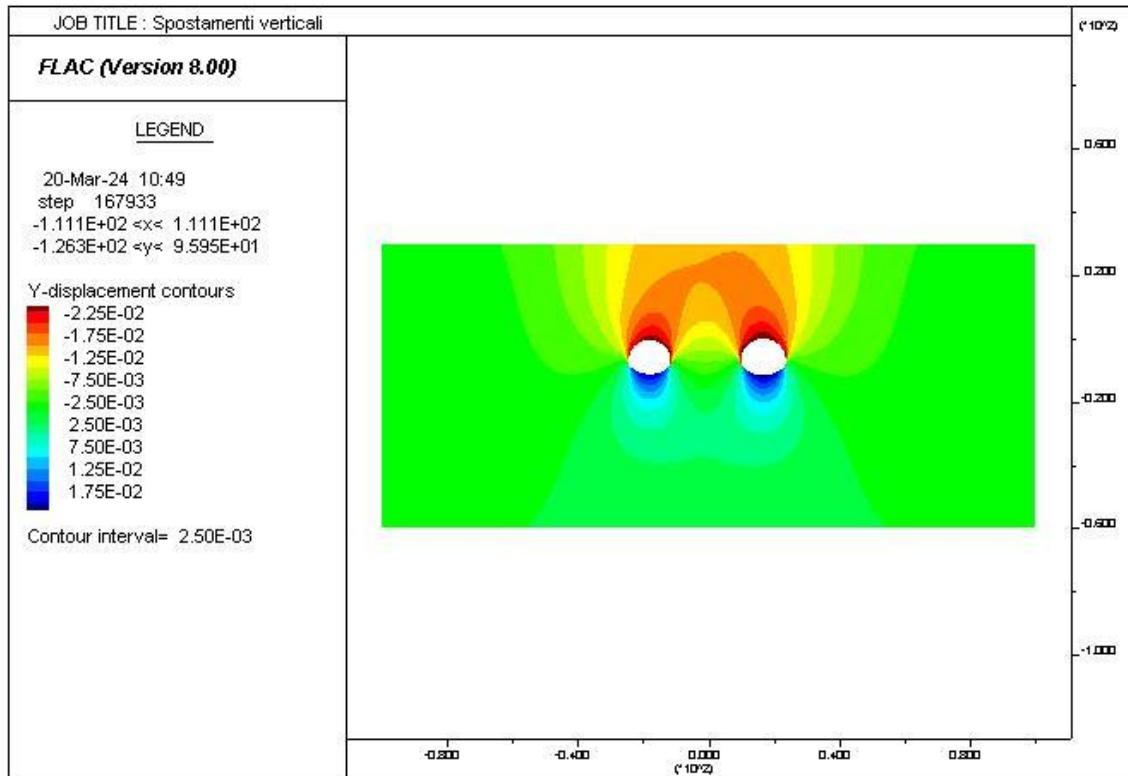
Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.6.9 Subsidenze attese

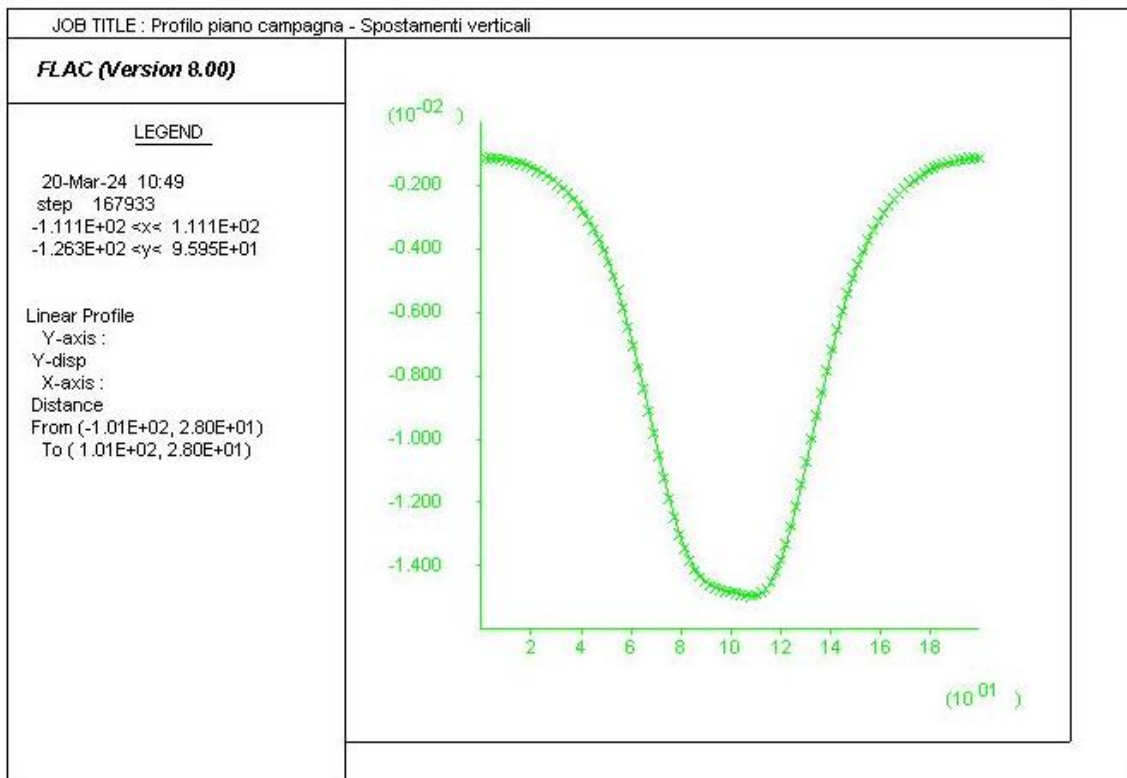
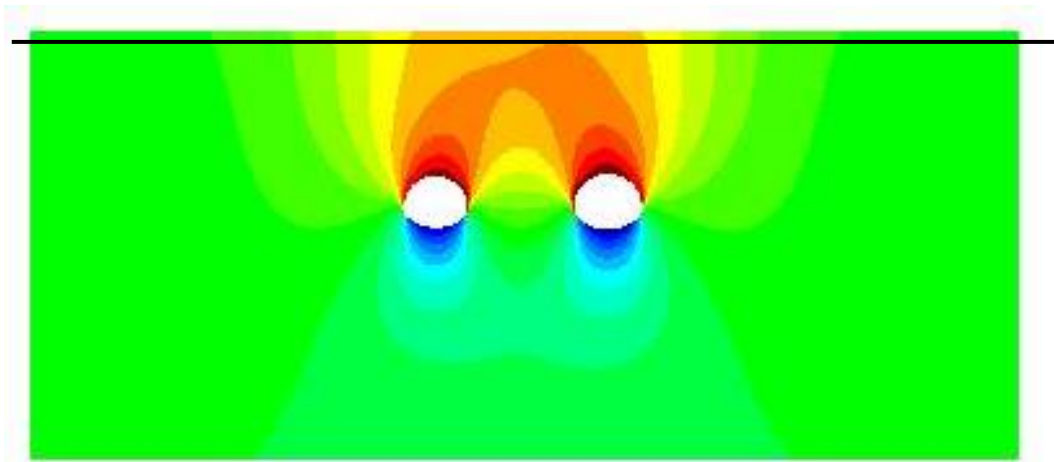
In corrispondenza della sezione di calcolo a basse coperture è stata condotta una analisi agli elementi finiti al fine anche di creare un profilo di subsidenze indotte dallo scavo della galleria.

Di seguito si riporta il contour degli spostamenti verticali nelle condizioni di lungo termine.



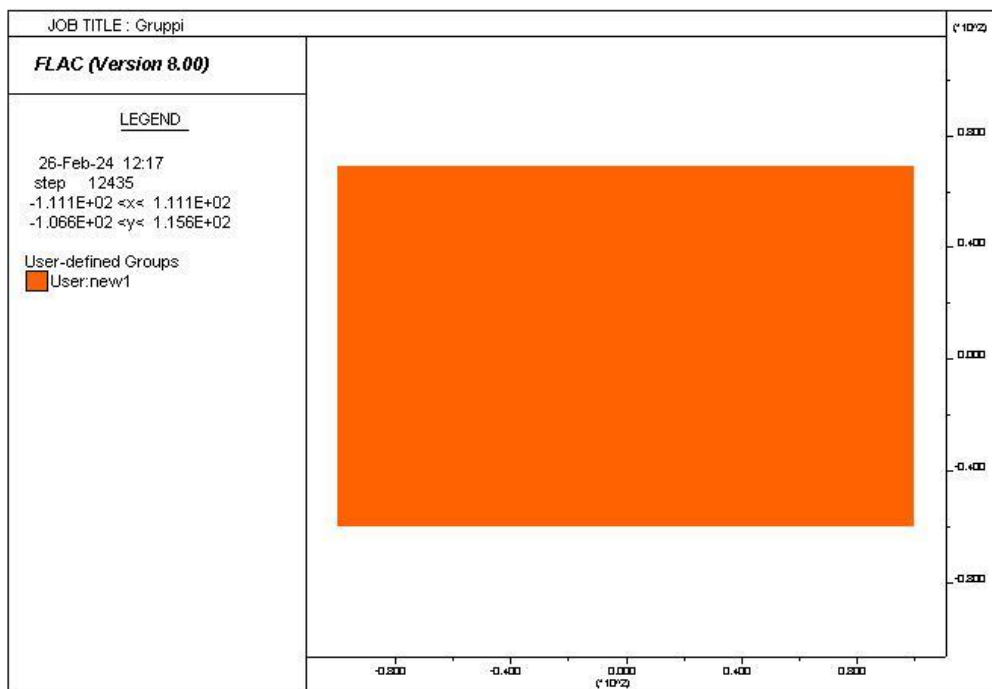
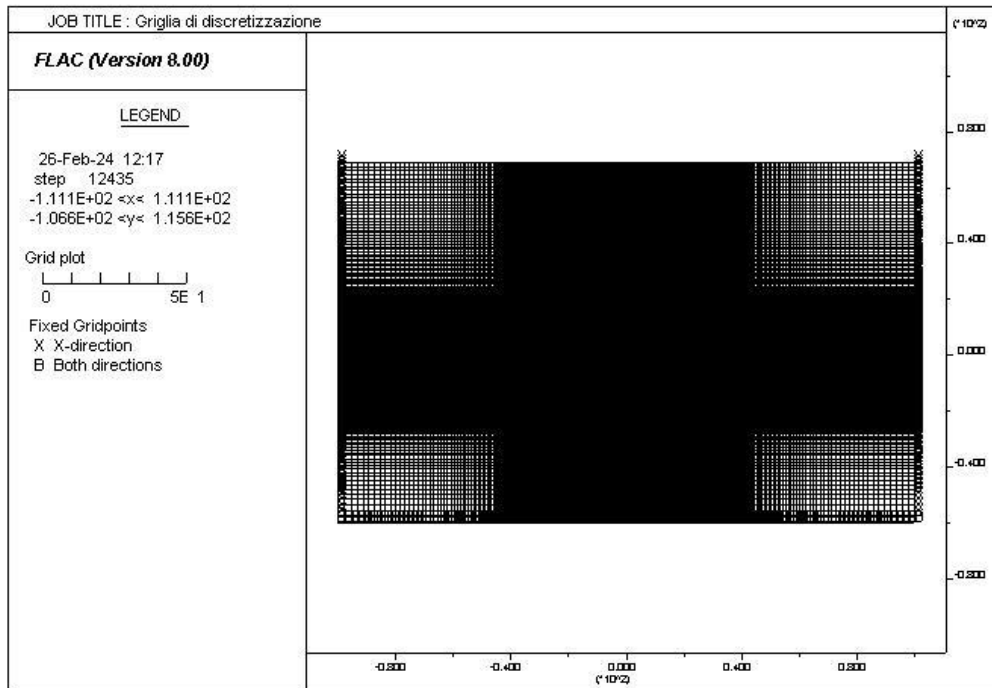
PROGETTAZIONE ATI:

Di seguito si riporta il profilo degli spostamenti verticali in corrispondenza del piano campagna.

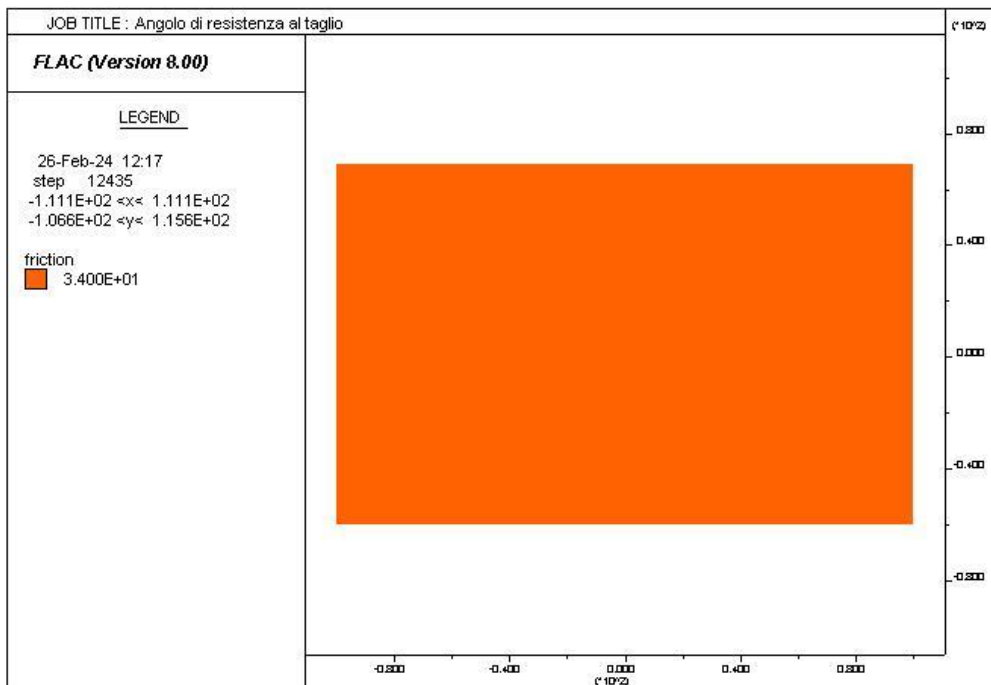
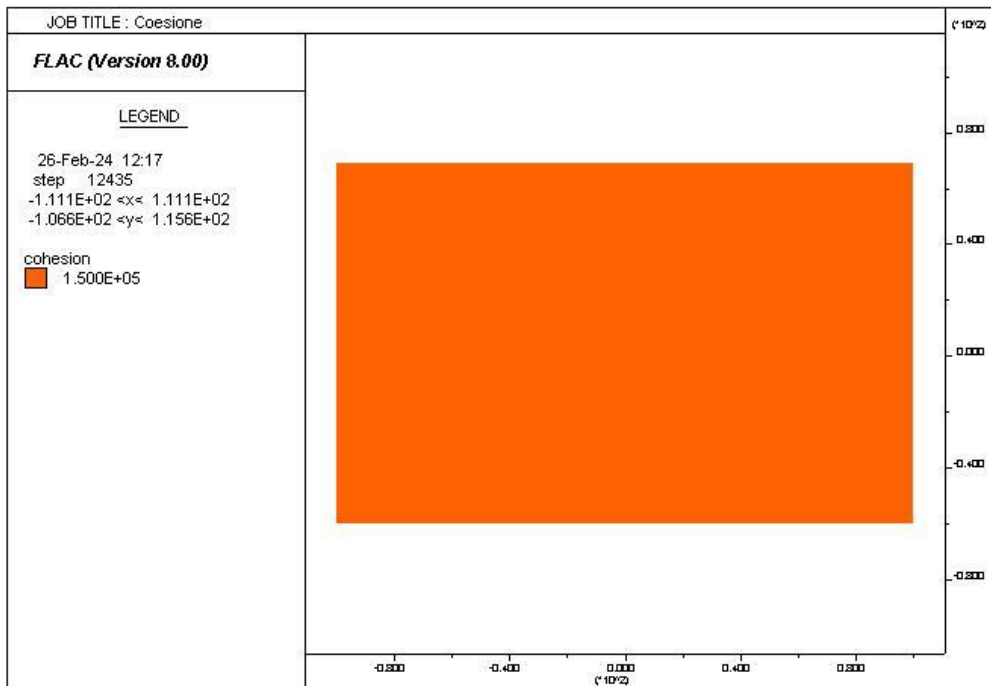


Dal calcolo si riscontrano spostamenti verticali massimi dell'ordine di 14.0 mm, in asse galleria.

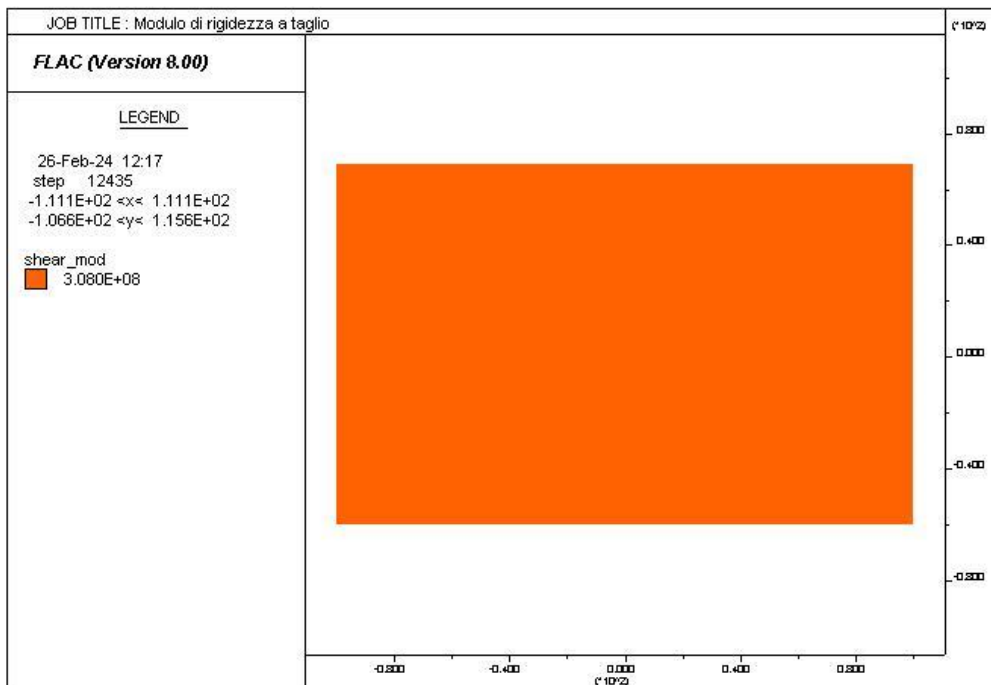
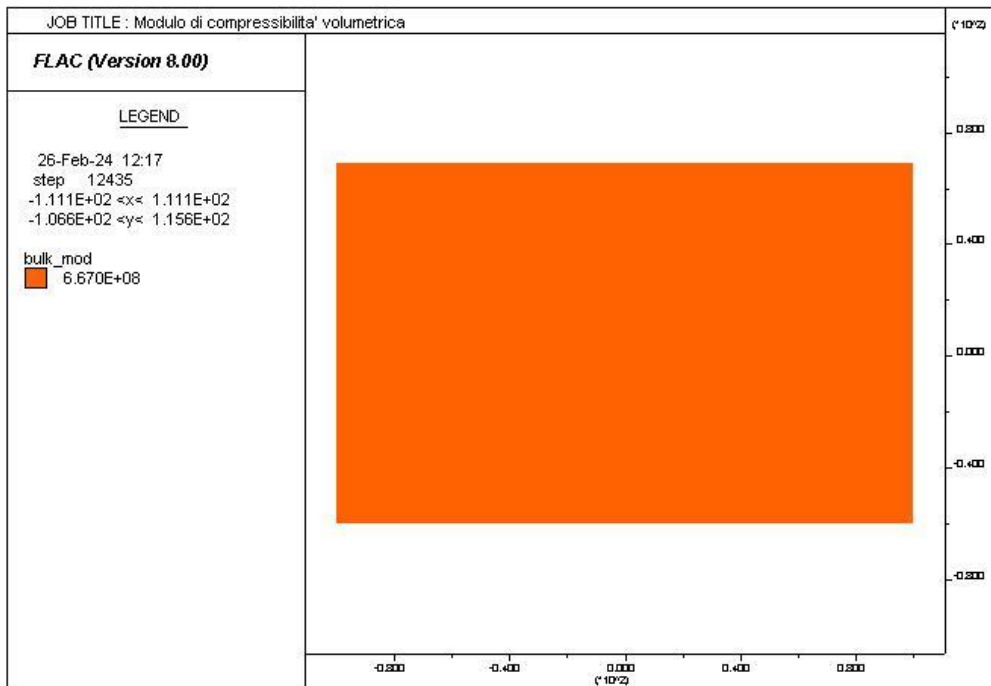
8.7.8 SEZIONE TIPO B0 – SEZ 4



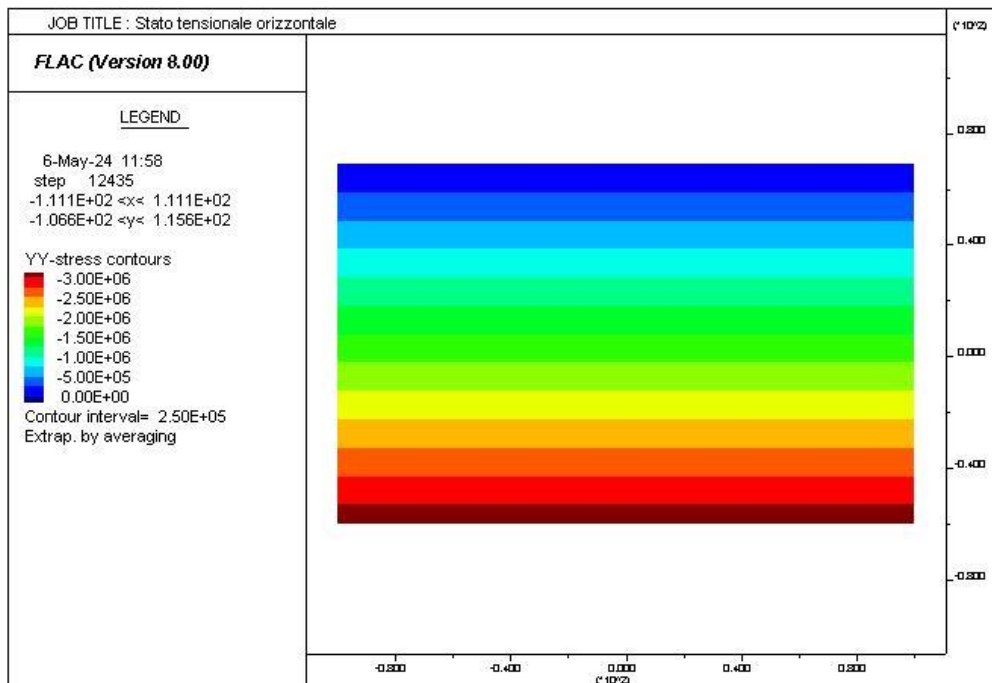
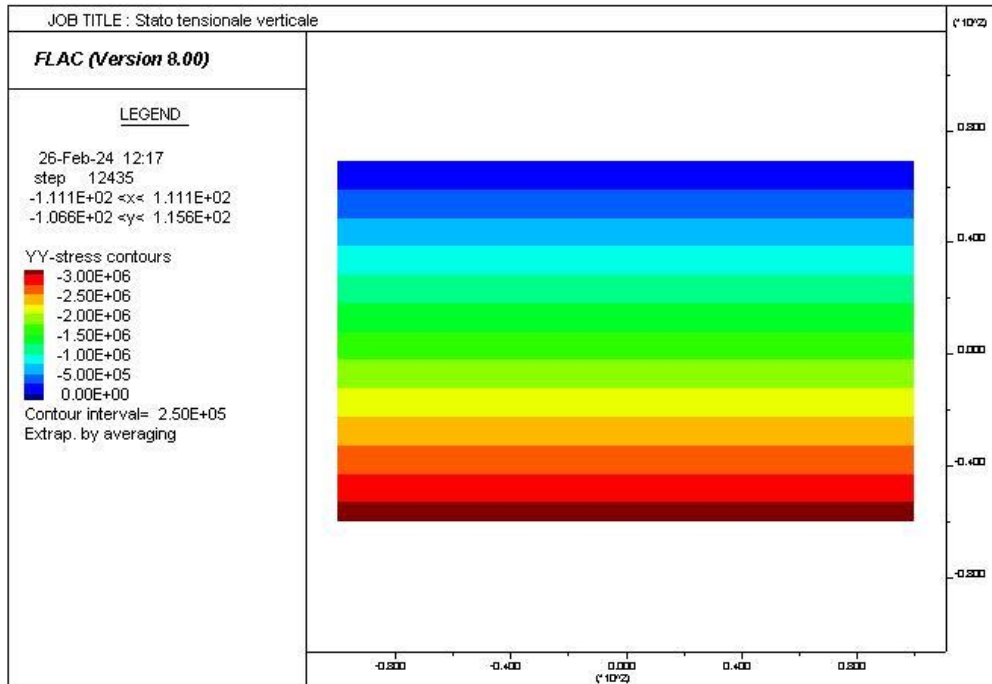
PROGETTAZIONE ATI:



