

COMMITTENTE



COMUNE DI PALERMO AREA INFRASTRUTTURE E TERRITORIO

PROGETTISTA

ATI:



(Capogruppo Mandataria)



DOMINIQUE PERRAULT
ARCHITECTE

METROPOLITANA AUTOMATICA LEGGERA DELLA CITTA' DI PALERMO PRIMA LINEA TRATTA FUNZIONALE ORETO/NOTARBARTOLO

PROGETTO PRELIMINARE

CONSOLIDAMENTO ANALISI FEM DELLE GALLERIE DI LINEA

COMMESSA	FASE	COMPARTO	DOCUMENTO	REV	SCALA	NOME FILE
MPA1	PP	CSD	INRC03	2	-	CSD_INRC03_2.doc

							PROGETTISTA
2	SETT. 2006	REVISIONE GENERALE	Silvestri	Pedrazzi	Checchi/Di Nicola	Piscitelli	
1	AGOSTO 2006	AGGIORNAMENTO DATA DI CONSEGNA E REVISIONE GENERALE	Silvestri	Pedrazzi	Checchi/Di Nicola	Piscitelli	
0	MAGGIO 2006	EMISSIONE ELABORATI OPERE CIVILI	Silvestri	Pedrazzi	Checchi/Di Nicola	Piscitelli	
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	AUTORIZZATO	

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea - Tratta funzionale Oreto/Notarbartolo.
	Analisi FEM delle gallerie di linea

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito del progetto per la realizzazione della metropolitana automatica leggera di Palermo, nella seguente relazione si affronta lo studio delle gallerie di linea con particolare riferimento al bacino di subsidenza indotto in superficie dallo scavo delle gallerie ed allo stato tensionale indotto nel rivestimento definitivo.

I tunnel delle gallerie di linea saranno realizzati con scavo meccanizzato con TBM scudata con sostegno in pressione del fronte di scavo, le gallerie corrono ad una profondità della calotta variabile in media tra i 12 e i 22 m.

Il problema della determinazione del bacino di subsidenza e delle sollecitazioni nel rivestimento definitivo delle gallerie è stato qui affrontato per mezzo di analisi numeriche agli elementi finiti, attraverso le quali si simula la costruzione per fasi dei due tunnel affiancati.

I casi analizzati con la modellazione FEM, nell'ipotesi di stato piano di deformazione e in condizioni di piano campagna libero (green field), hanno lo scopo definire un intervallo di variabilità delle subsidenze e delle sollecitazioni nel rivestimento al mutare delle condizioni operative dello scavo (variazione dei tassi di deconfinamento) e delle caratteristiche di deformabilità e di resistenza dei terreni, entro un campo ragionevole di valori.

Dopo un breve richiamo sulle condizioni geotecniche del sito, si illustrano nel seguito i modelli di calcolo adottati, le fasi esecutive considerate ed i risultati ottenuti.

Per tutti gli approfondimenti di carattere generale, si rimanda agli elaborati di progetto ed alle relazioni descrittive generali.

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.
	Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM delle gallerie di linea

2 RICHIAMI SULLE CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

Per una descrizione di dettaglio e ulteriori informazioni sulle caratteristiche dei terreni interessati dallo scavo delle gallerie di linea si rimanda alla “Relazione geologica” e alla “Relazione geotecnica” allegate al progetto.

Ai fini del presente studio (valutazione del bacino dei cedimenti indotti in superficie dallo scavo delle gallerie e dello stato tensionale nei rivestimenti), la presenza dei terreni di riporto (unità R), rinvenuti dal p.c. fino ad una profondità massima di 7 m, è trascurabile, e pertanto la stratigrafia di progetto considerata può essere ricondotta al seguente schema semplificato:

- unità CL (Calcarenite): dal piano campagna fino alle massime profondità di interesse, calcarenite bioclastica a grana media, di colore giallastro e biancastro, con grado di cementazione variabile da ben cementata e lapidea a debolmente cementata, in strati di spessore centimetrico e decimetrico alternati a subordinati e sottili livelli sabbiosi.

In realtà il Complesso Calcarenitico comprende una vasta gamma di rocce tenere e terreni a grana fina, fra loro differenti per caratteristiche fisiche e macrostrutturali. Le indagini svolte e i numerosi studi condotti nell'area di Palermo, hanno portato ad identificare diversi termini all'interno del Complesso Calcarenitico, che vanno dalle rocce tenere