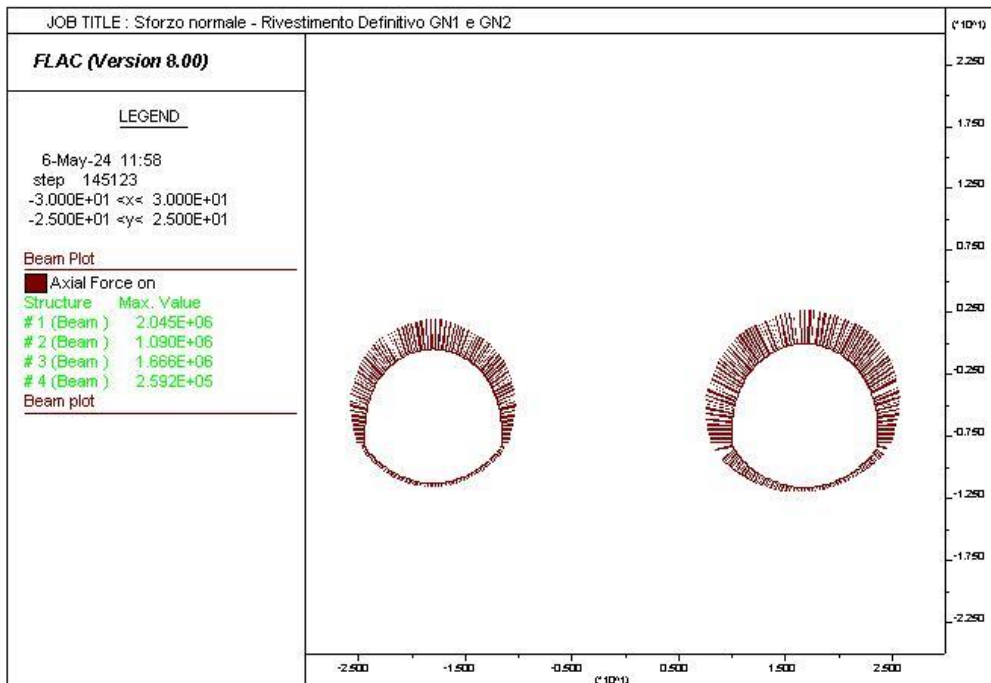
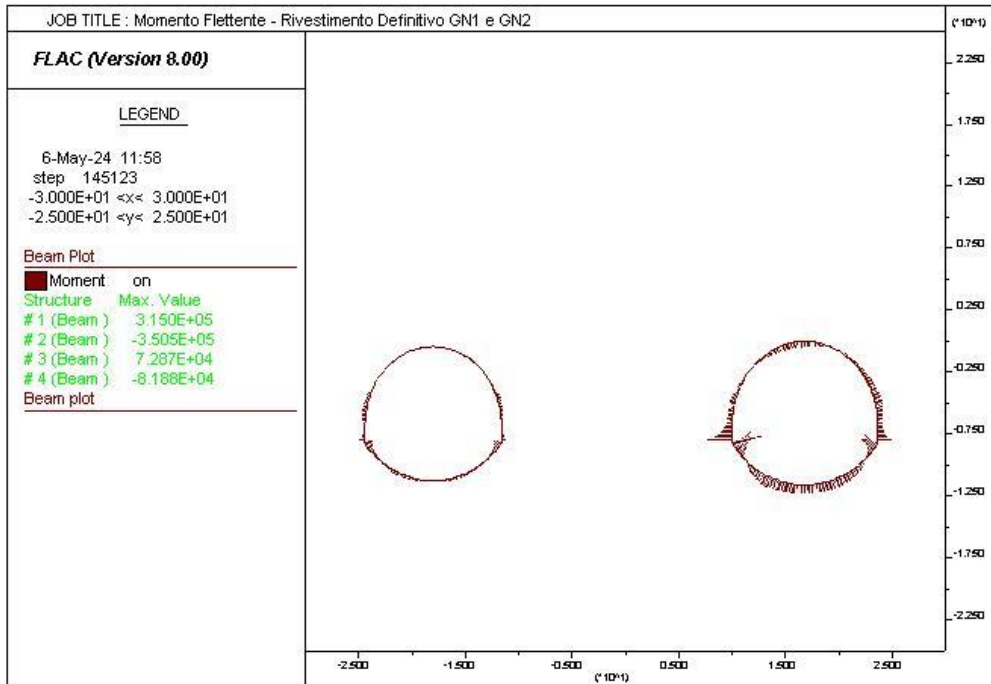
PROGETTAZIONE ATI:



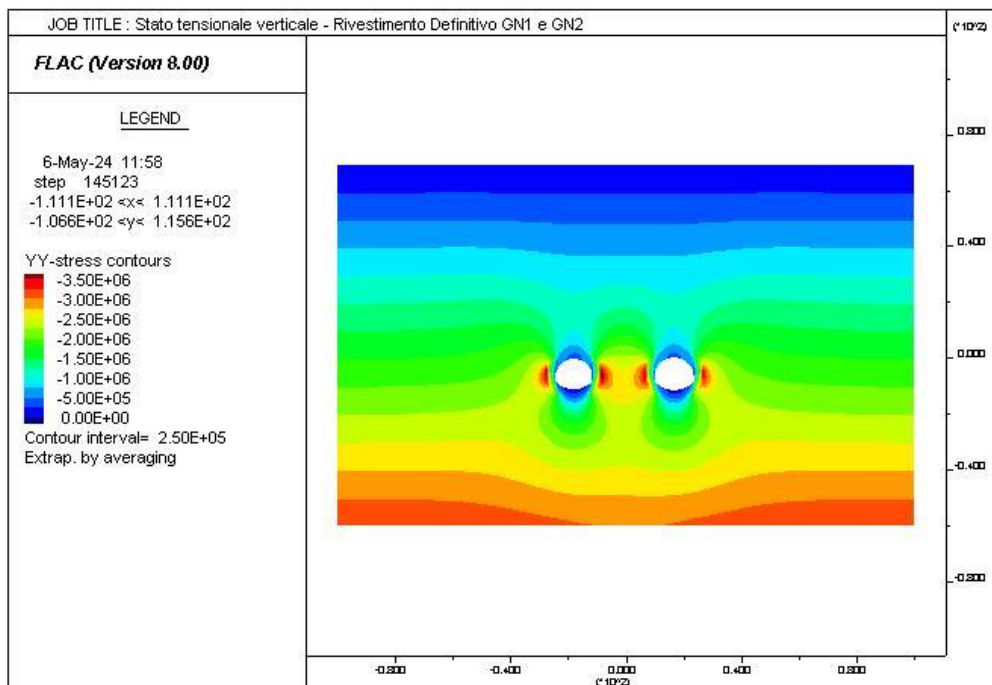
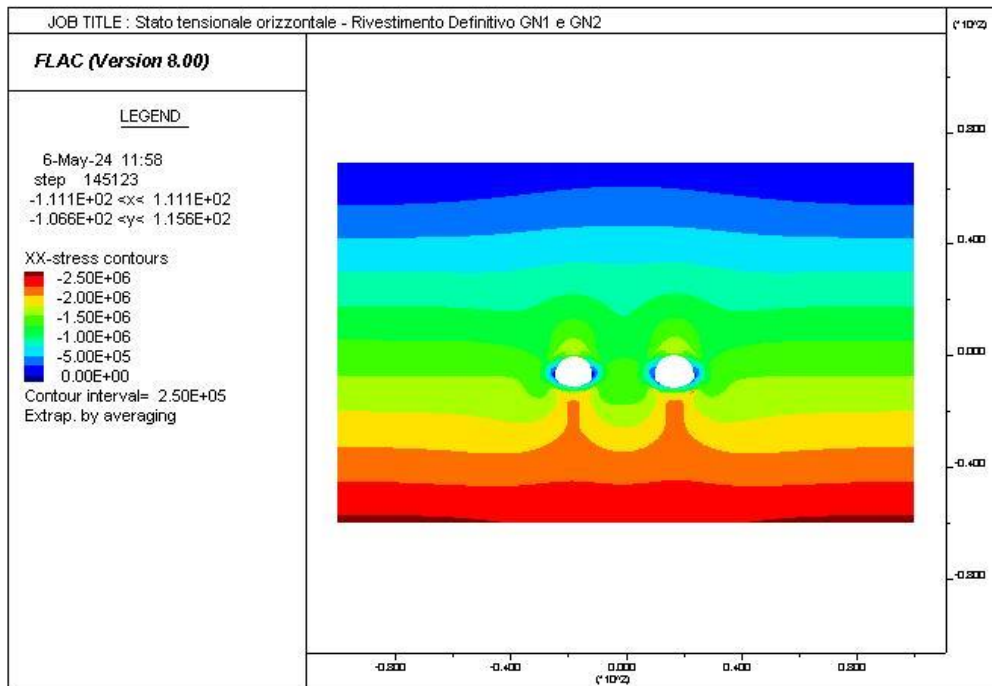
PROGETTAZIONE ATI:



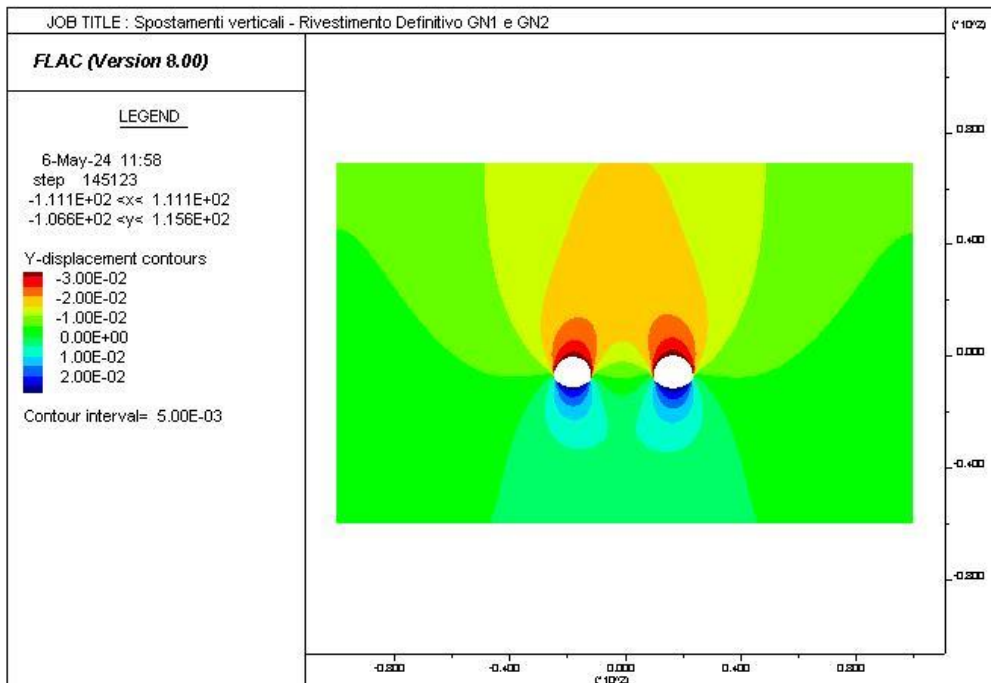
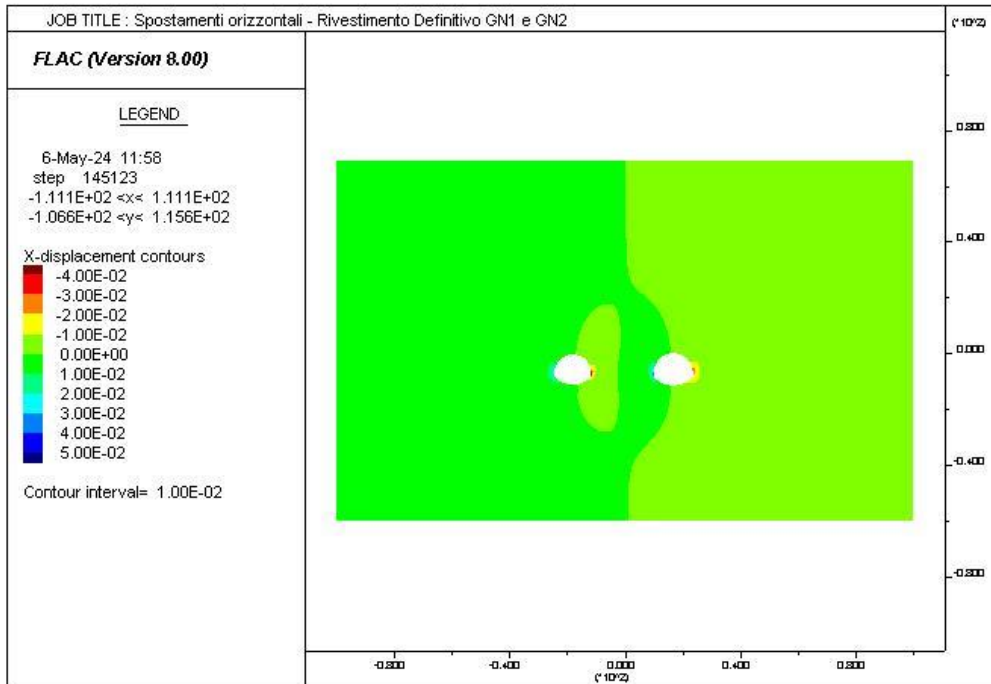
PROGETTAZIONE ATI:



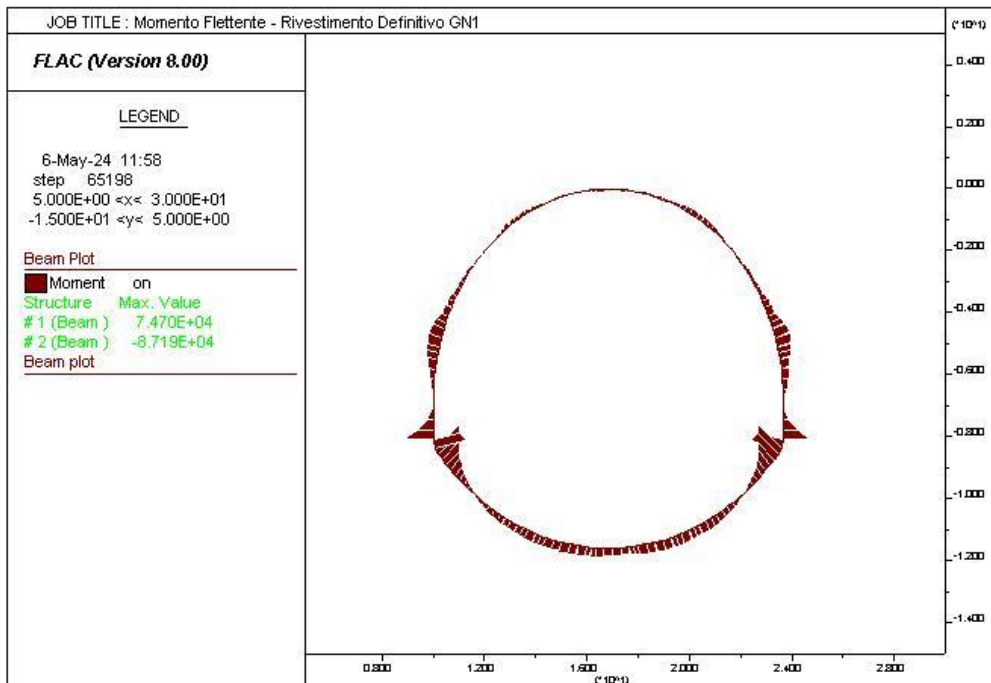
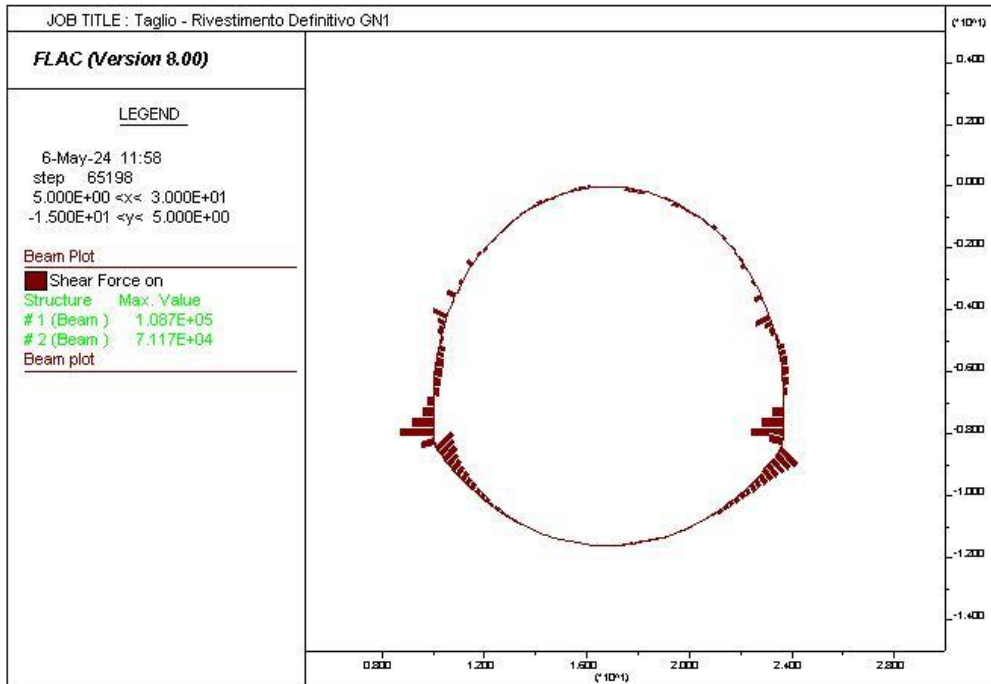
PROGETTAZIONE ATI:



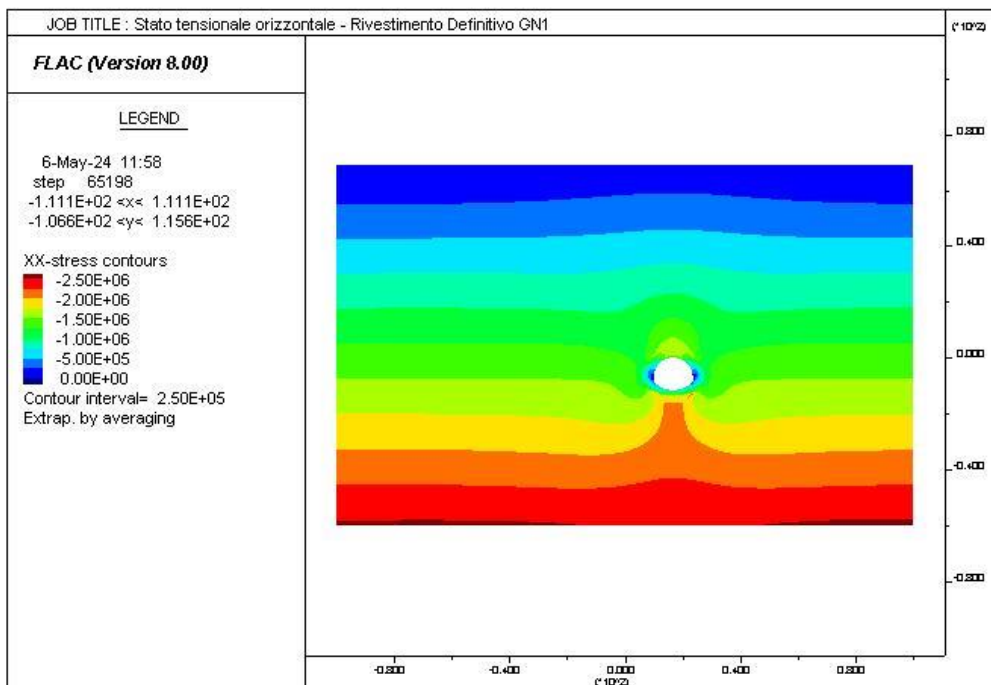
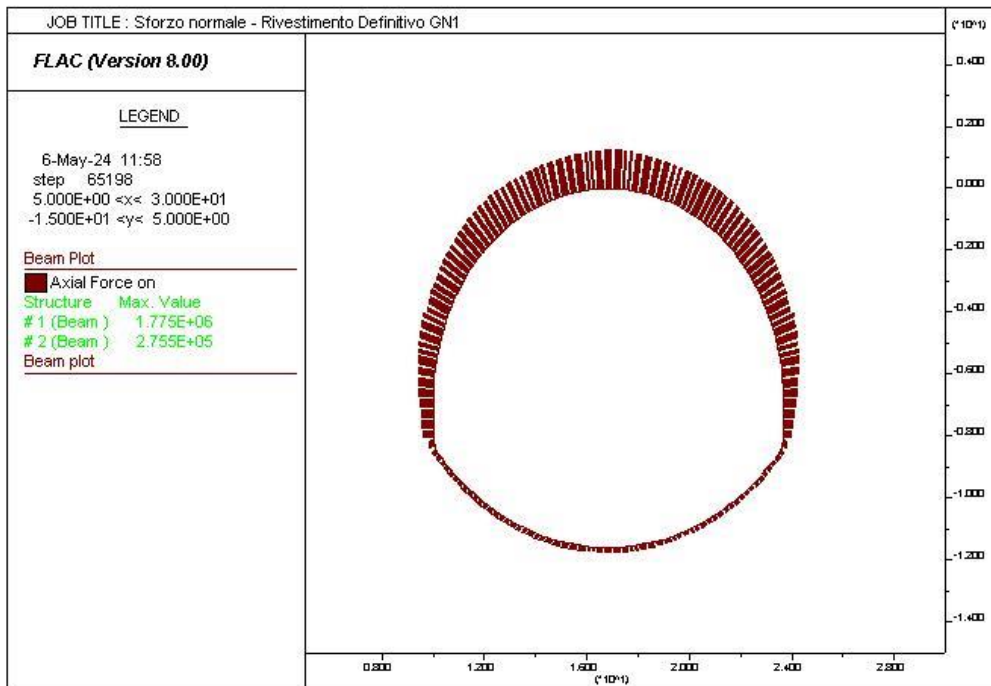
PROGETTAZIONE ATI:



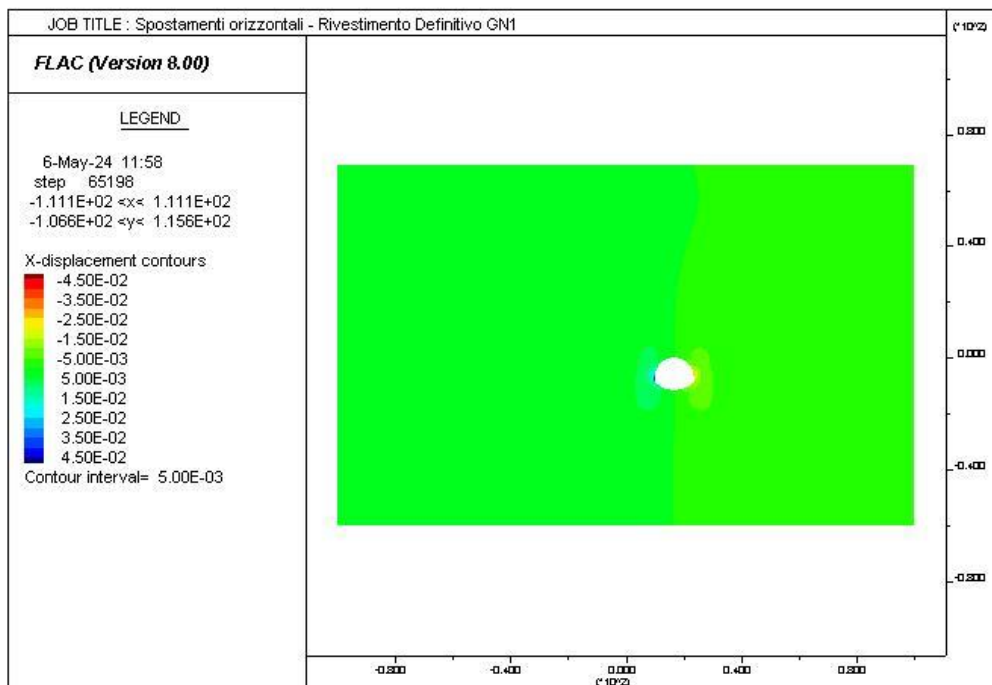
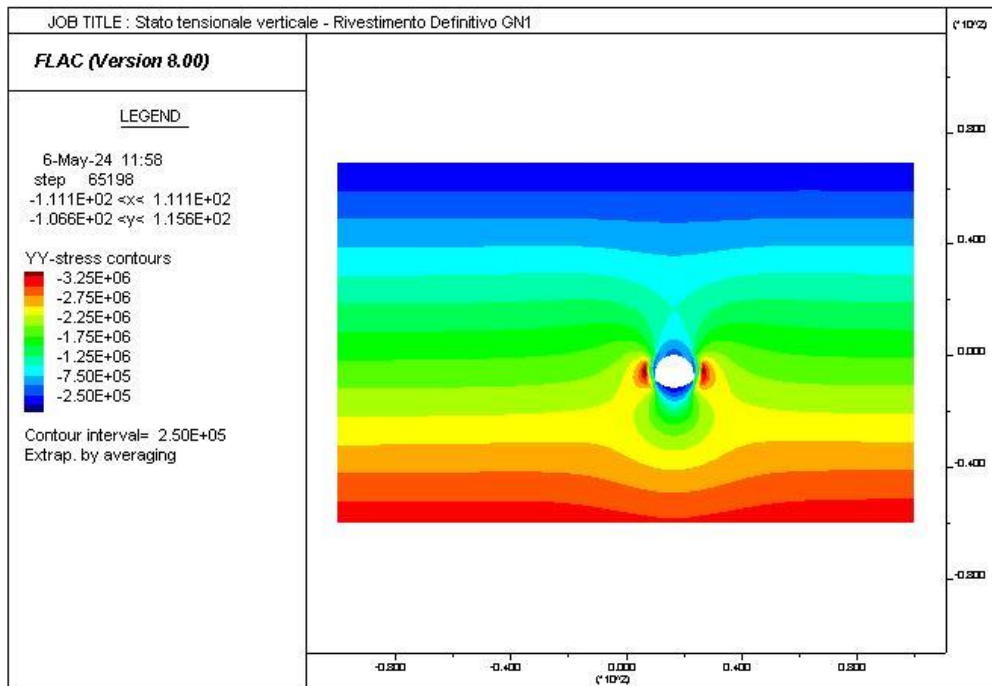
PROGETTAZIONE ATI:



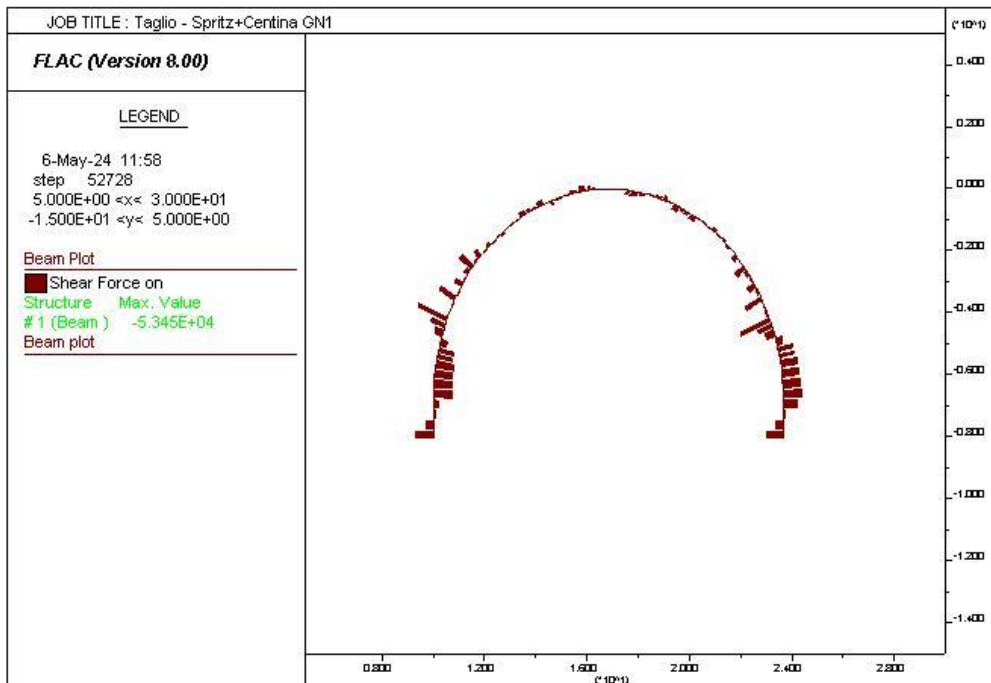
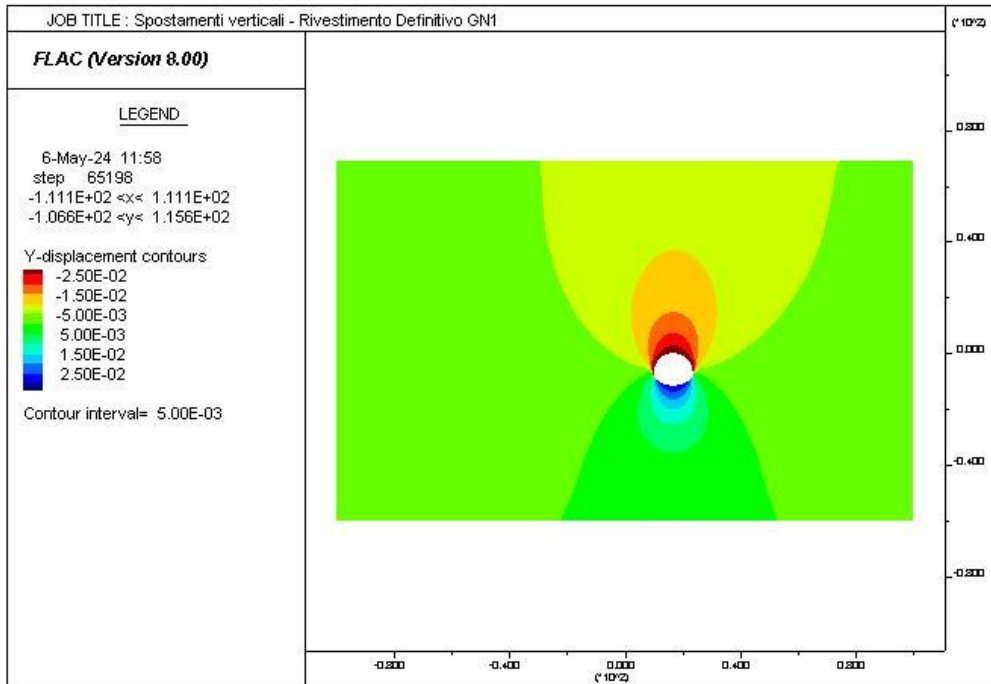
PROGETTAZIONE ATI:



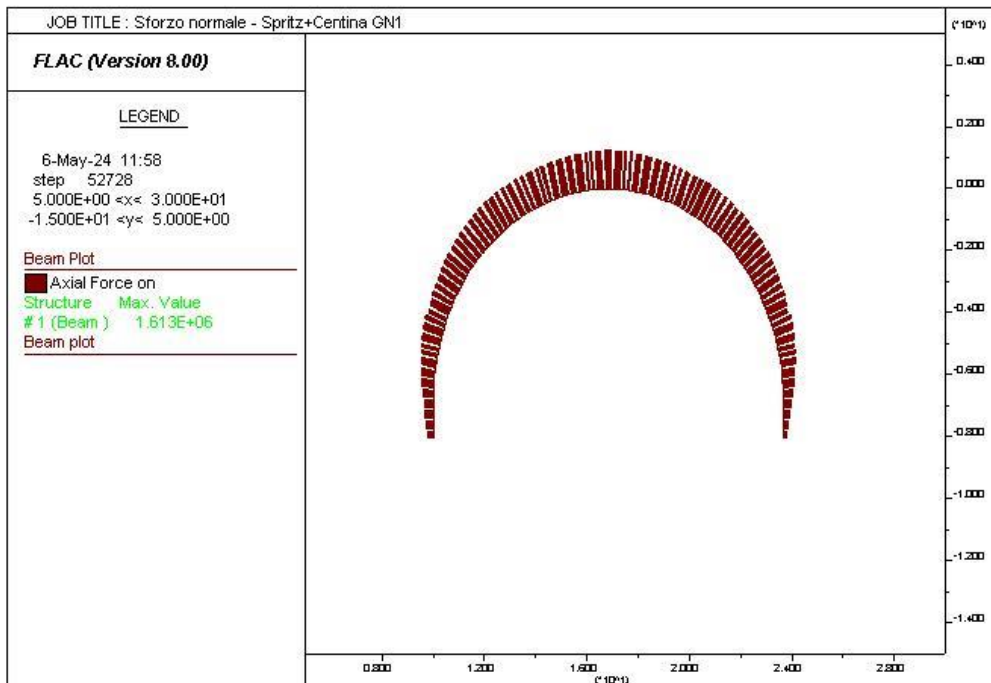
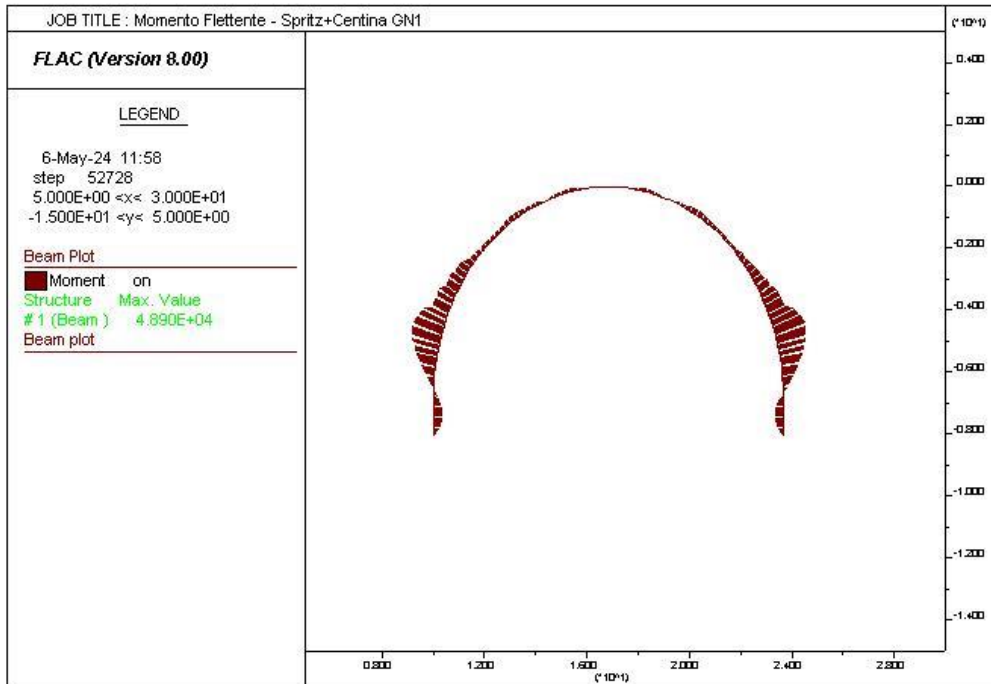
PROGETTAZIONE ATI:



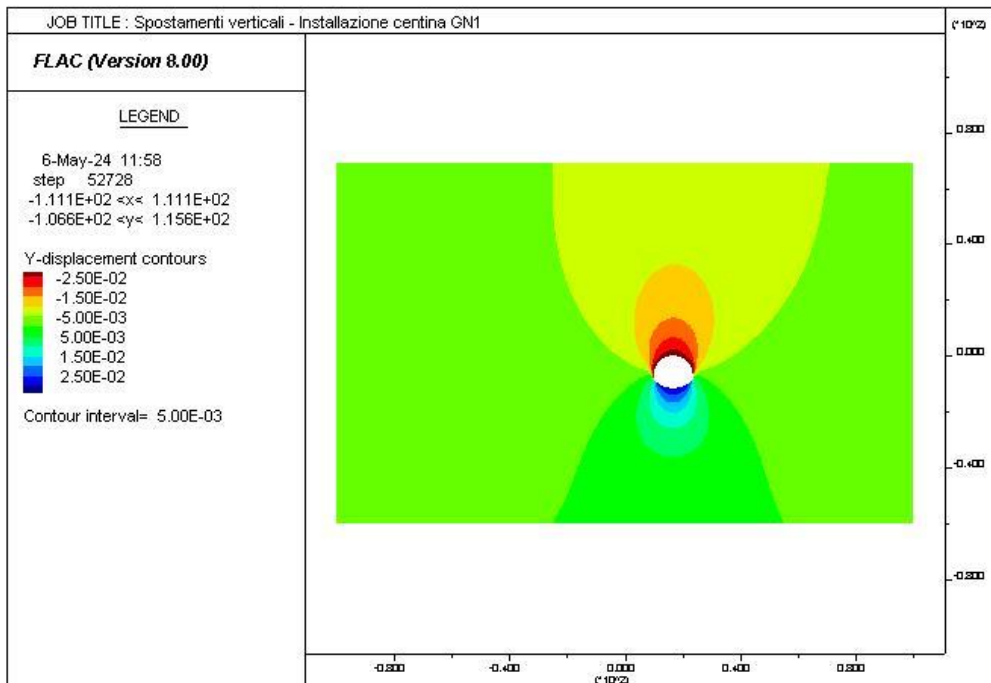
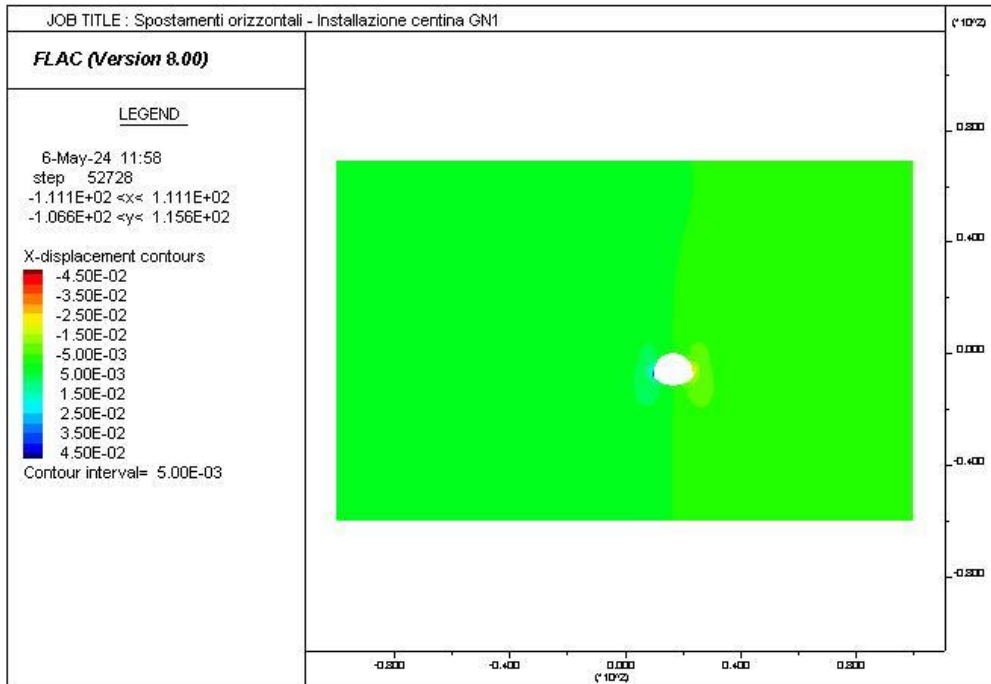
PROGETTAZIONE ATI:



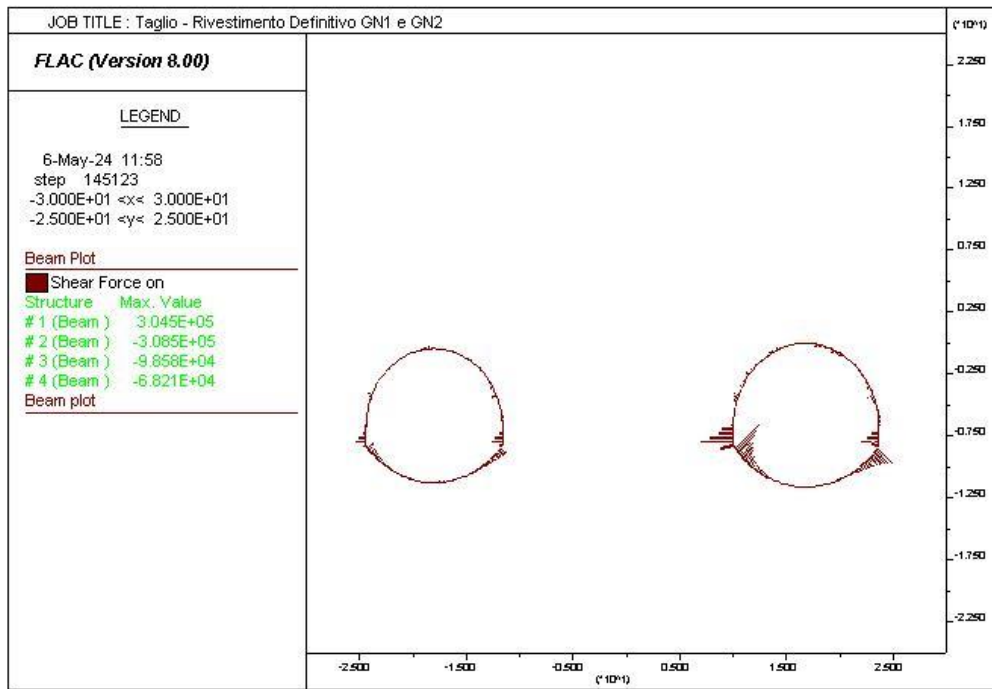
PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:

8.7.8.2 Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine

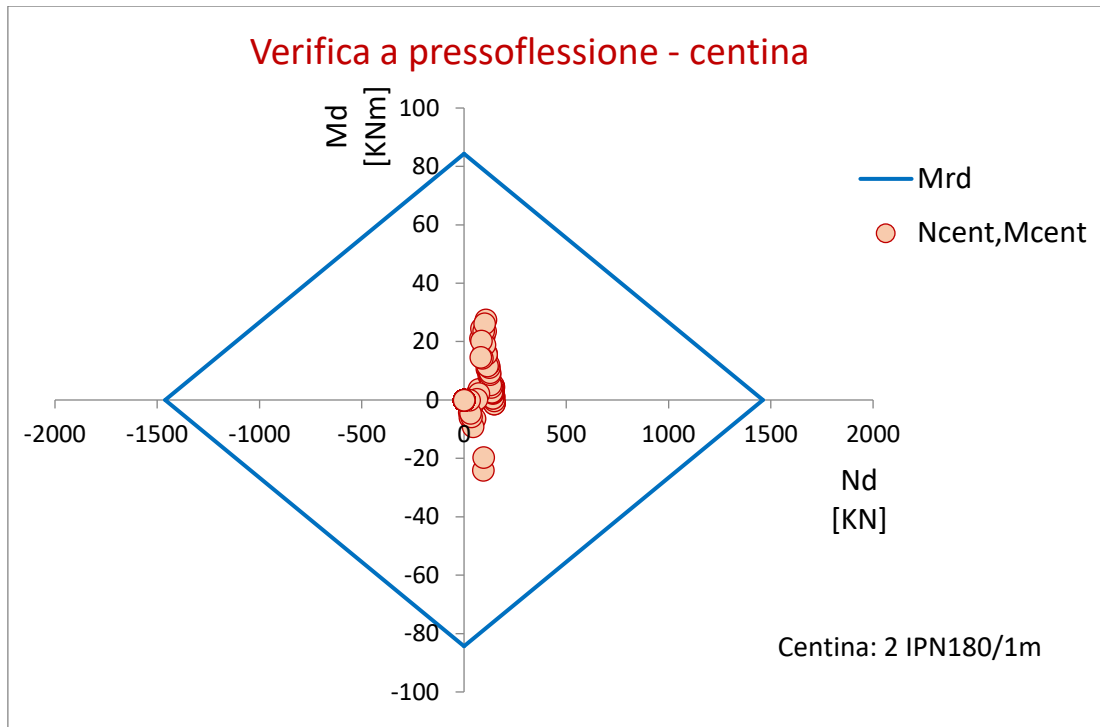


Figura 8-50: Dominio M-N (centina)

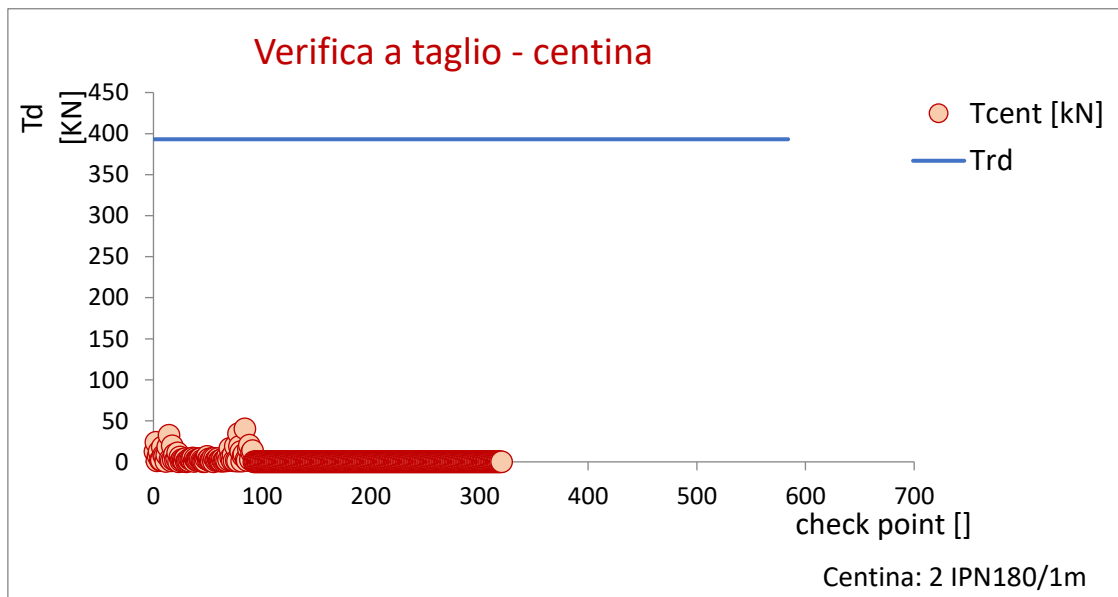


Figura 8-51: Verifica a taglio (centina)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.8.3 Verifiche SLU rivestimento provvisorio

Verifica a pressoflessione - centine+spritz

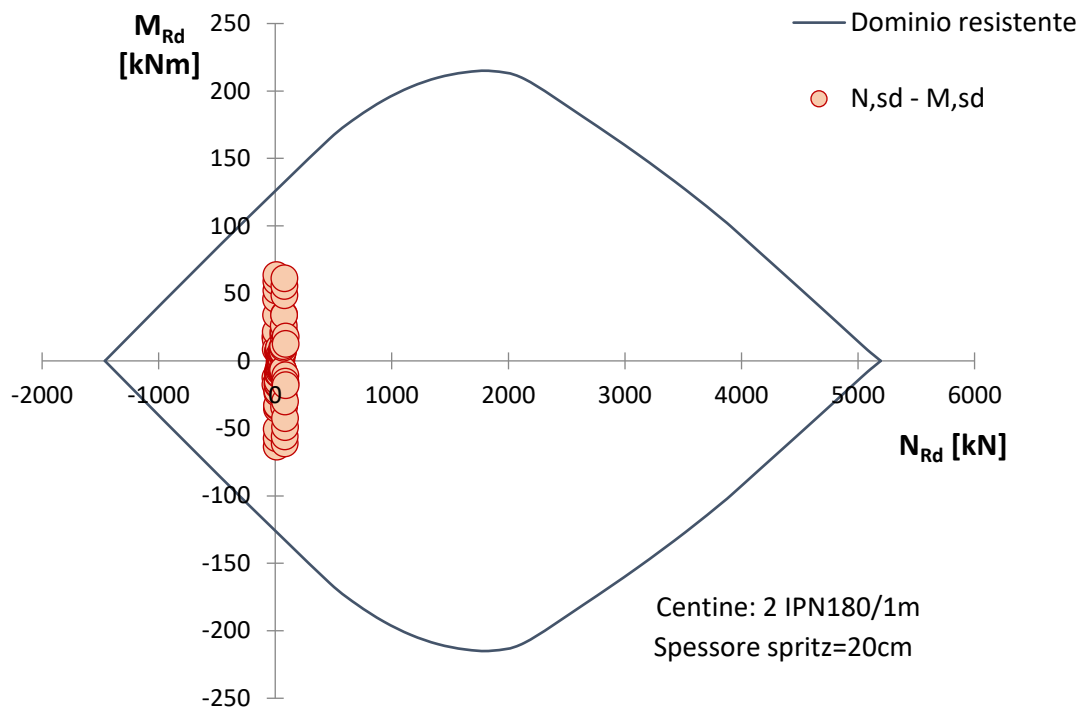


Figura 8-52: Dominio M-N (centina+spritz)

Verifica a taglio (solo centine)	
T_res	393 KN
T_soll	69 KN
Esito	Soddisfatta

Figura 8-53: Verifica a taglio (centina+spritz)

Le verifiche risultano soddisfatte.

8.7.8.5 Verifiche SLU rivestimento definitivo

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

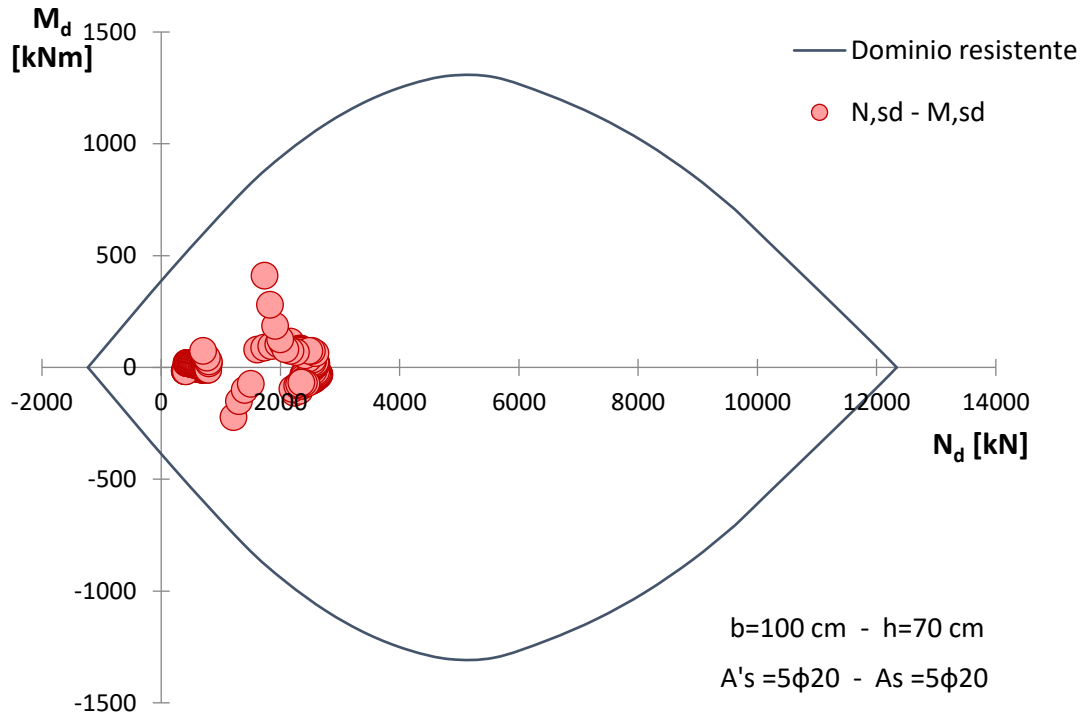


Figura 8-54: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
	Taglio agente	$V_{Ed} = 395.85$	kN
Altezza della sezione	$h = 700$	mm	
Copriferro della sezione	$\delta = 50$	mm	
Altezza utile della sezione	$d = 650$	mm	
Diametro degli spilli	$d_w = 12$	mm	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$		n° spilli/m (direzione long.)
Area totale spilli	$A_{sw} = 282.60$	mm ²	
Passo degli spilli	$s = 200$	mm	passo in direzione trasv.
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90$	deg	
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8$	deg	$\cot(\theta) = 2.5$
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000$	mm	$1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5$ $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$		
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 808.7$	kN	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot\alpha + \cot\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-comprensione"	$V_{Rcd} = 1992.3$	kN	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\cot\alpha + \cot\theta) / (1 + \cot^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 808.7$	kN	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta		

Figura 8-55: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

Sezione in arco rovescio

PROGETTAZIONE ATI:

Verifica a pressoflessione - arco rovescio

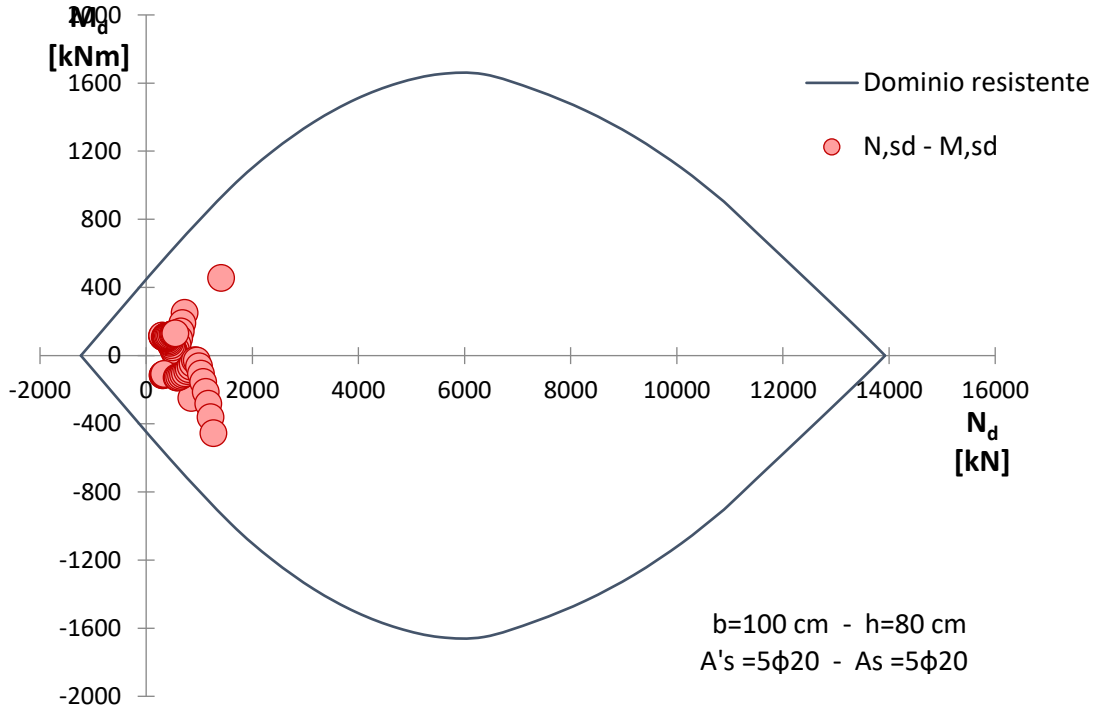


Figura 8-56: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio

Taglio agente		$V_{Ed} = 401.05 \text{ kN}$
Altezza della sezione	$h = 800 \text{ mm}$	
Coprifero della sezione	$\delta = 50 \text{ mm}$	
Altezza utile della sezione	$d = 750 \text{ mm}$	
Diametro degli spilli	$d_w = 12 \text{ mm}$	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$	n° spilli / m (direzione long.)
Area totale spilli	$A_{sw} = 282.60 \text{ mm}^2$	
Passo degli spilli	$s = 200 \text{ mm}$	passo in direzione trasv.
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90 \text{ deg}$	$\left. \begin{array}{l} 1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \\ \cot(\theta) = 2.5015776 \end{array} \right\} 21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8 \text{ deg}$	
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000 \text{ mm}$	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 933.1 \text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} = 2298.8 \text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 933.1 \text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta	

Figura 8-57: Verifica a taglio (arco rovescio)

Le verifiche risultano soddisfatte.

8.7.8.6 Verifiche SLE

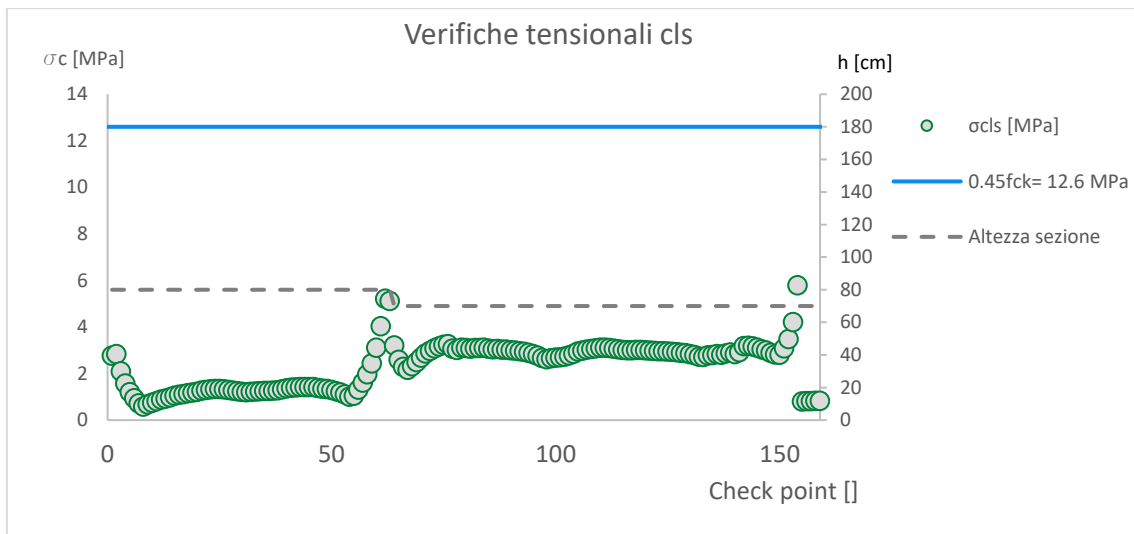


Figura 8-58: Verifiche tensionali cls

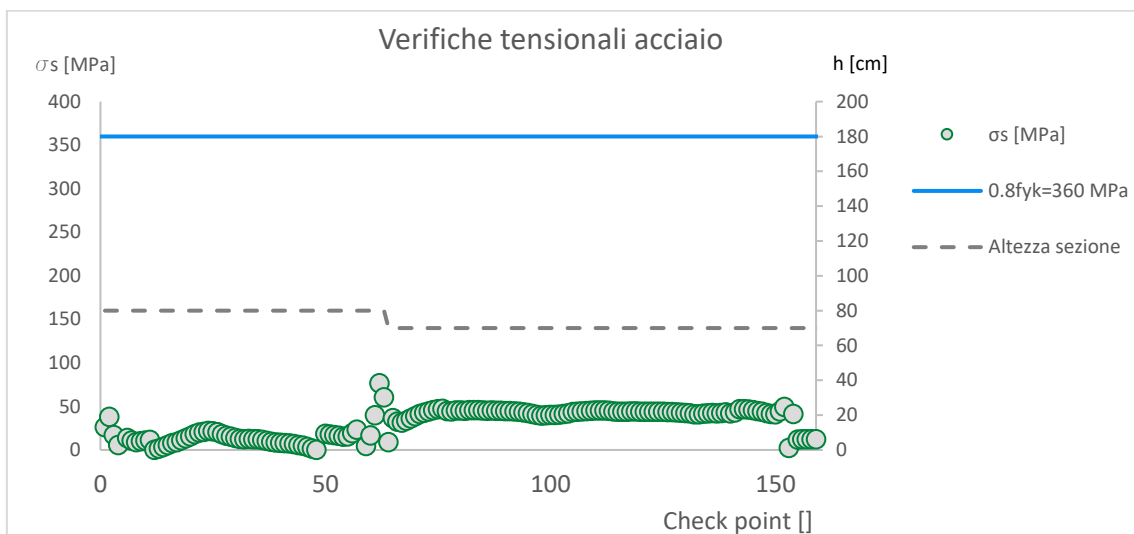


Figura 8-59: Verifiche tensionali acciaio

PROGETTAZIONE ATI:

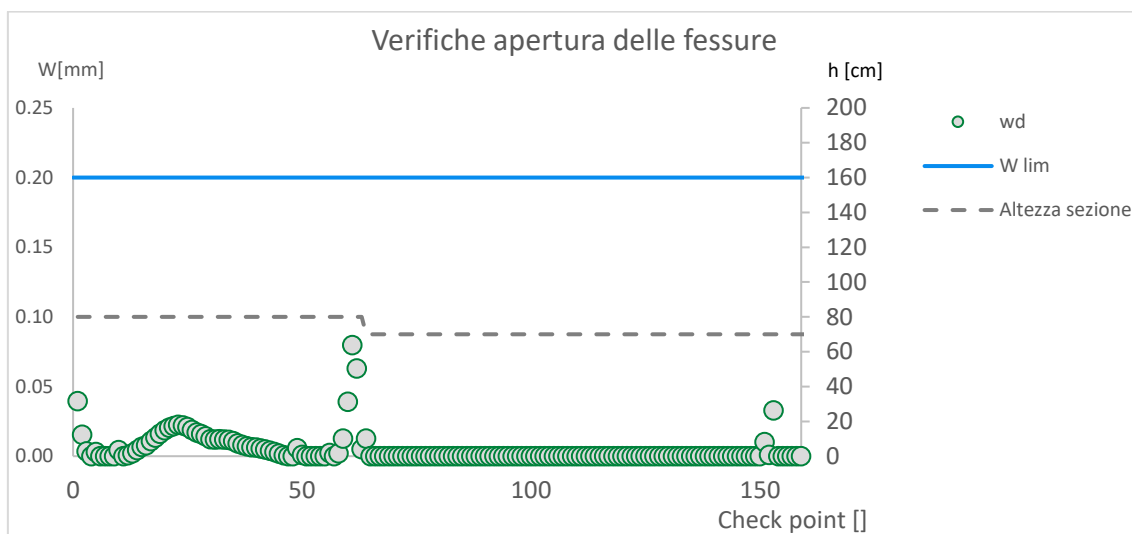
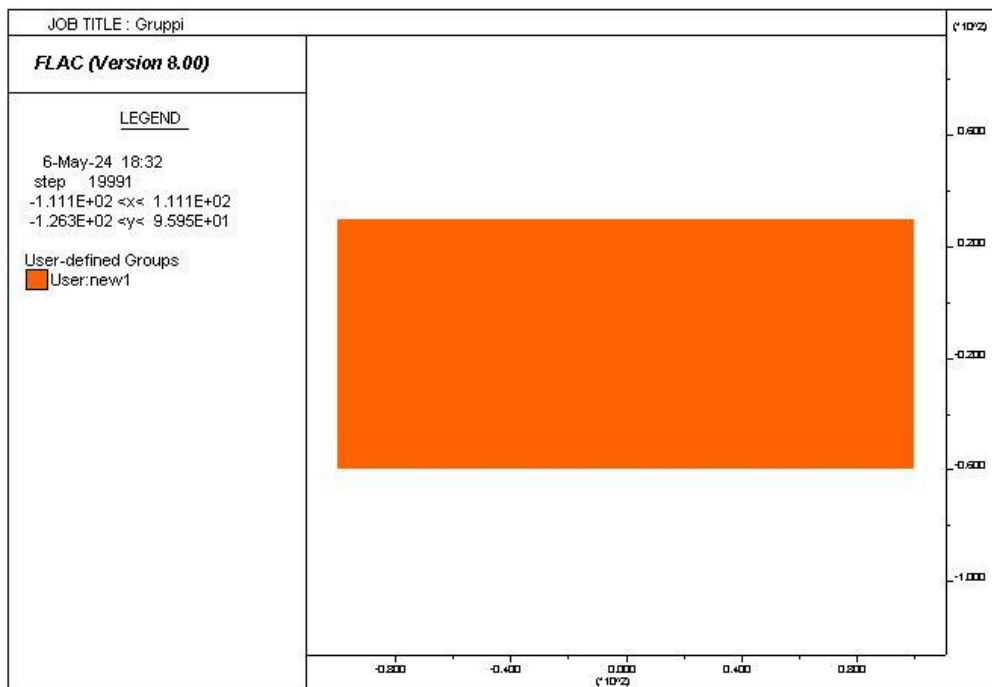
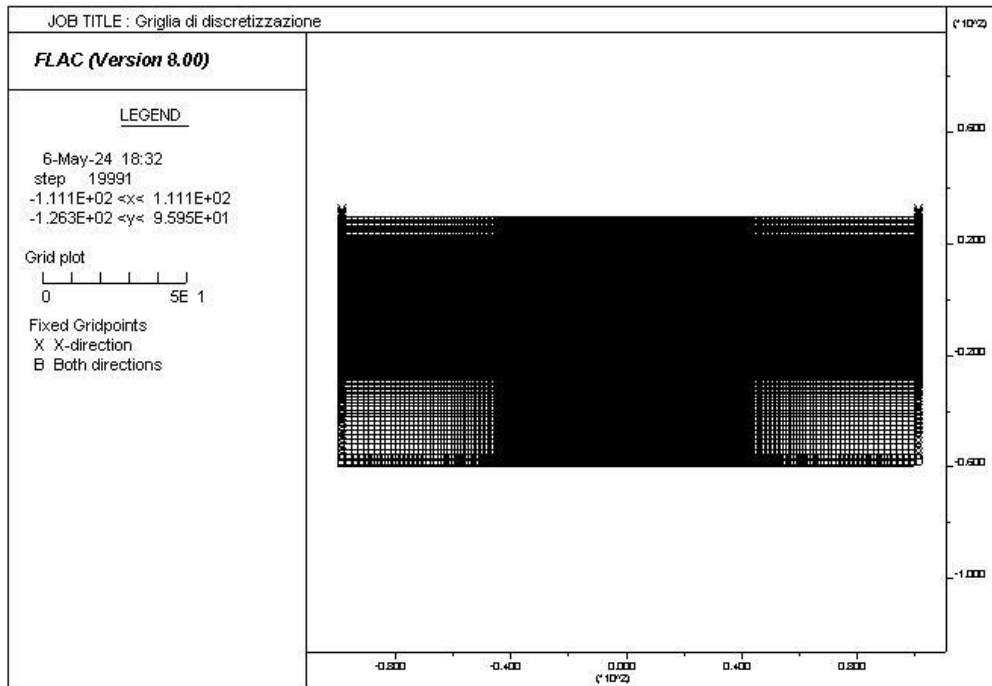


Figura 8-60: Verifiche apertura delle fessure

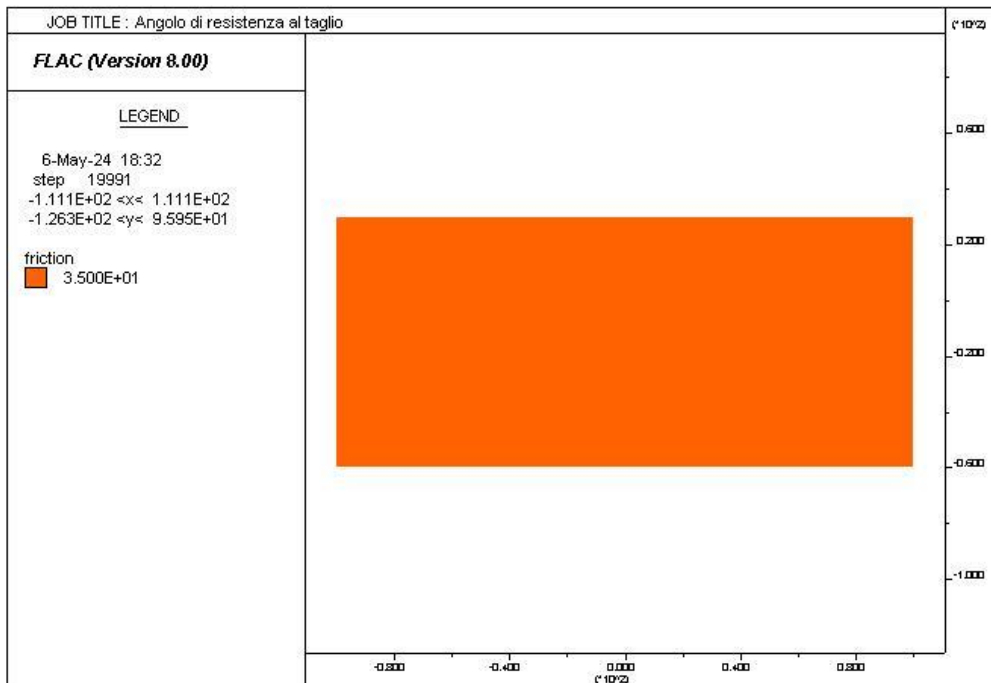
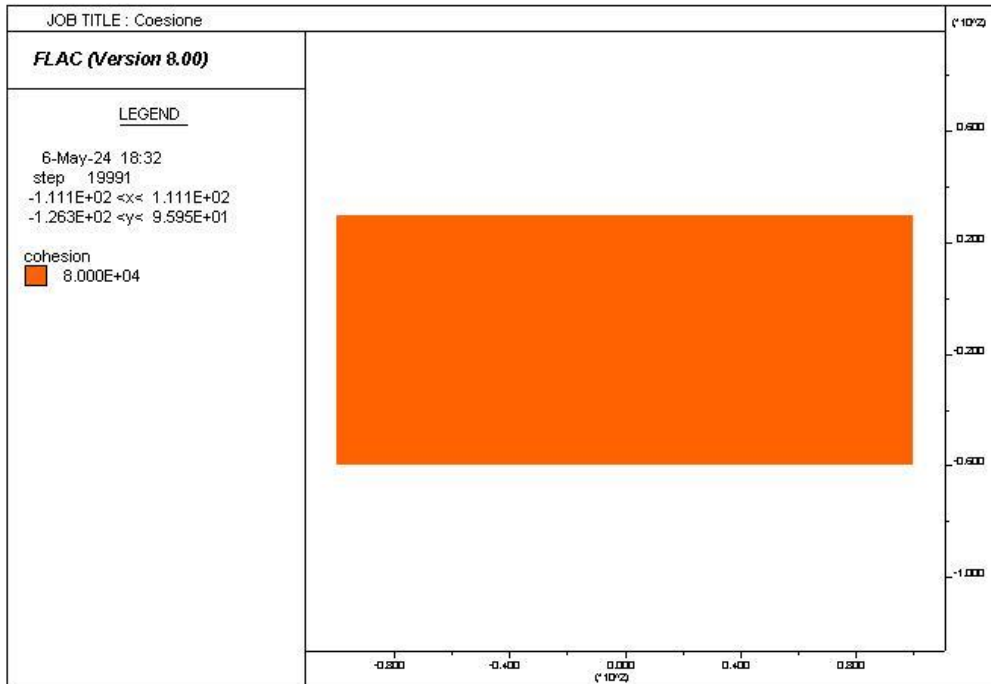
Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

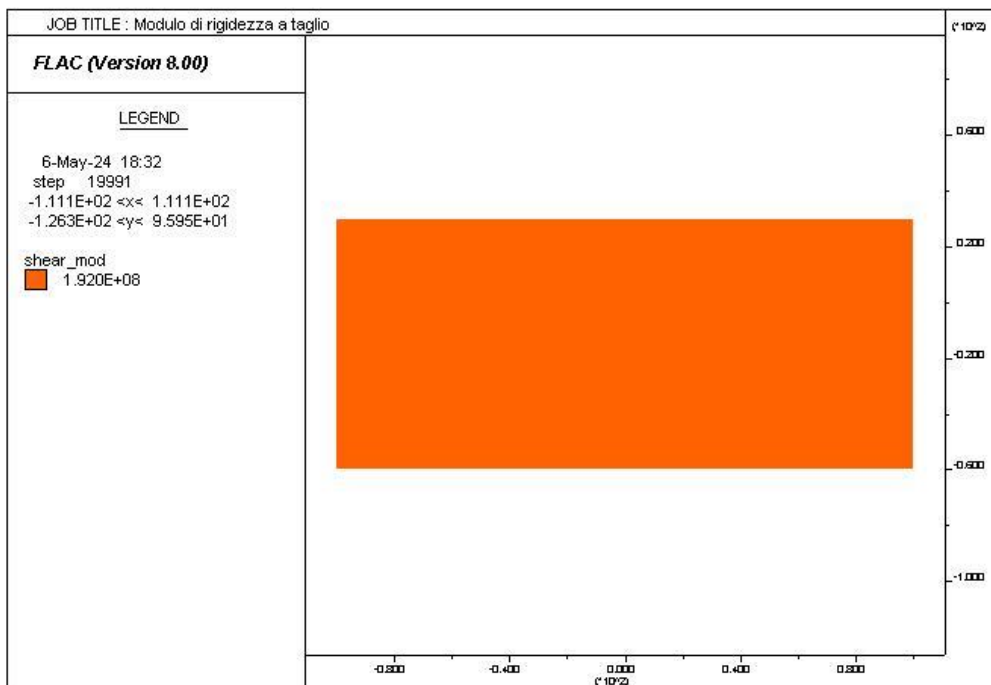
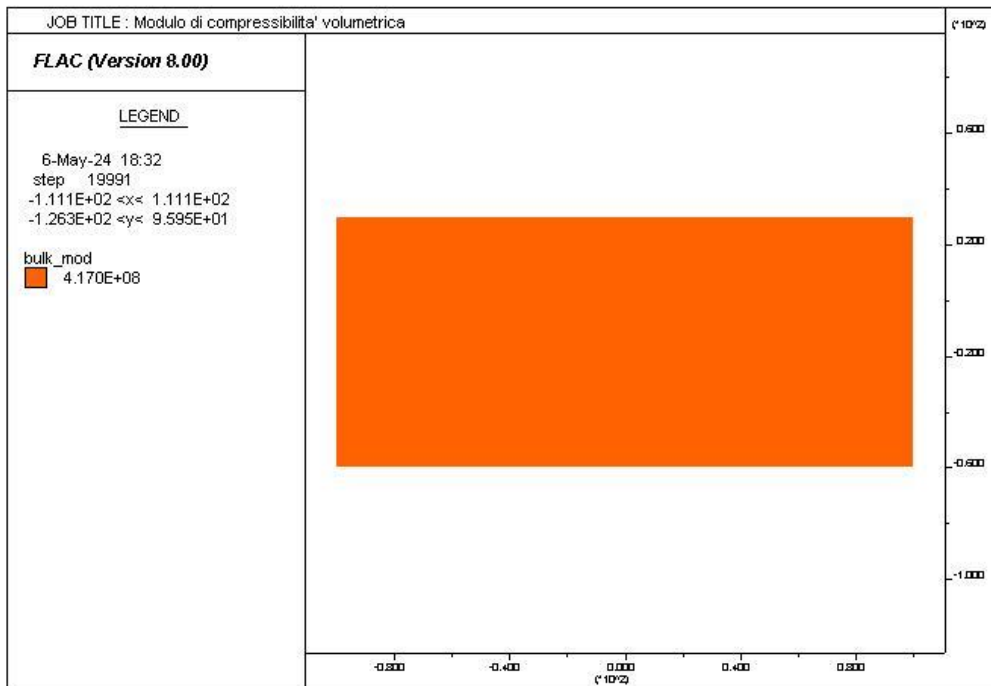
8.7.10 SEZIONE TIPO PZ – SEZ 5



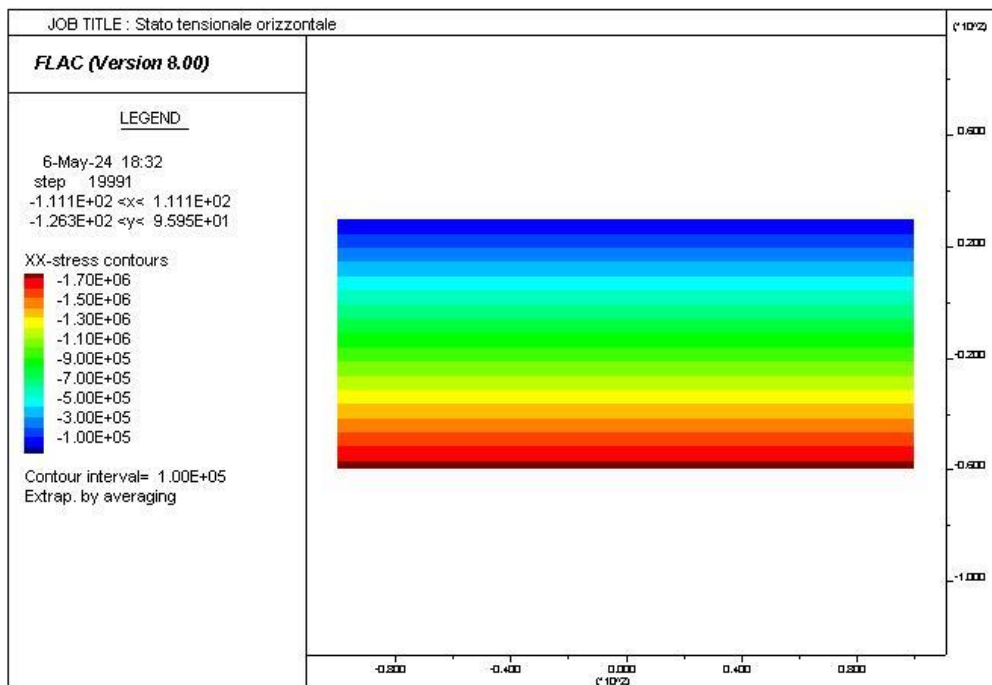
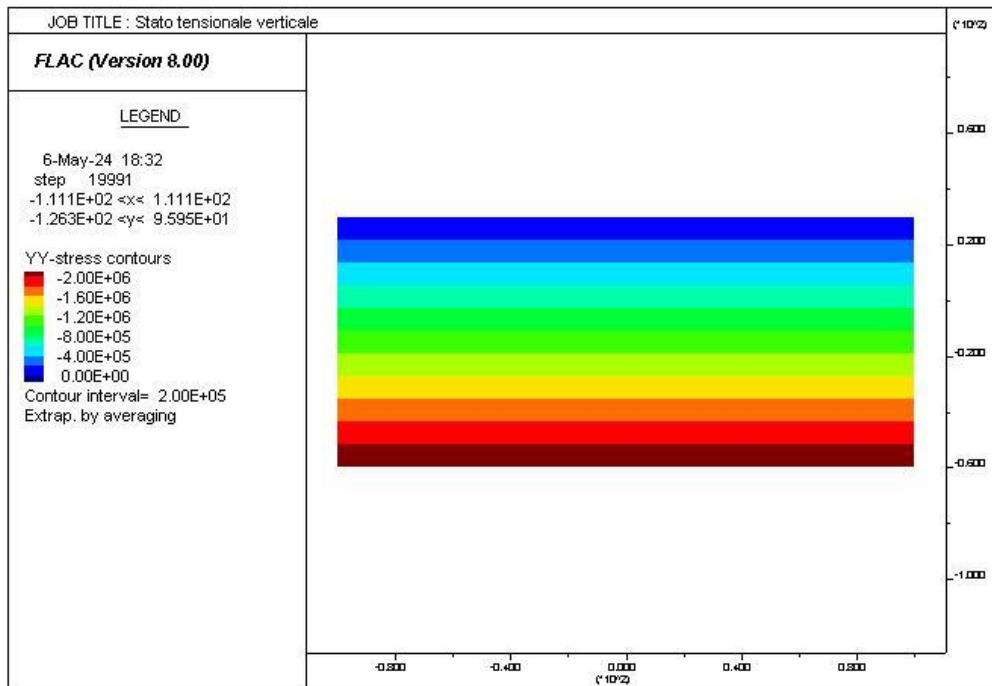
PROGETTAZIONE ATI:



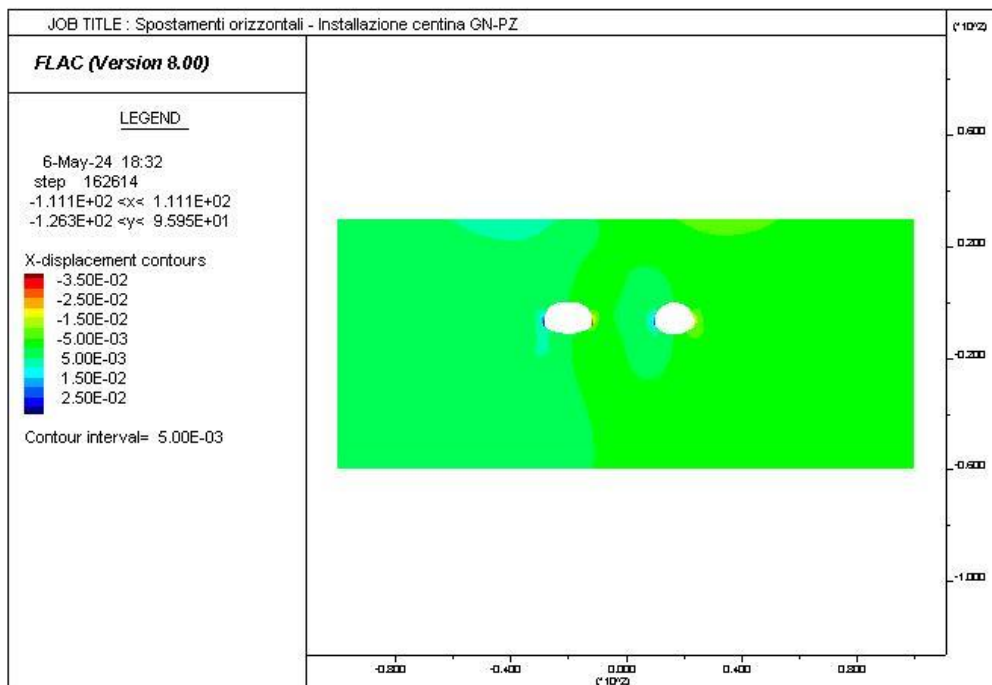
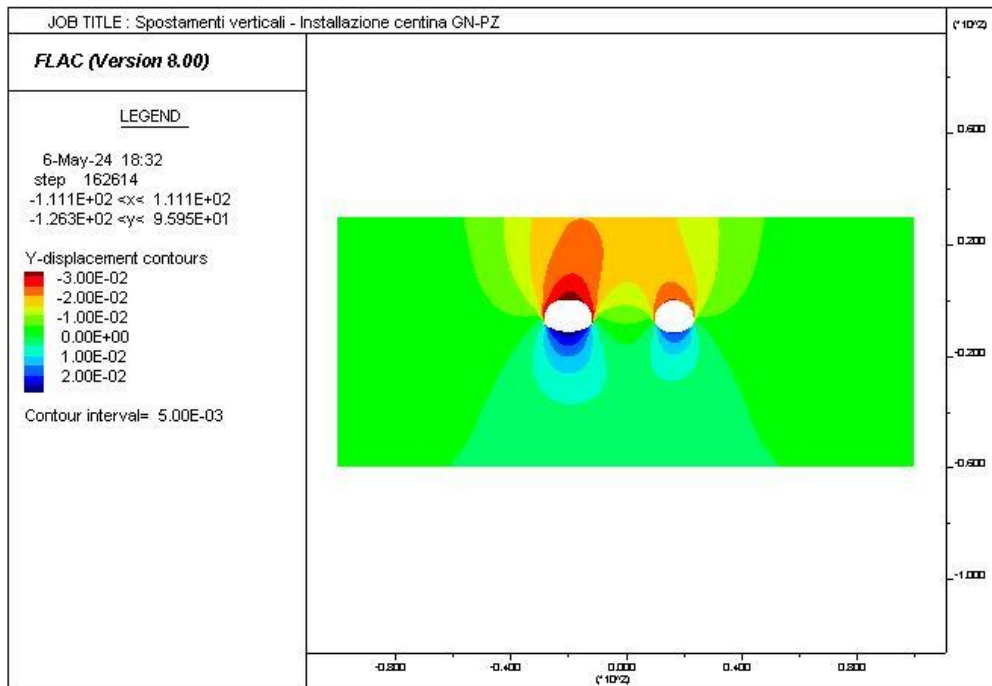
PROGETTAZIONE ATI:



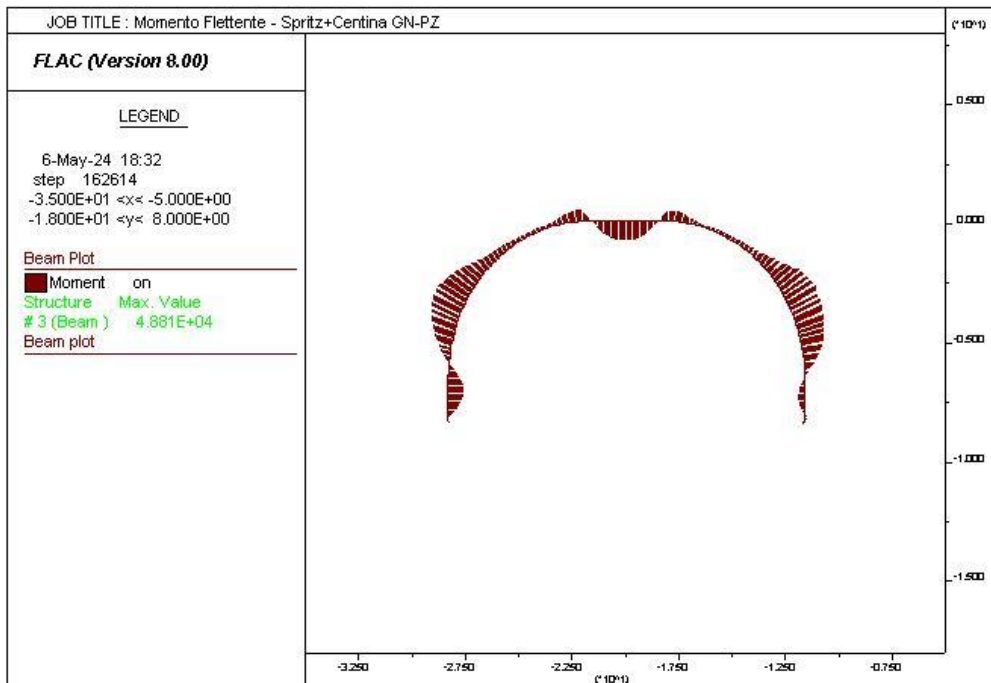
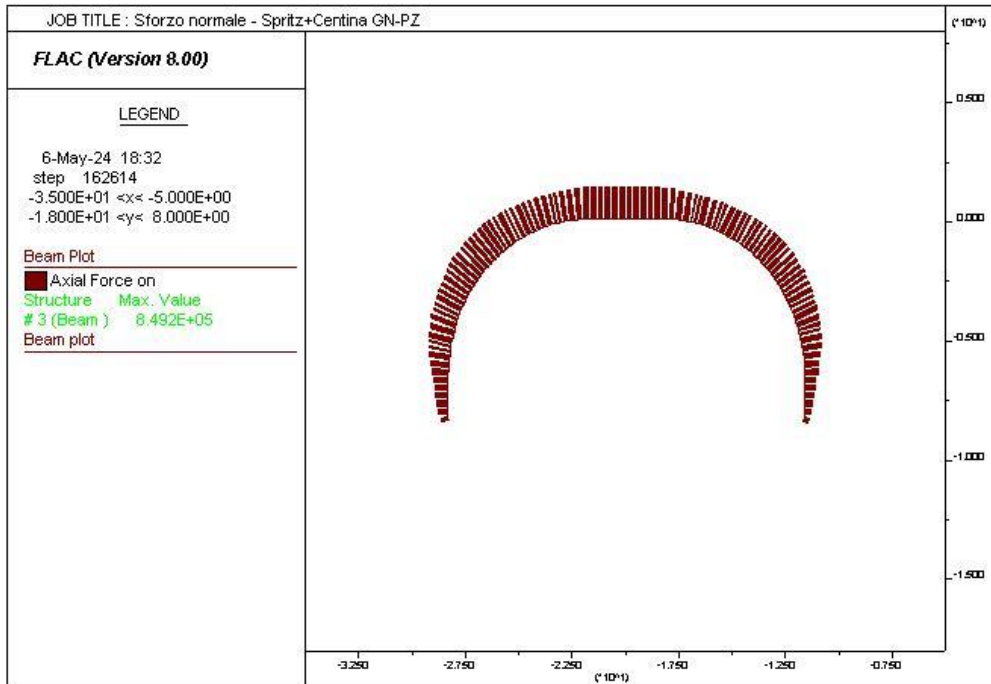
PROGETTAZIONE ATI:



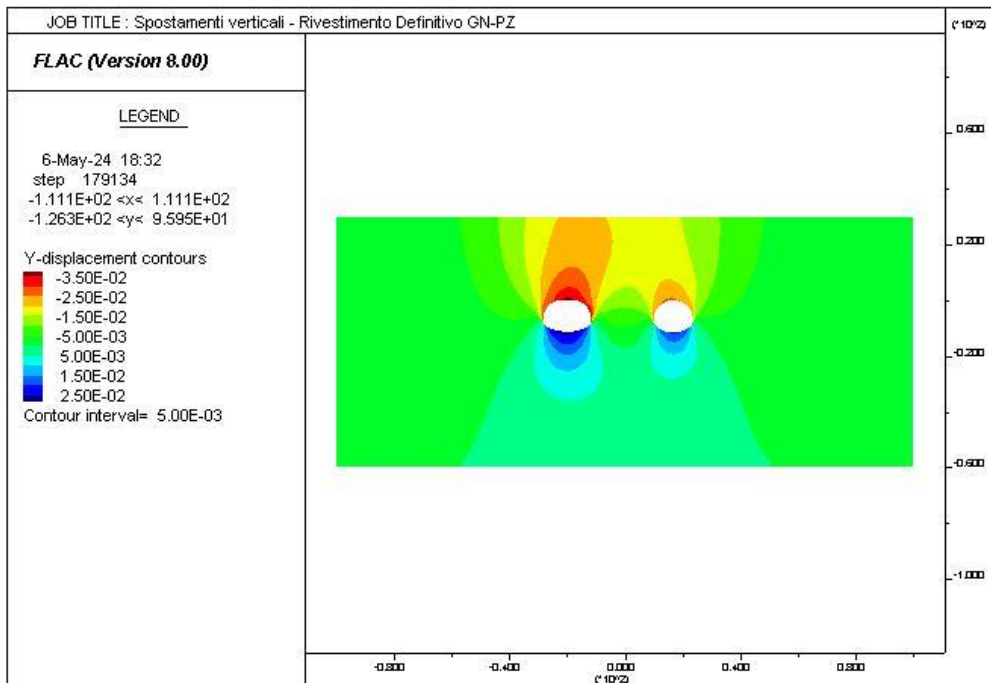
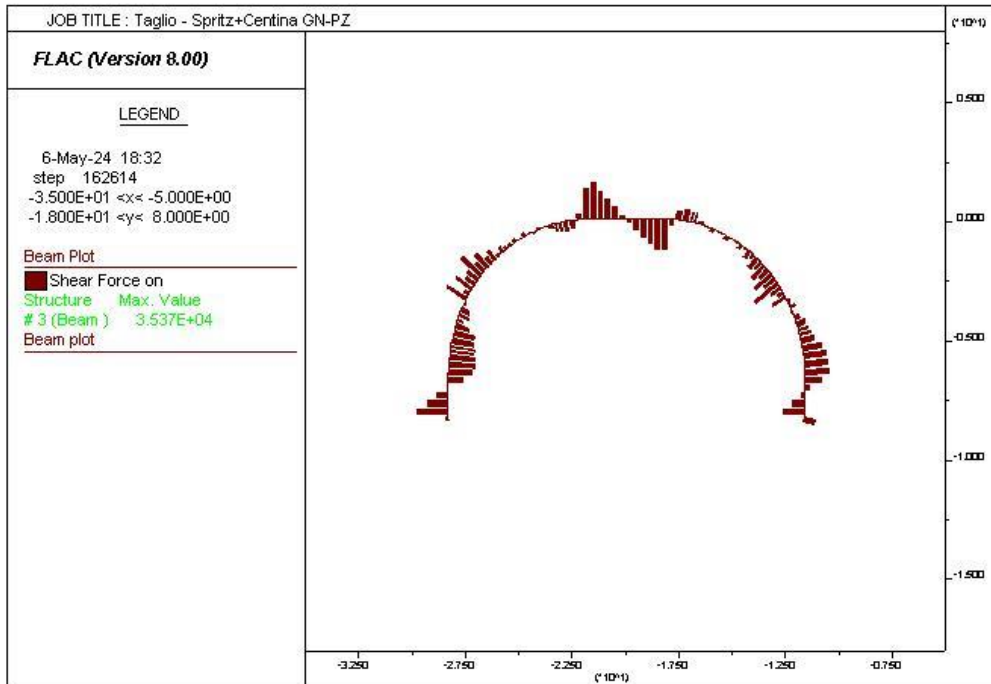
PROGETTAZIONE ATI:



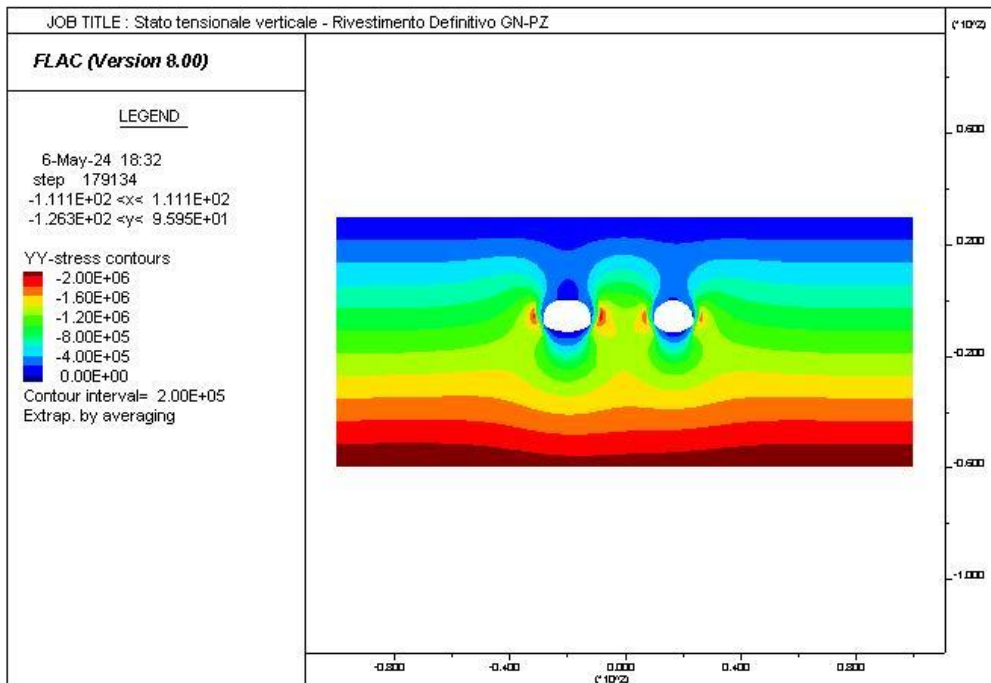
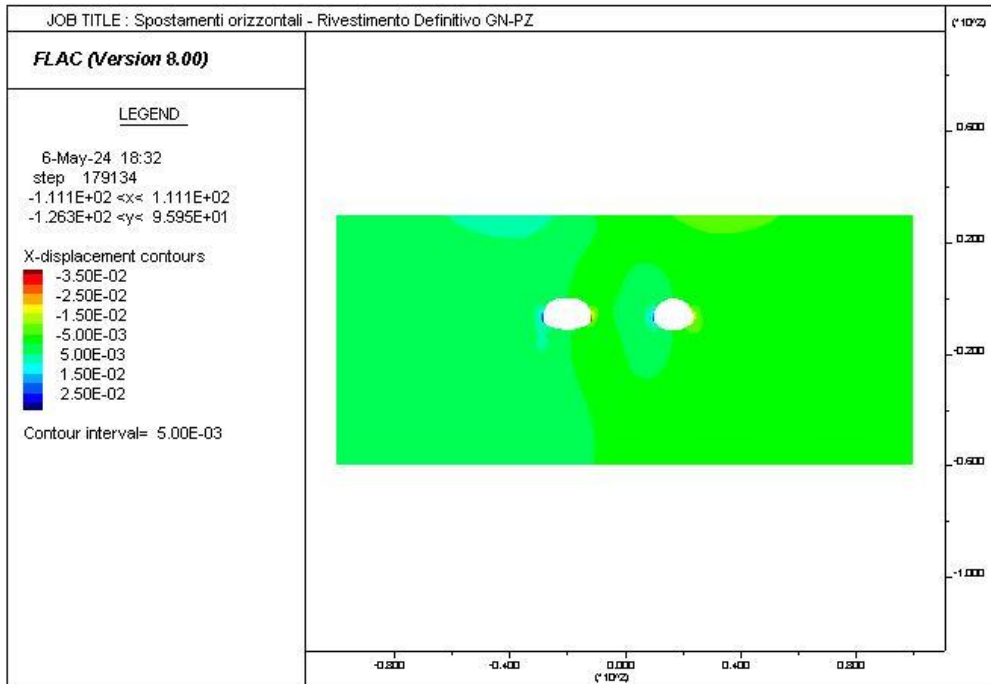
PROGETTAZIONE ATI:



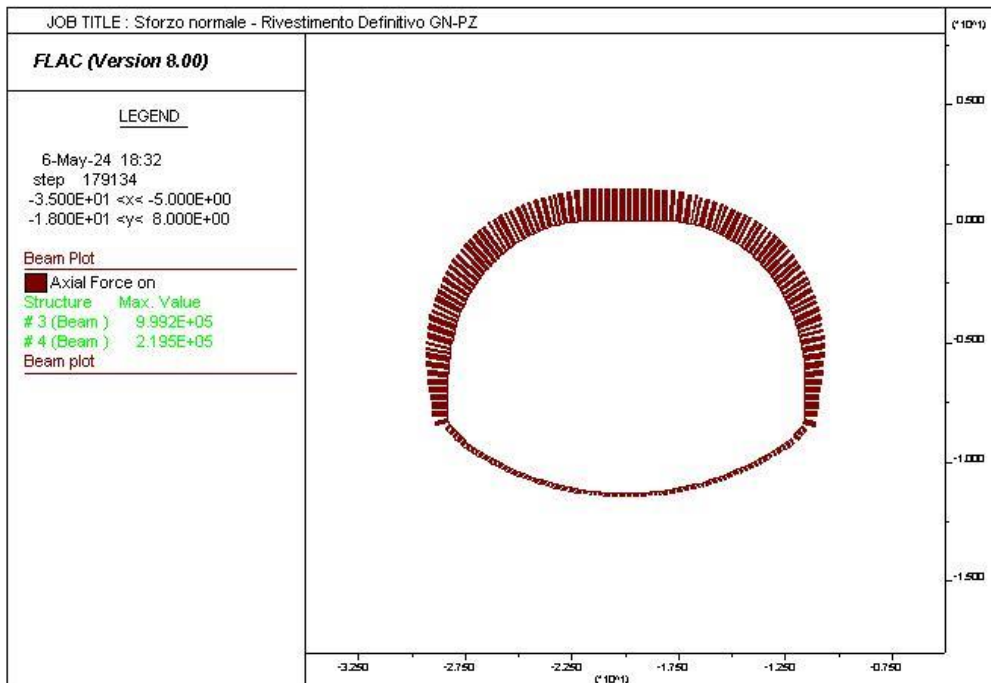
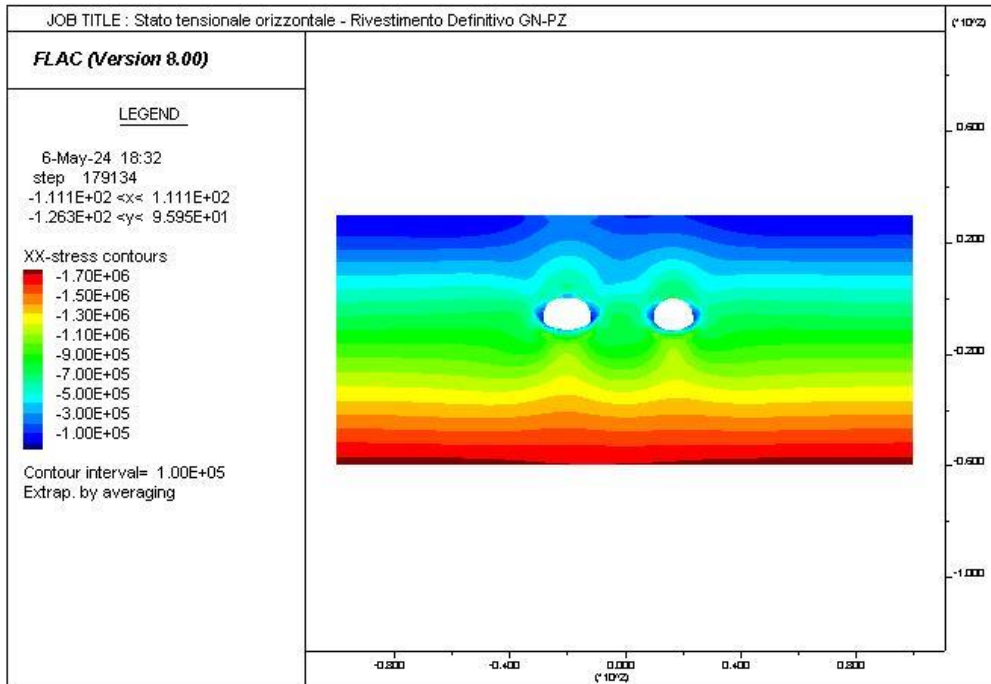
PROGETTAZIONE ATI:



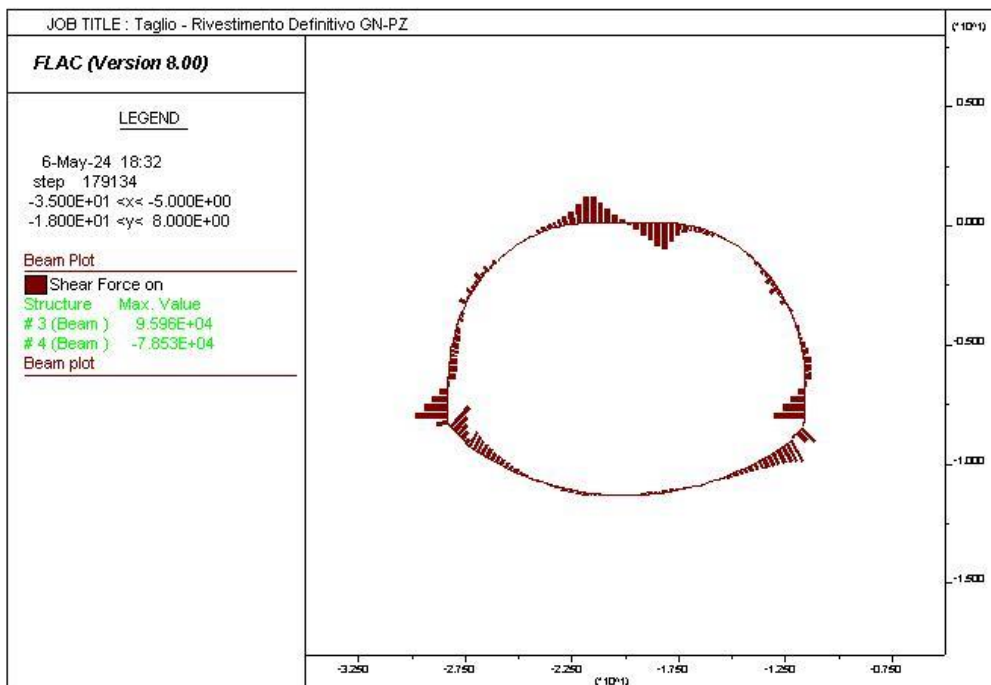
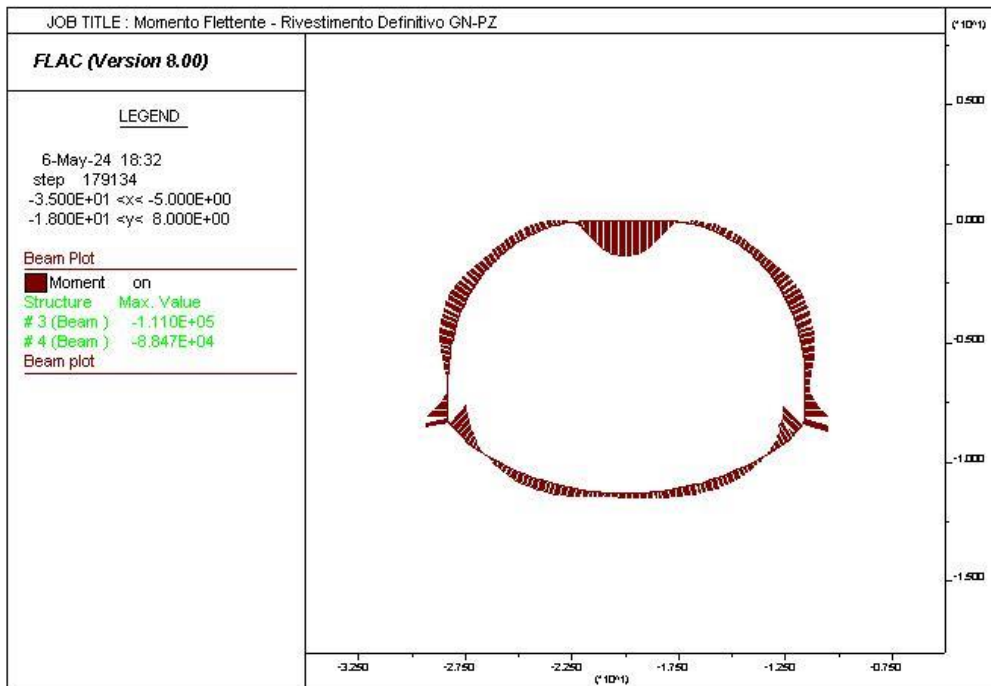
PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



8.7.10.2 Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine

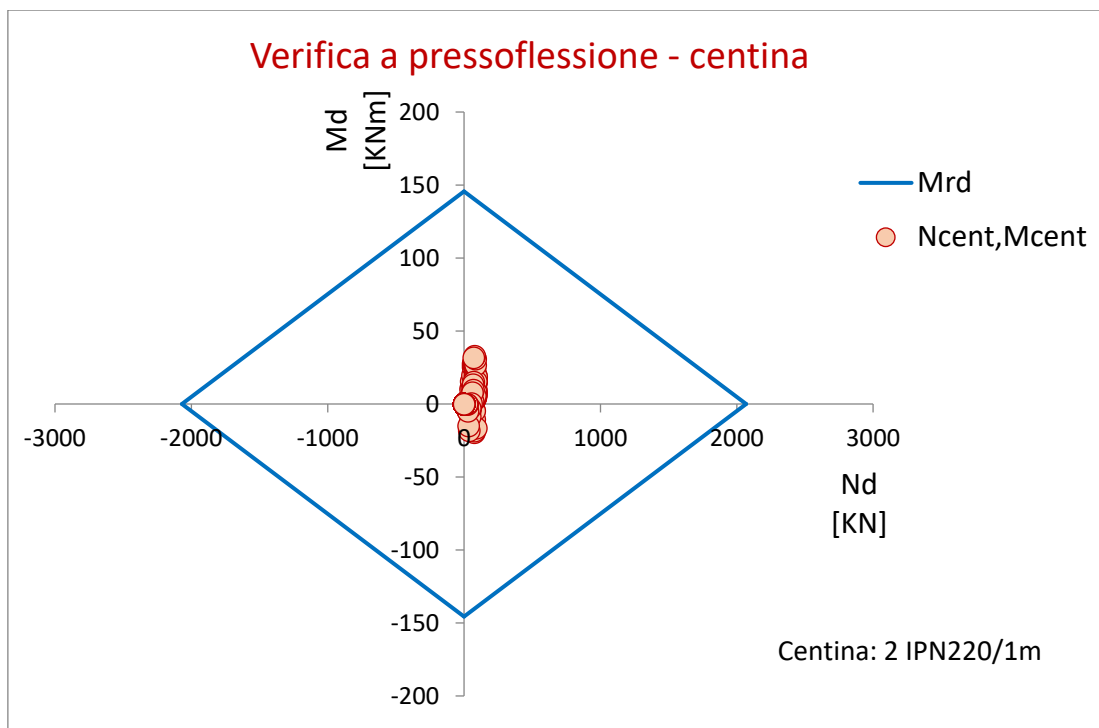


Figura 8-61: Dominio M-N (centina)

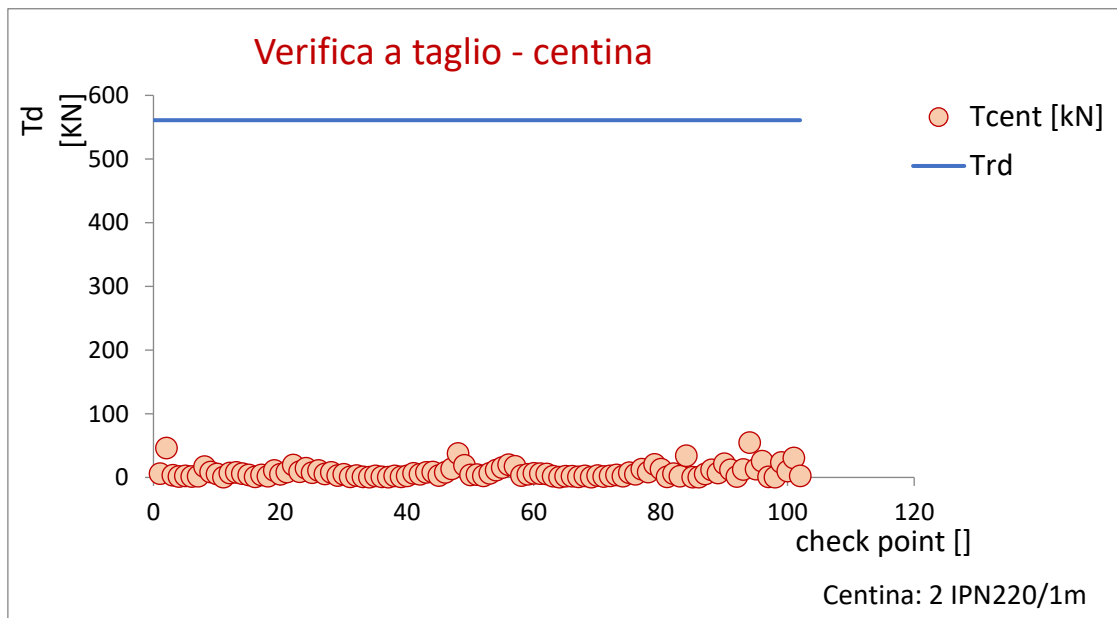


Figura 8-62: Verifica a taglio (centina)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.10.3 Verifiche SLU rivestimento provvisorio

Verifica a pressoflessione - centine+spritz

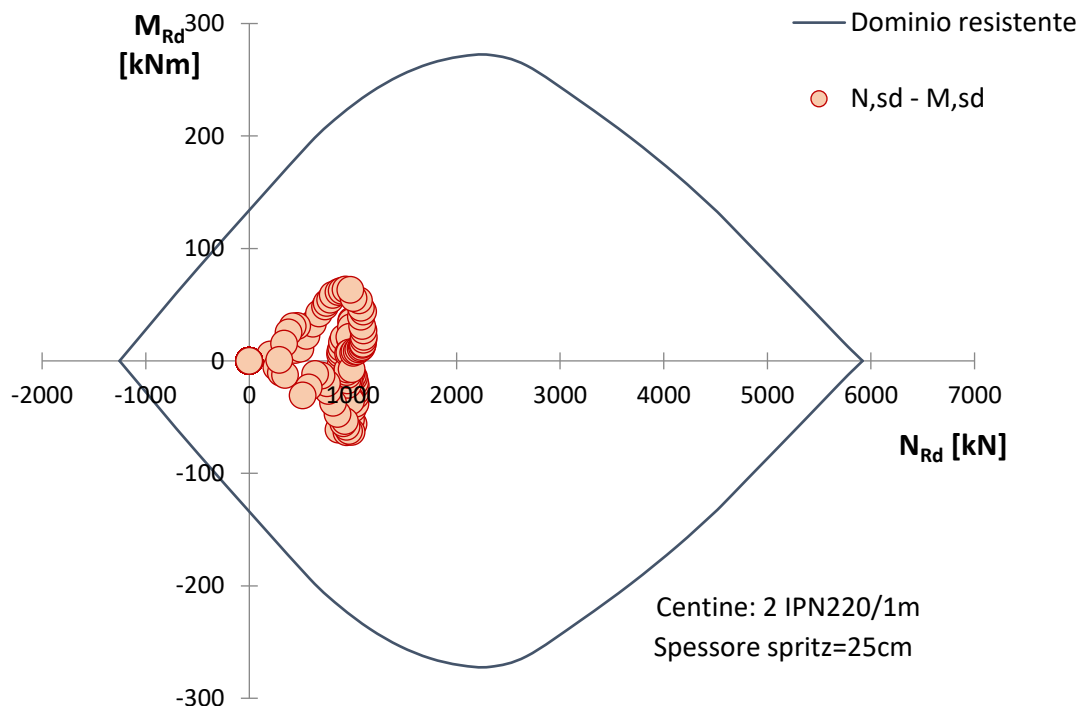


Figura 8-63: Dominio M-N (centina+spritz)

Verifica a taglio (solo centine)	
T_res	561 KN
T_soll	46 KN
Esito	Soddisfatta

Figura 8-64: Verifica a taglio (centina+spritz)

Le verifiche risultano soddisfatte.

8.7.10.5 Verifiche SLU rivestimento definitivo

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

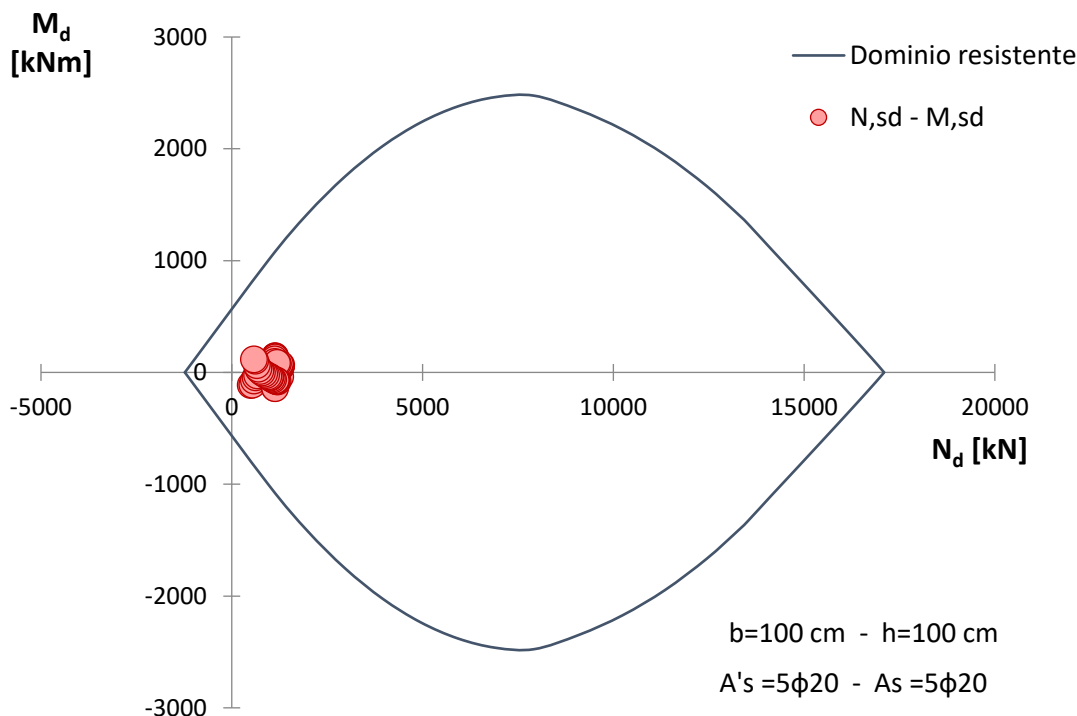


Figura 8-65: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
	Taglio agente	$V_{Ed} = 124.748\text{ kN}$	
Altezza della sezione	$h = 1000\text{ mm}$		
Copriferro della sezione	$\delta = 50\text{ mm}$		
Altezza utile della sezione	$d = 950\text{ mm}$		
Diametro degli spilli	$d_w = 12\text{ mm}$		
Numero di braccia	$n_w = 2.5$		$n^\circ\text{ spilli/m (direzione long.)}$
Area totale spilli	$A_{sw} = 282.60\text{ mm}^2$		
Passo degli spilli	$s = 200\text{ mm}$		$\text{passo in direzione trasv.}$
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90\text{ deg}$		
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8\text{ deg}$		$\cot(\theta) = 2.5$
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000\text{ mm}$		$1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5$ $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$		
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 1181.9\text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$	
Resistenza di calcolo a "taglio-compresione"	$V_{Rcd} = 2911.9\text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$	
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 1181.9\text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$	
Esito della verifica	Soddisfatta		

Figura 8-66: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

Verifica a pressoflessione - arco rovescio

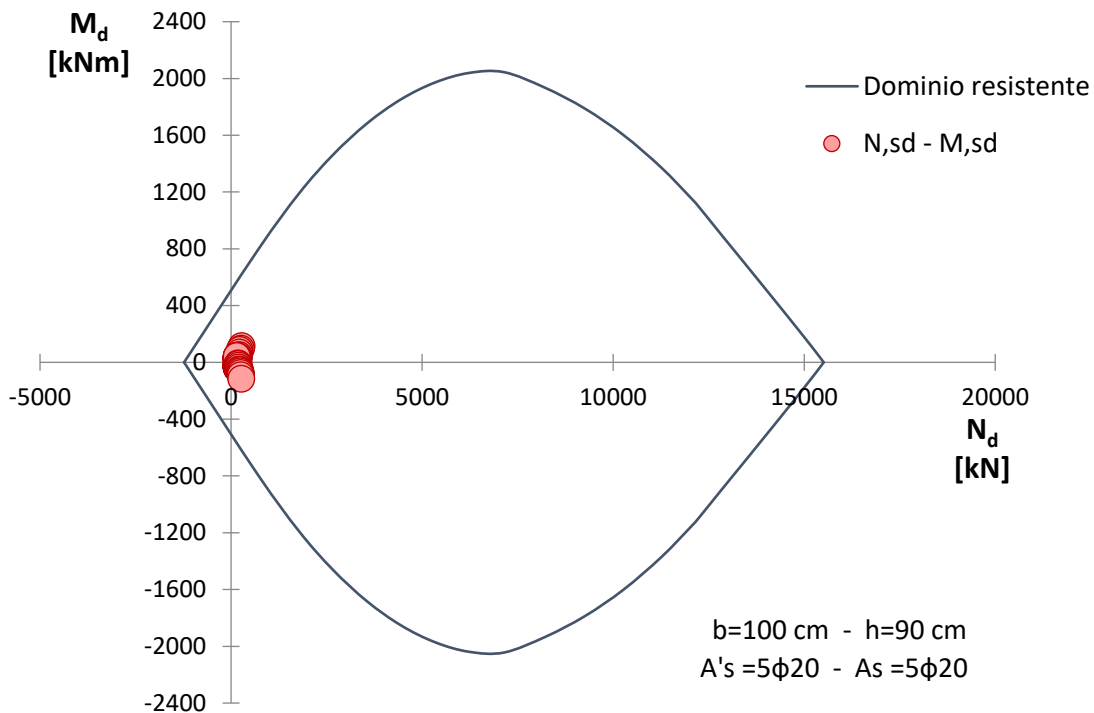


Figura 8-67: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio

Taglio agente		$V_{Ed} = 102.089\text{ kN}$
Altezza della sezione	$h = 900\text{ mm}$	
Copriferro della sezione	$\delta = 50\text{ mm}$	
Altezza utile della sezione	$d = 850\text{ mm}$	
Diametro degli spilli	$d_w = 12\text{ mm}$	
Numero di braccia	$n_w = 2.5$	$\left n^\circ \text{ spilli /m (direzione long.)} \right.$
Area totale spilli	$A_{s,w} = 282.60\text{ mm}^2$	
Passo degli spilli	$s = 200\text{ mm}$	$\left \text{passo in direzione trasv.} \right.$
Inclinazione delle staffe	$\alpha = 90\text{ deg}$	$\left \begin{array}{l} 1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \\ 21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \end{array} \right.$
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta = 21.8\text{ deg}$	
Larghezza minima della sezione	$b_w = 1000\text{ mm}$	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c = 1.2$	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} = 1057.5\text{ kN}$	$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{s,w}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} = 2605.3\text{ kN}$	$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} = 1057.5\text{ kN}$	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica	Soddisfatta	

Figura 8-68: Verifica a taglio (arco rovescio)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.10.6 Verifiche SLE

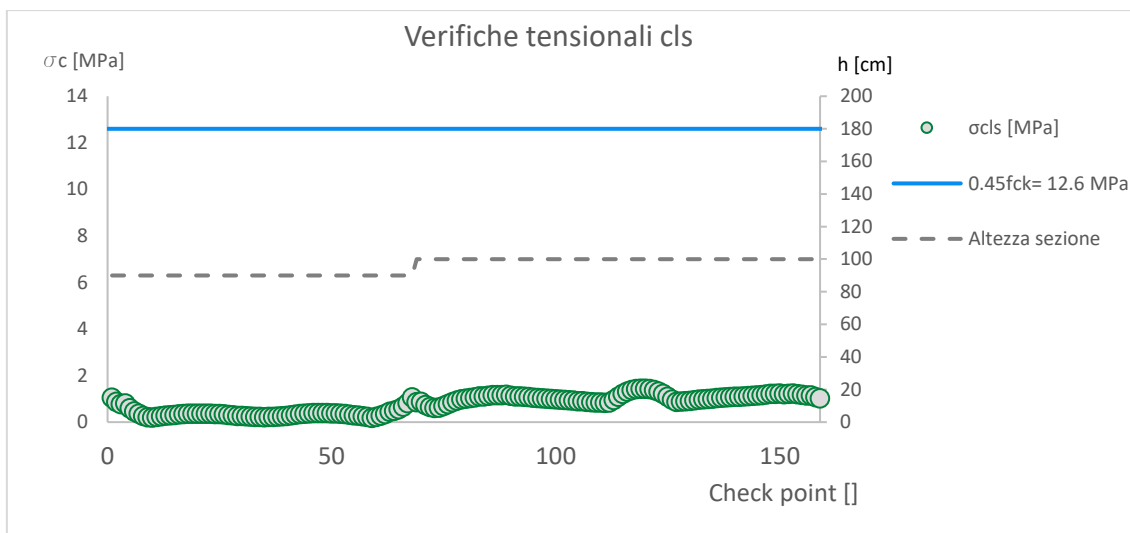


Figura 8-69: Verifiche tensionali cls

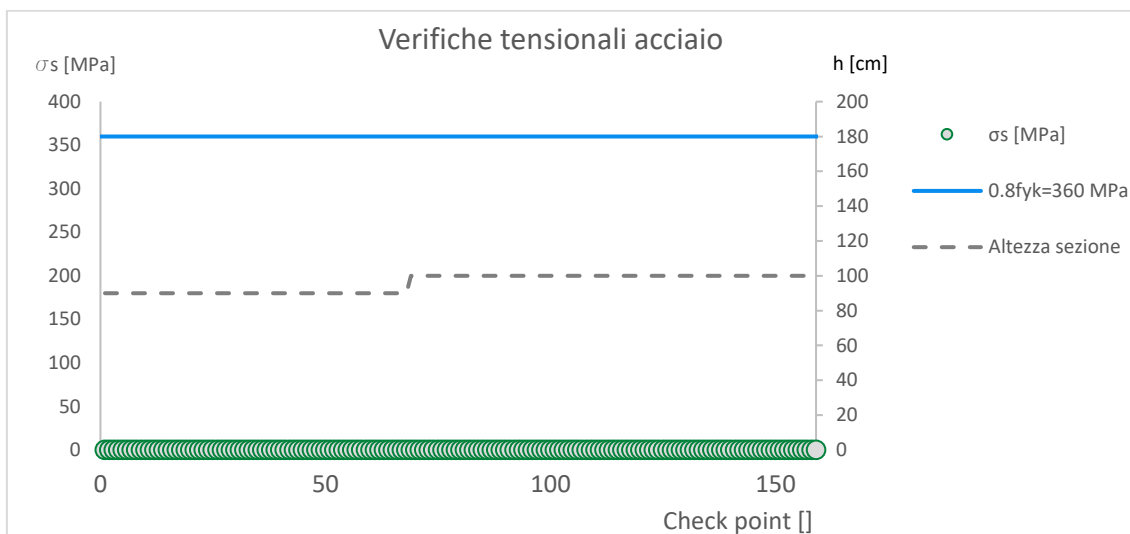


Figura 8-70: Verifiche tensionali acciaio

PROGETTAZIONE ATI:

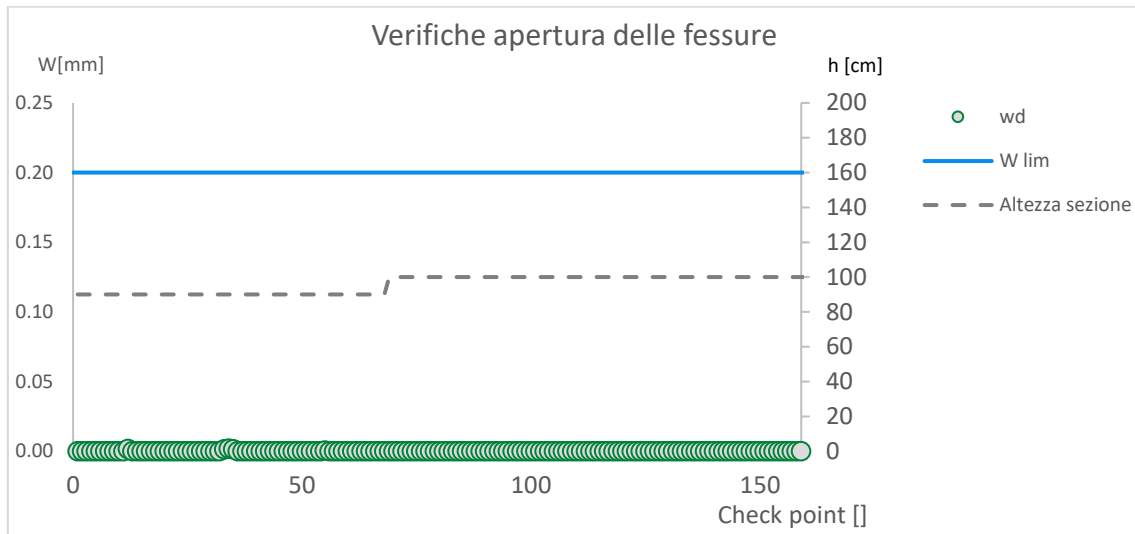


Figura 8-71: Verifiche apertura delle fessure

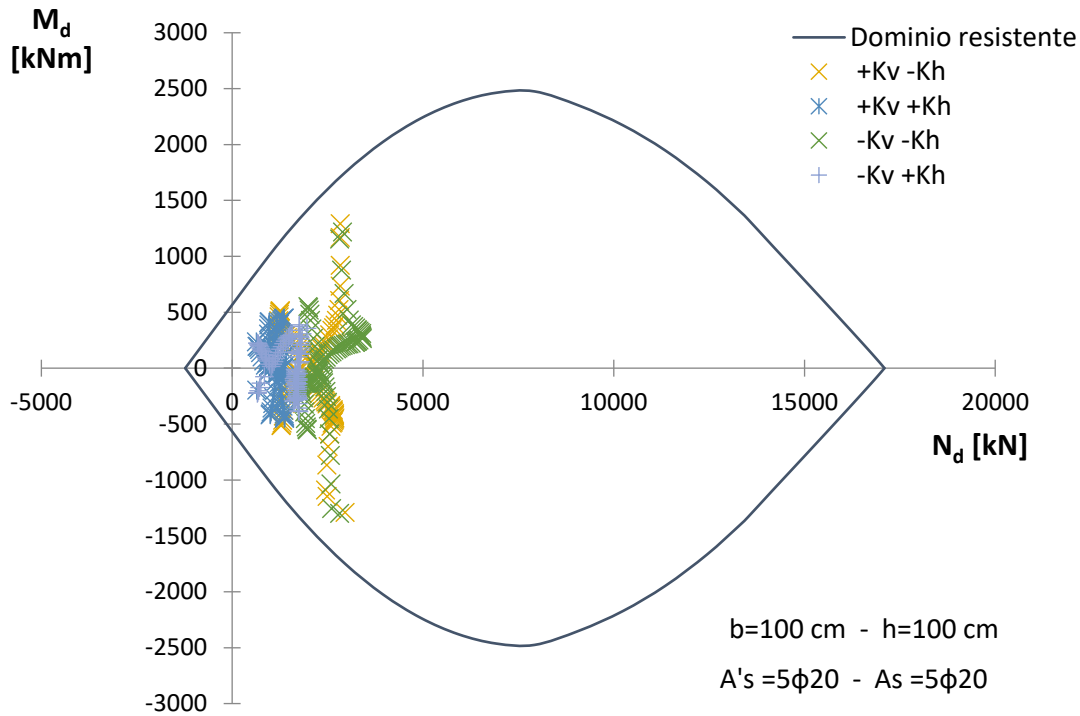
Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

8.7.10.8 Verifiche SLU rivestimento definitivo – Condizioni Sismiche

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

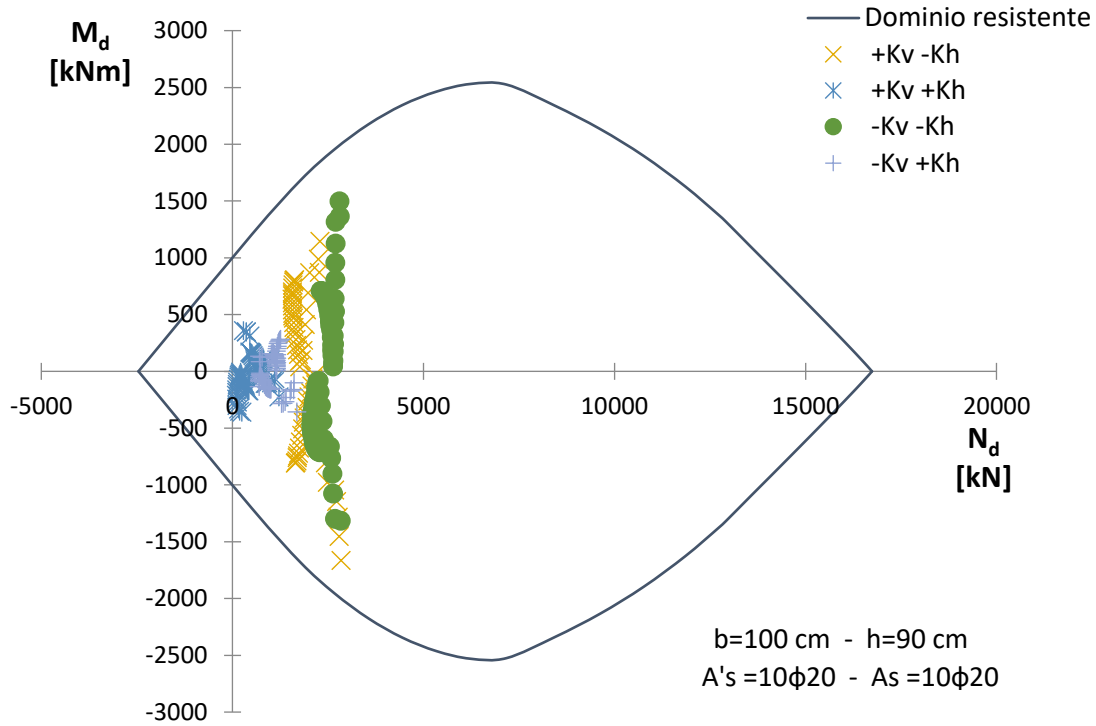


Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

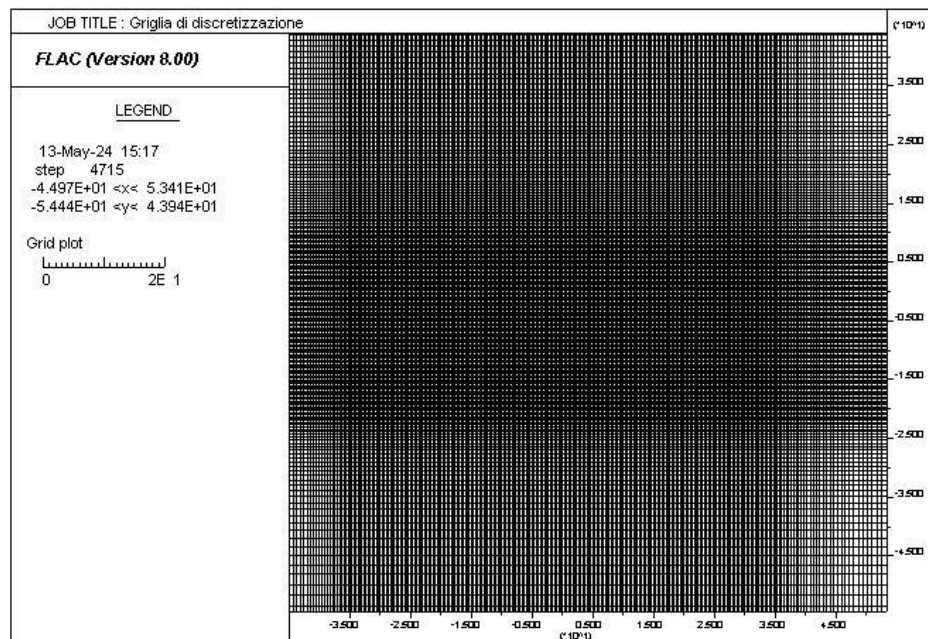
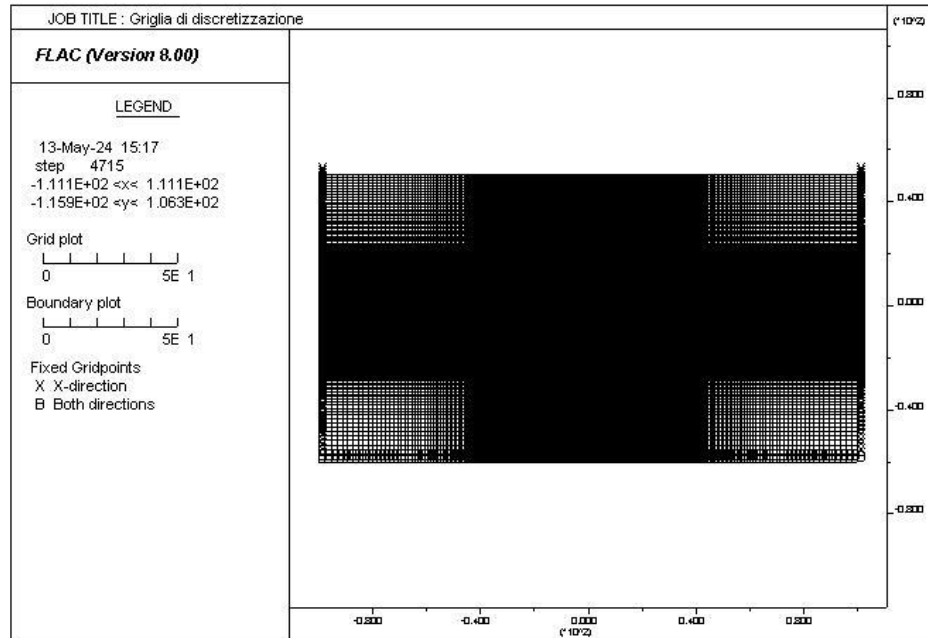
Verifica a pressoflessione - arco rovescio



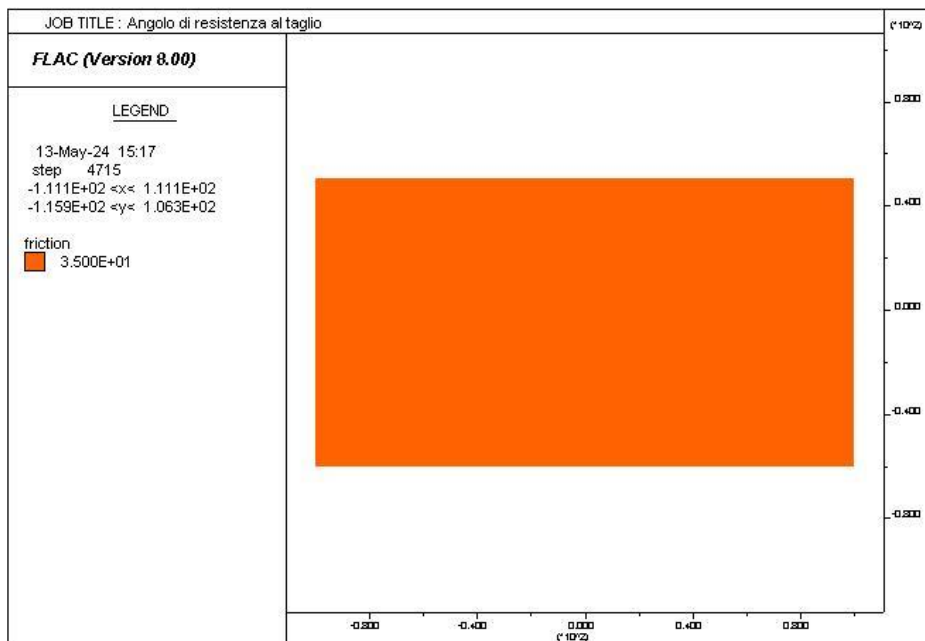
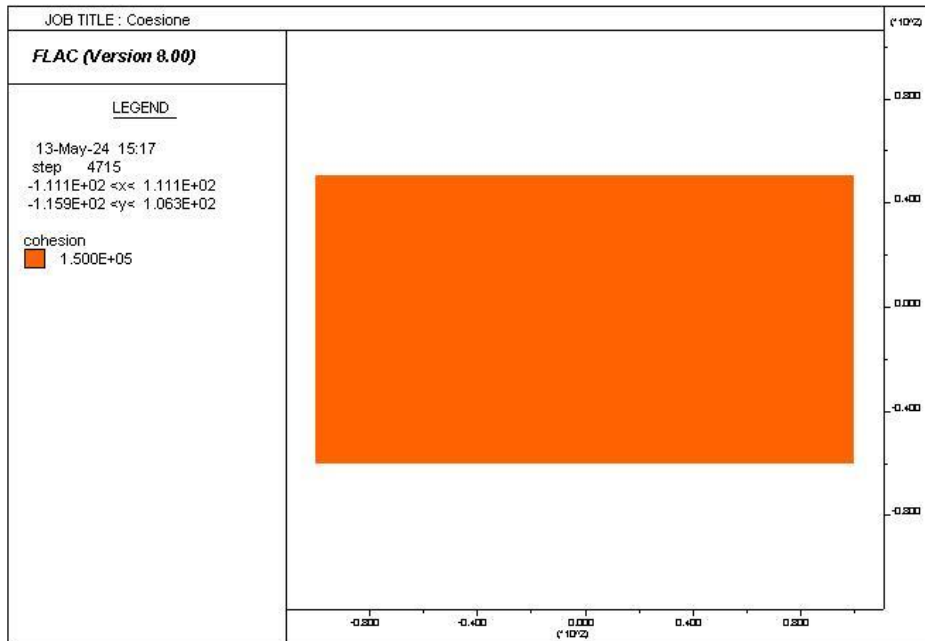
Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

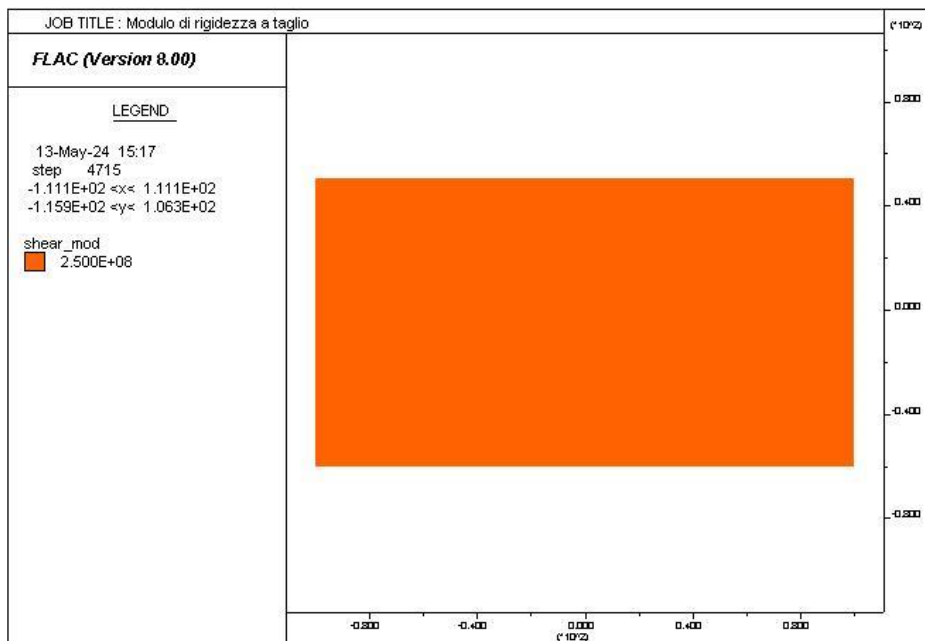
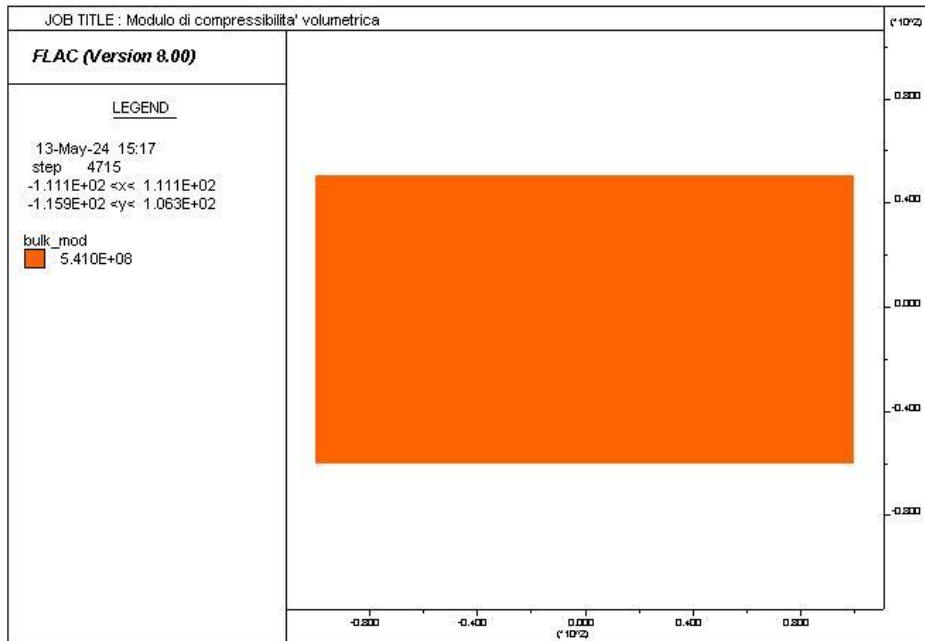
8.7.12 SEZIONE TIPO BY PASS – SEZ 6



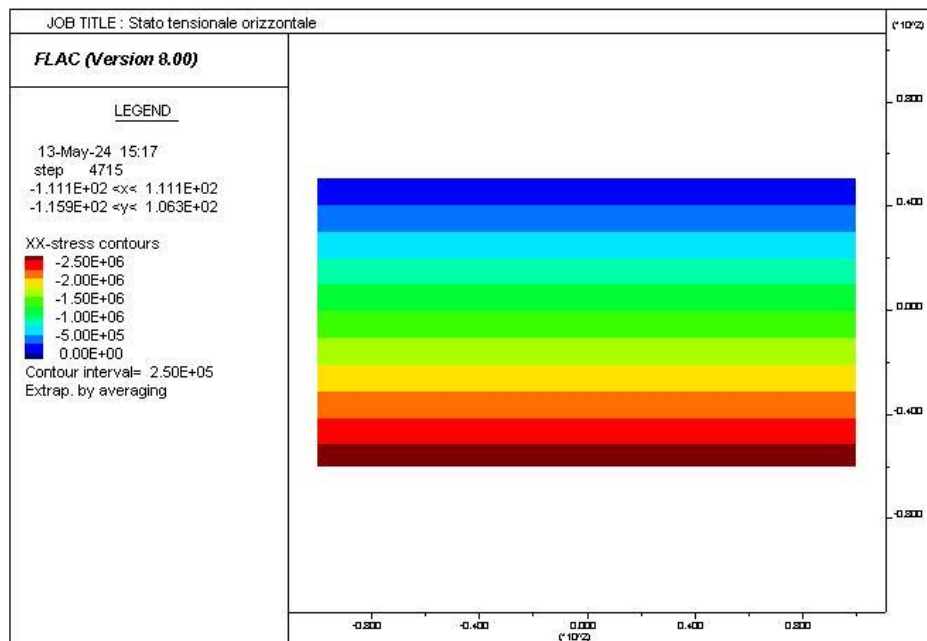
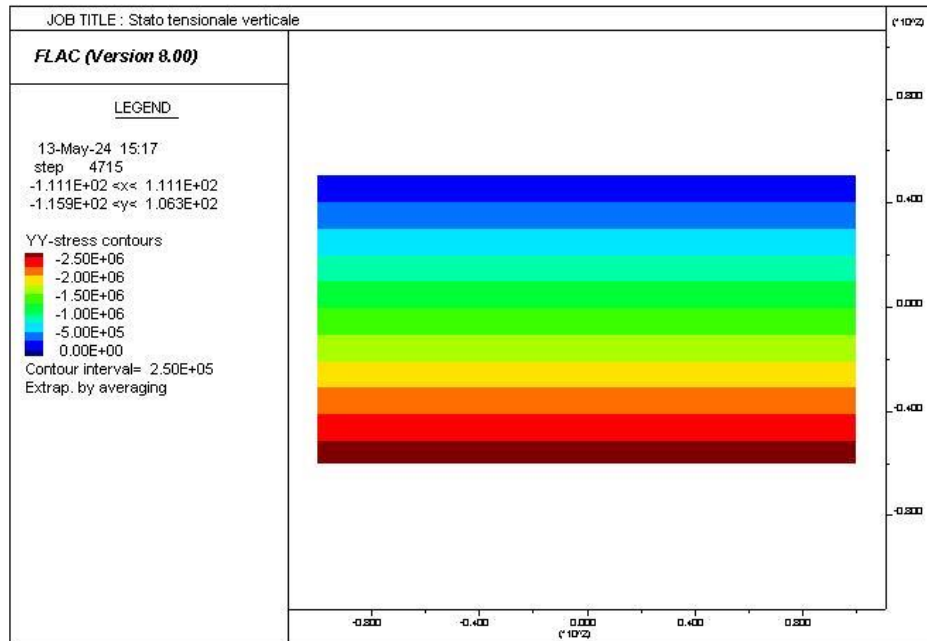
PROGETTAZIONE ATI:



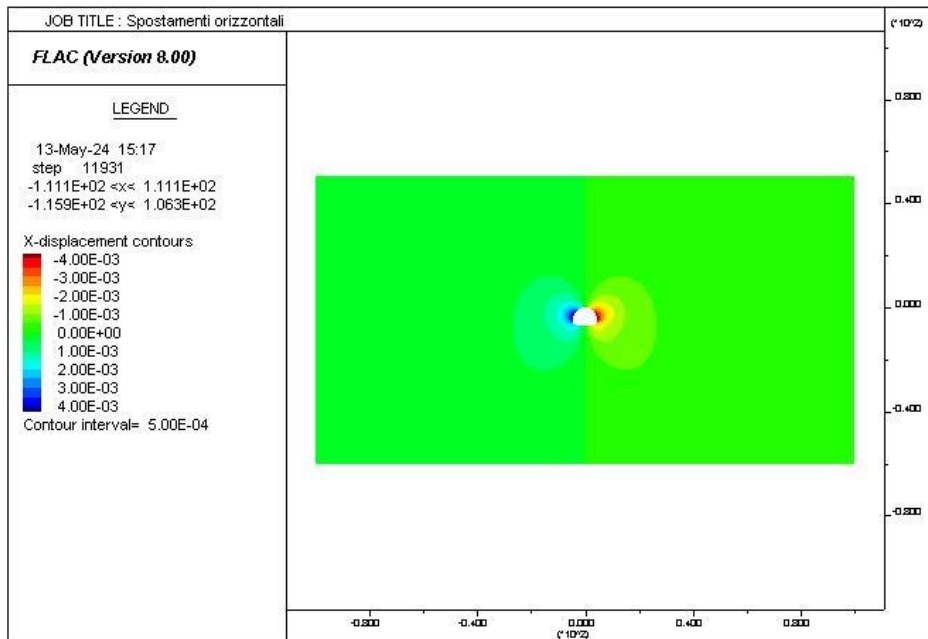
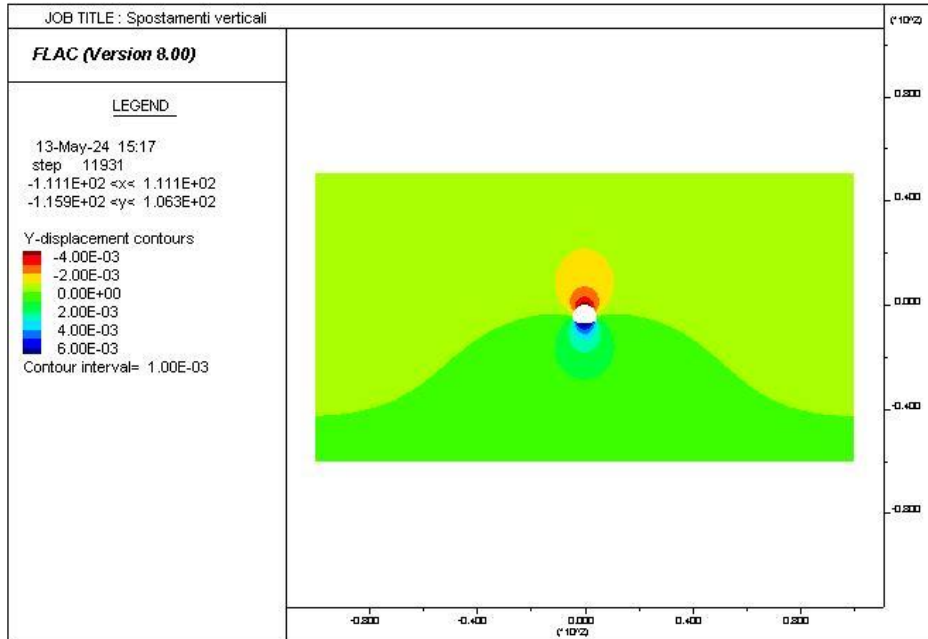
PROGETTAZIONE ATI:



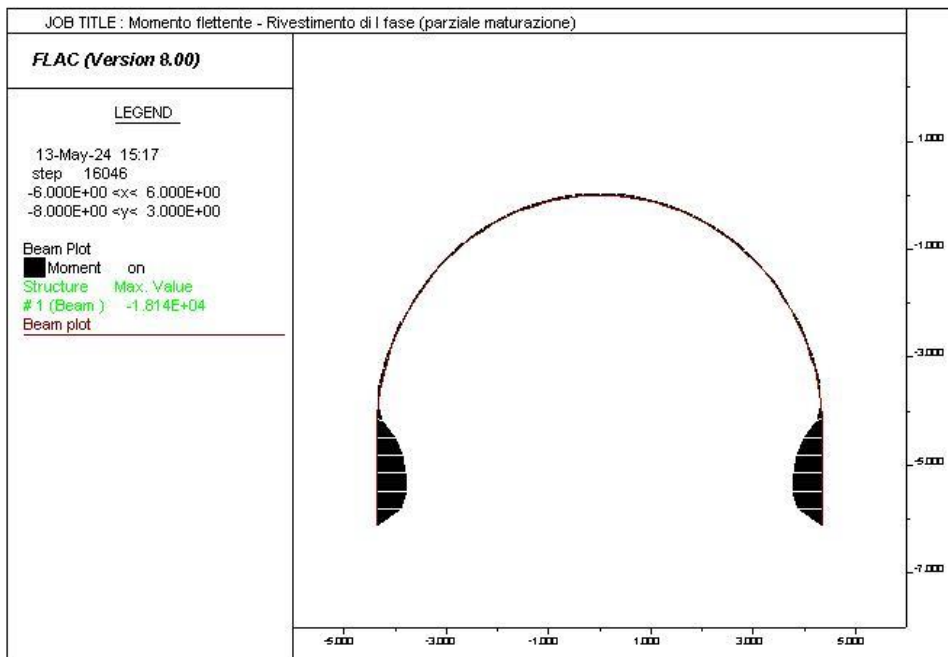
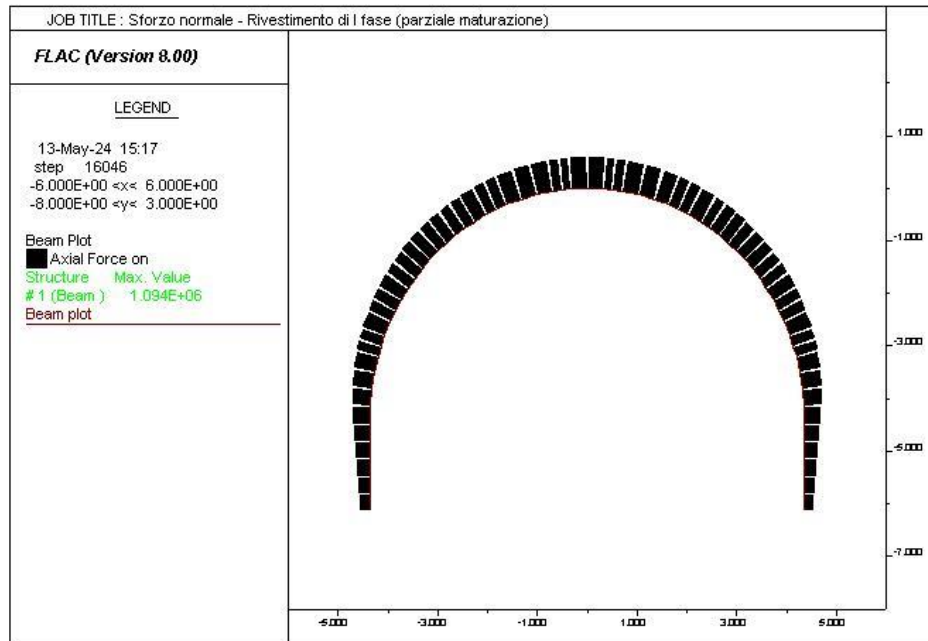
PROGETTAZIONE ATI:



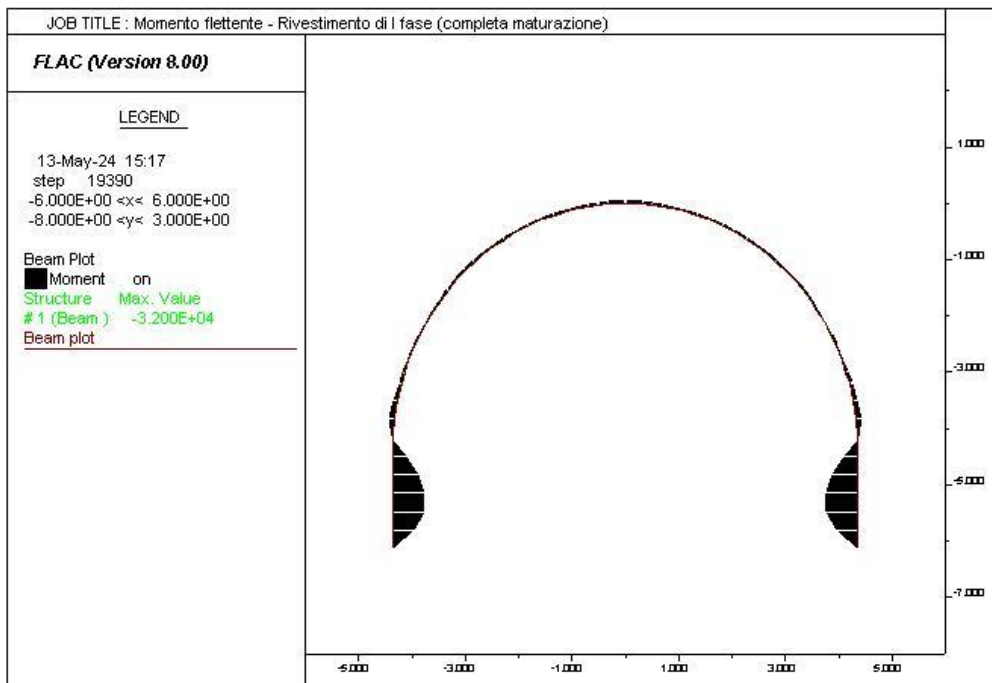
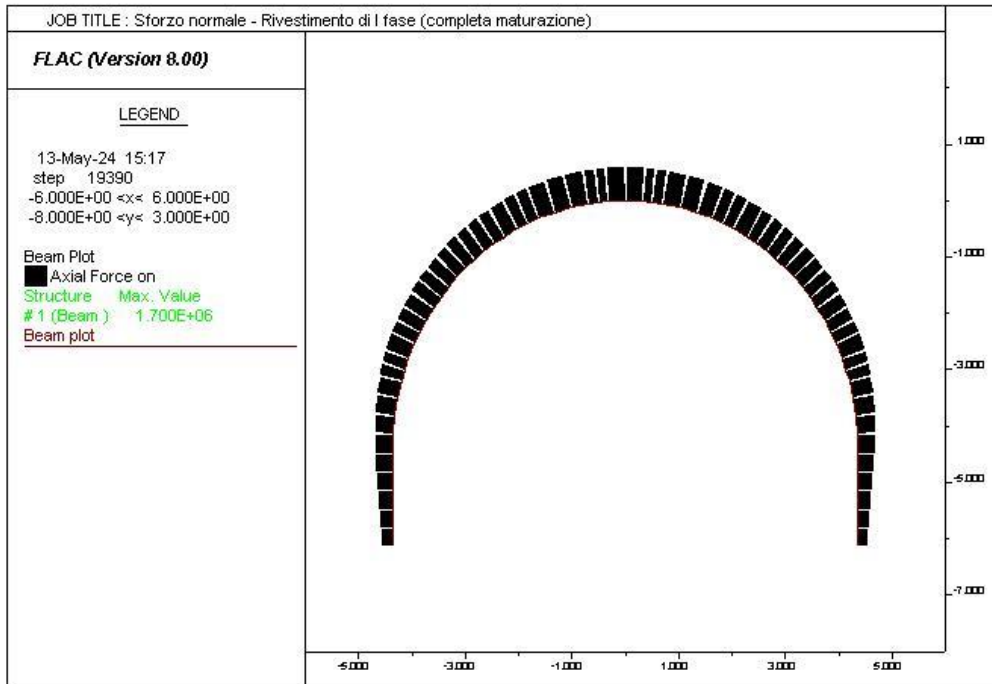
PROGETTAZIONE ATI:



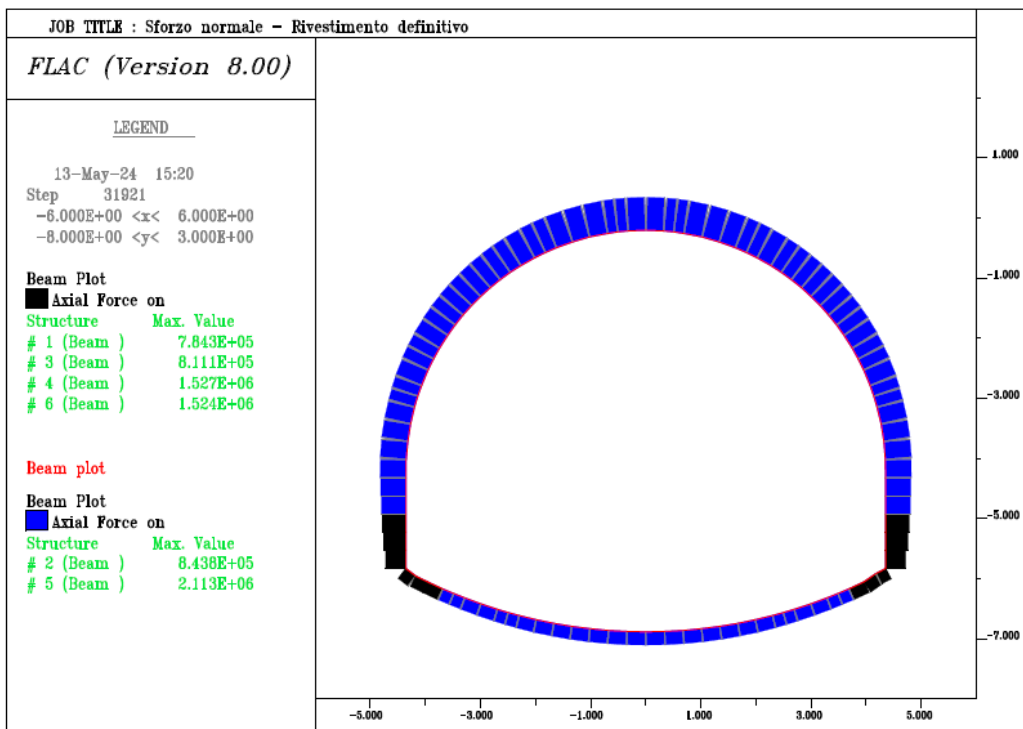
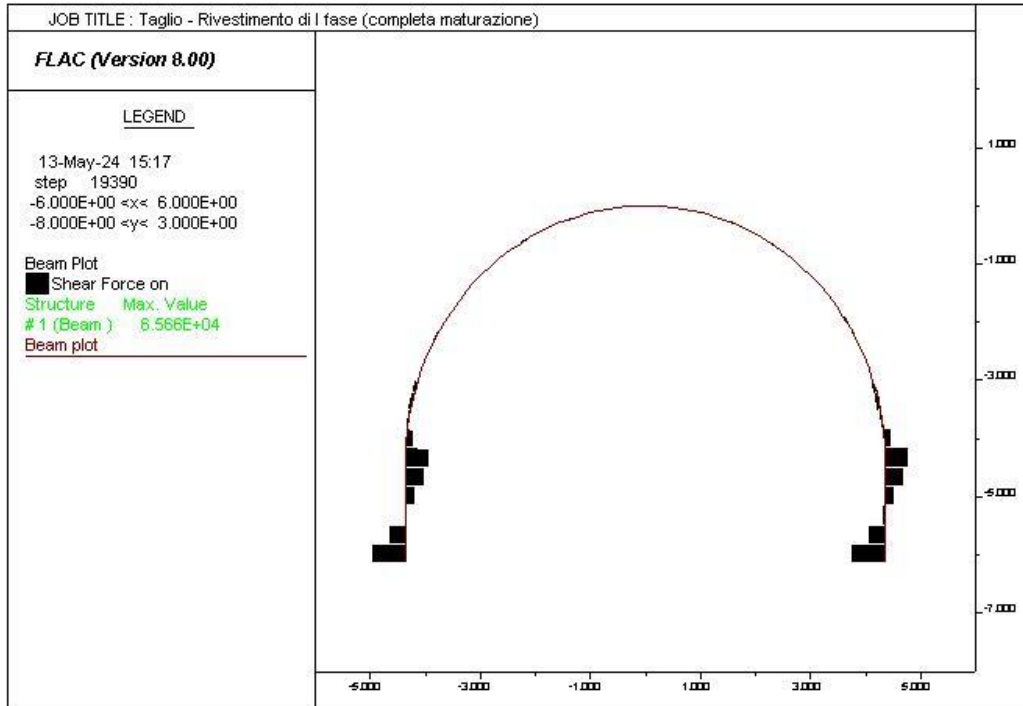
PROGETTAZIONE ATI:



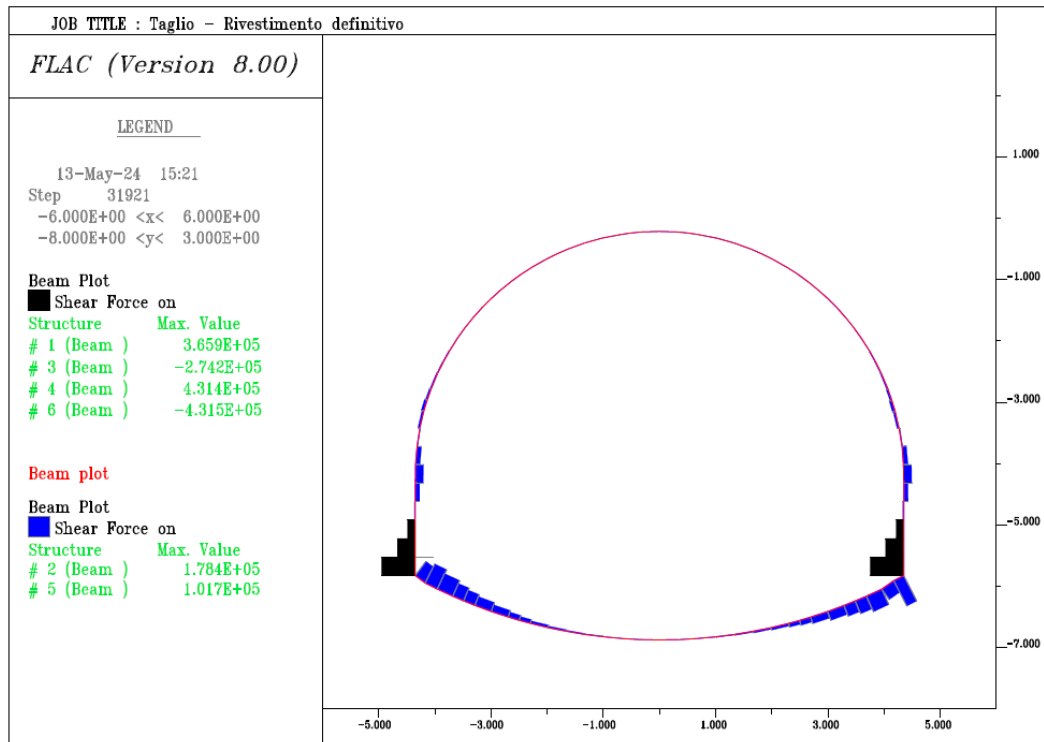
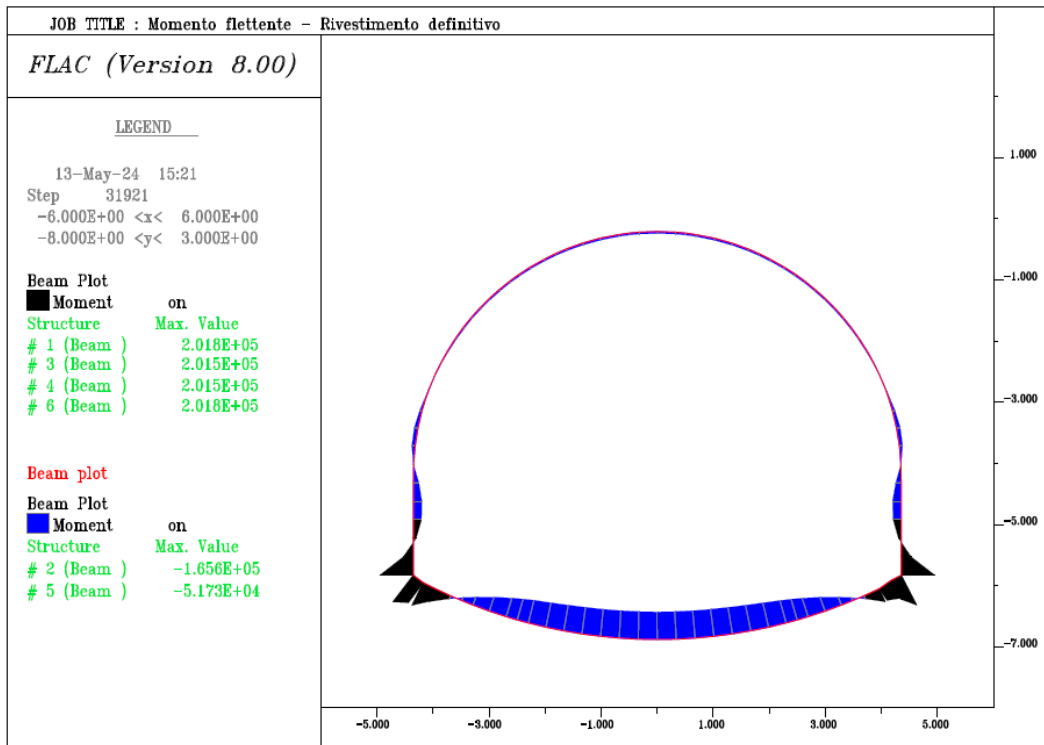
PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



PROGETTAZIONE ATI:



9.4.1.1 Verifiche SLU rivestimento provvisorio – Solo Centine

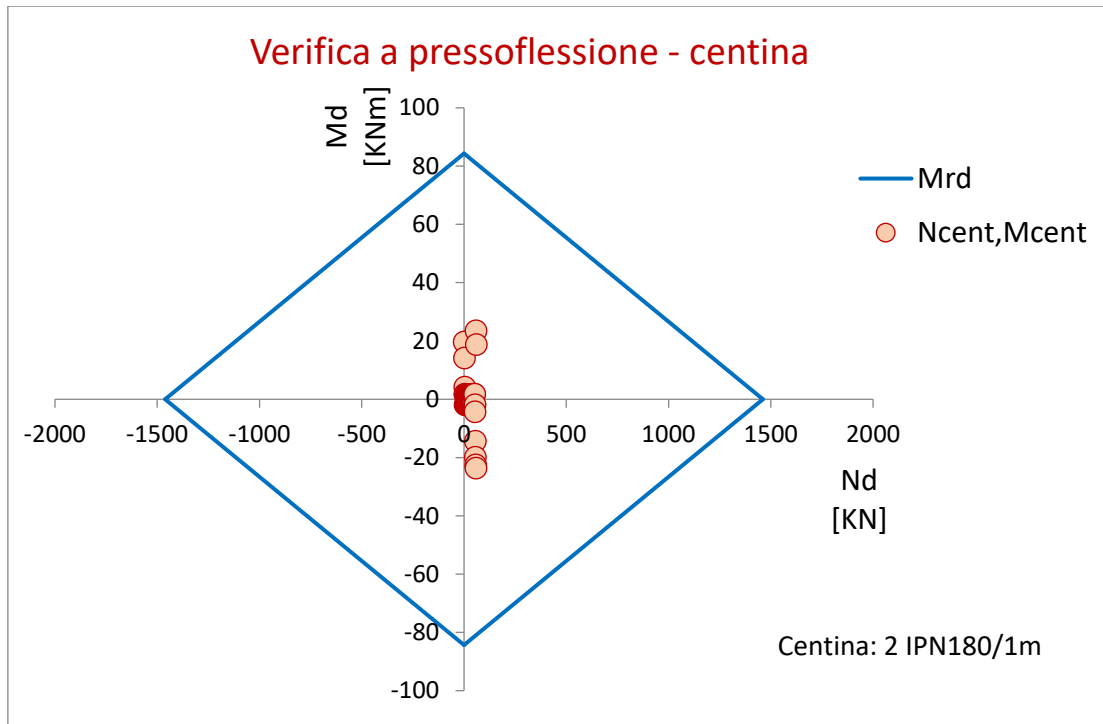


Figura 9-1: Dominio M-N (centina)

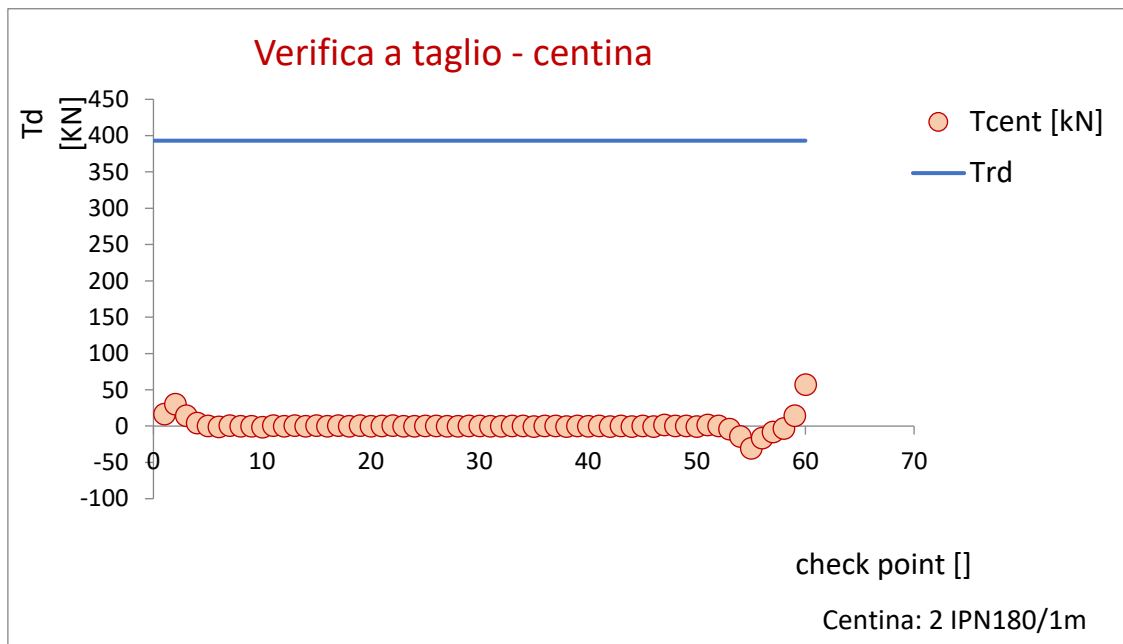


Figura 9-2: Verifica a taglio (centina)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

9.4.1.2 Verifiche SLU rivestimento provvisorio

Verifica a pressoflessione - centine+spritz

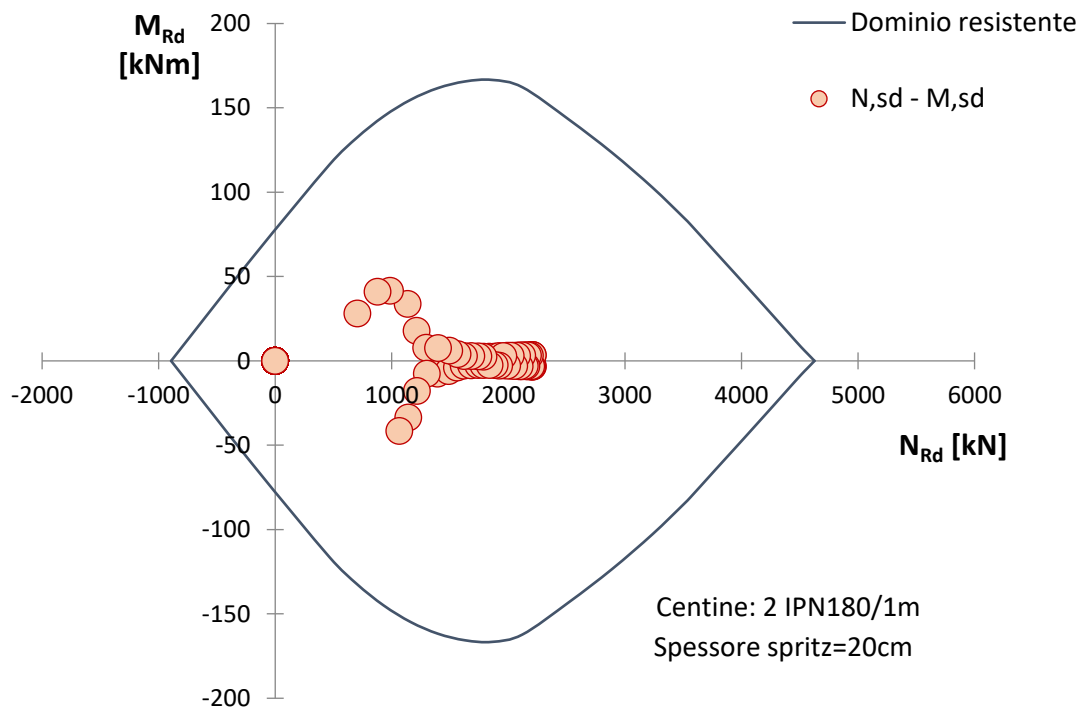


Figura 9-3: Dominio M-N (centina+spritz)

Verifica a taglio (solo centine)	
T_res	393 KN
T_soll	85 KN
Esito	Soddisfatta

Figura 9-4: Verifica a taglio (centina+spritz)

Le verifiche risultano soddisfatte.

9.4.1.4 Verifiche SLU rivestimento definitivo

Sezione in calotta

Verifica a pressoflessione - calotta

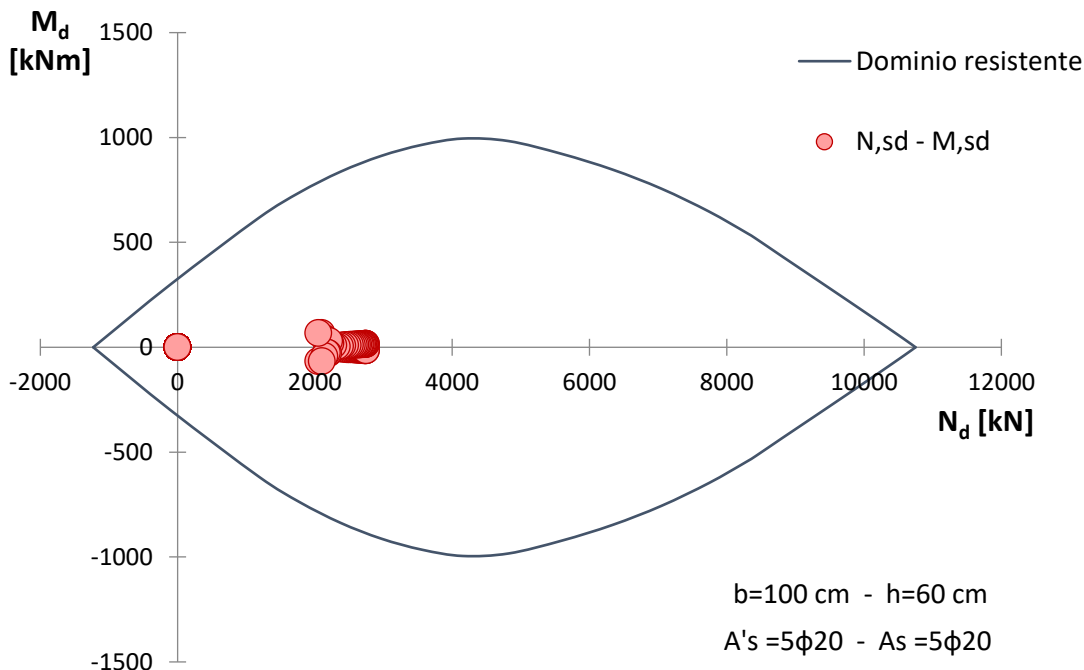


Figura 9-5: Dominio M-N (calotta)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio				
	Taglio age	$V_{Ed} = 132.21$	kN	
Altezza della sezione	h =	600	mm	
Copriferro della sezione	$\delta =$	50	mm	
Altezza utile della sezione	d =	550	mm	
Diametro degli spilli	$d_w =$	12	mm	
Numero di braccia	$n_w =$	2.5	n° spilli /m (direzione long.)	
Area totale spilli	$A_{sw} =$	282.60		mm ²
Passo degli spilli	s =	200	mm	passo in direzione trasv.
Inclinazione delle staffe	$\alpha =$	90	deg	
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta =$	21.8	deg	$\cot(\theta) = 2.5$ $\begin{cases} 1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \\ 21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \end{cases}$
Larghezza minima della sezione	$b_w =$	1000	mm	
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c =$	1.2		
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} =$	684.3	kN	$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$
Resistenza di calcolo a "taglio-comprensione"	$V_{Rcd} =$	1685.8	kN	$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} =$	684.3	kN	$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$
Esito della verifica		Soddisfatta		

Figura 9-6: Verifica a taglio (calotta)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione in arco rovescio

Verifica a pressoflessione - Arco Rovescio

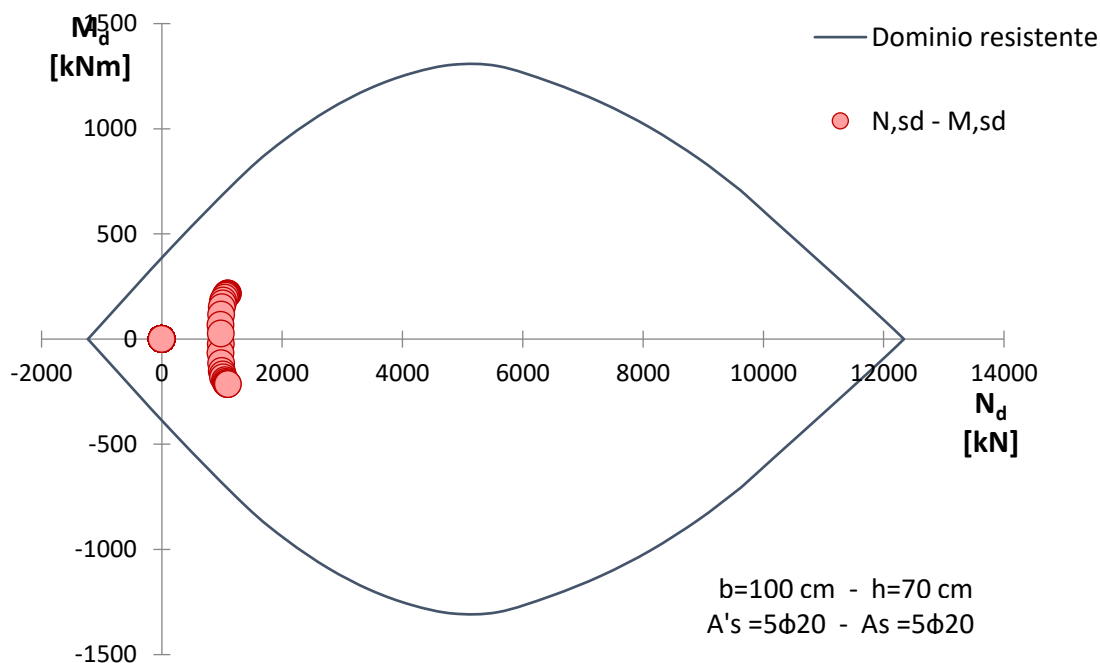


Figura 9-7: Dominio M-N (arco rovescio)

Taglio resistente nelle sezioni con armatura trasversale a taglio			
	Taglio age	$V_{Ed} = 231.92$	kN
Altezza della sezione	$h =$	700	mm
Coprifero della sezione	$\delta =$	50	mm
Altezza utile della sezione	$d =$	650	mm
Diametro degli spilli	$d_w =$	12	mm
Numero di braccia	$n_w =$	2.5	n° spilli / m (direzione long.)
Area totale spilli	$A_{sw} =$	282.60	mm ²
Passo degli spilli	$s =$	200	mm
Inclinazione delle staffe	$\alpha =$	90	deg
Inclinazione delle bielle compresse	$\theta =$	21.8	deg
Larghezza minima della sezione	$b_w =$	1000	mm
Coeff. maggiorativo per sezioni compresse	$\alpha_c =$	1.2	
Resistenza di calcolo a "taglio-trazione"	$V_{Rsd} =$	808.7	kN
Resistenza di calcolo a "taglio-compressione"	$V_{Rcd} =$	1992.3	kN
Resistenza a taglio della sezione	$V_{Rd} =$	808.7	kN
Esito della verifica			
Soddisfatta			

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

Figura 9-8: Verifica a taglio (arco rovescio)

Le verifiche risultano soddisfatte.

PROGETTAZIONE ATI:

9.4.1.5 Verifiche SLE

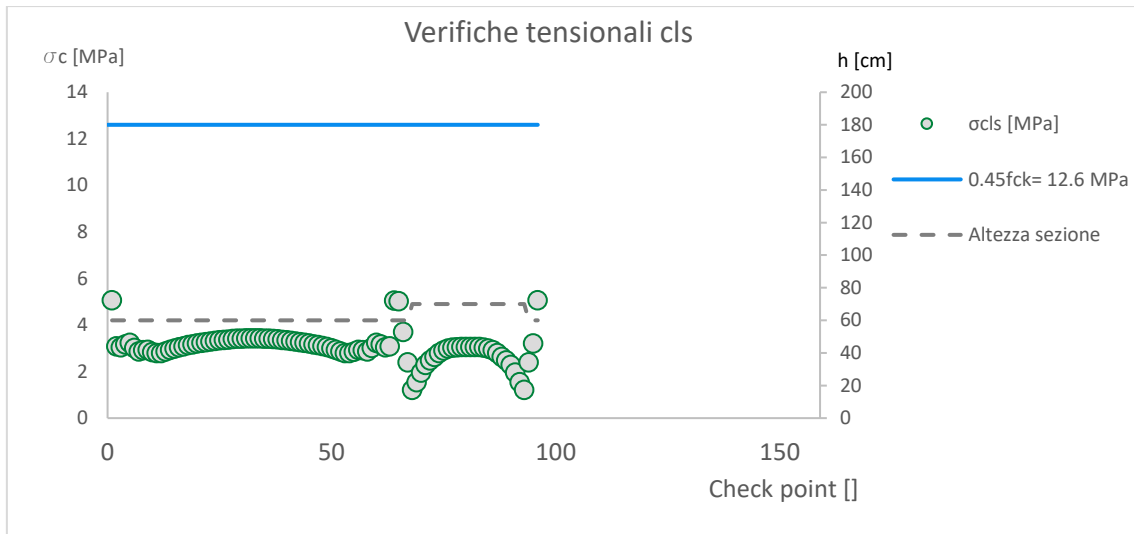


Figura 9-9: Verifiche tensionali cls

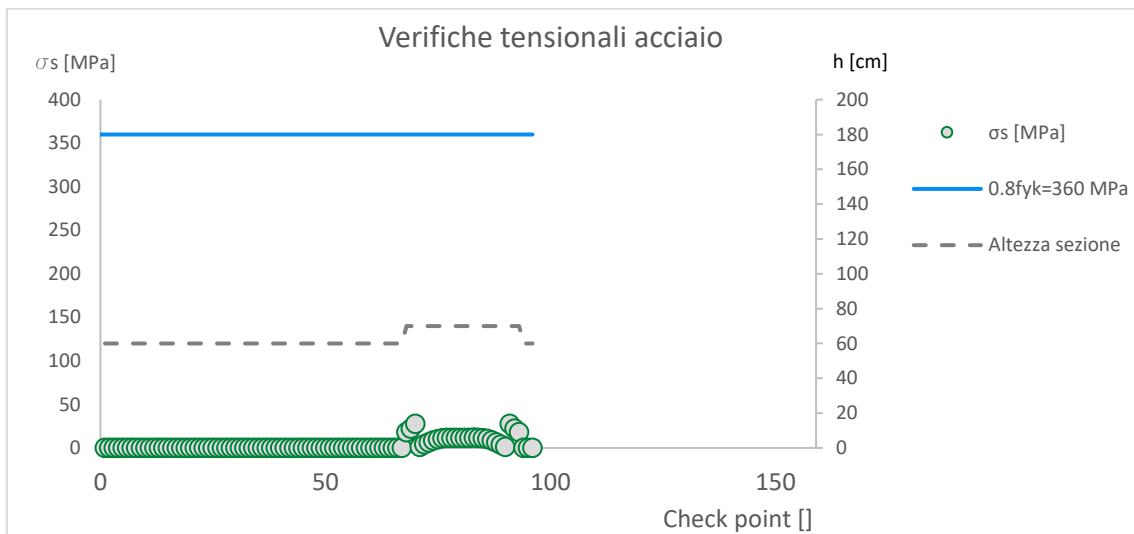


Figura 9-10: Verifiche tensionali acciaio

PROGETTAZIONE ATI:

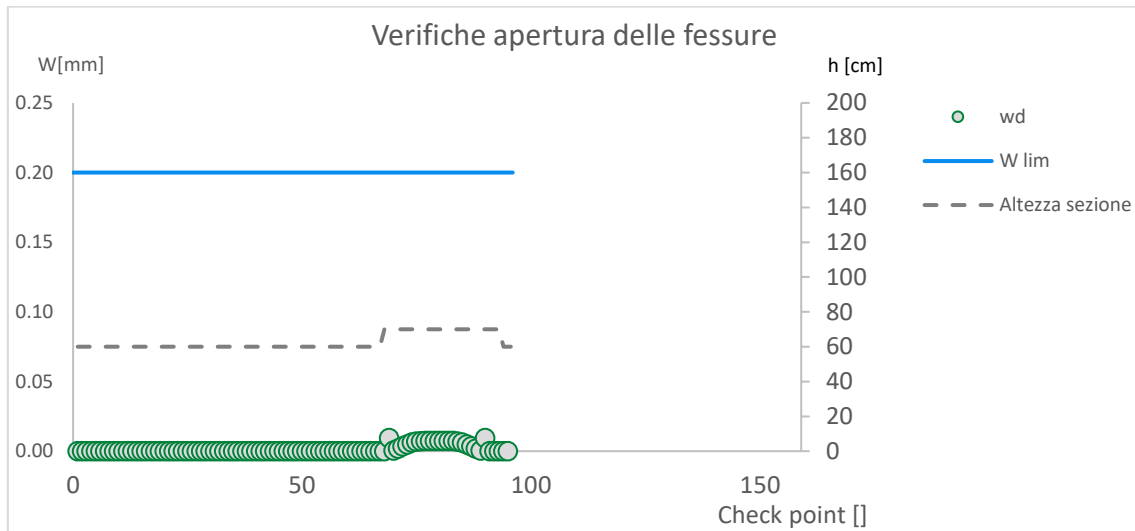


Figura 9-11: Verifiche apertura delle fessure

Le verifiche risultano soddisfatte.

9. MONITORAGGIO SULLA GALLERIA NATURALE

Per il monitoraggio della galleria naturale si rimanda all'elaborato specifico.

PROGETTAZIONE ATI: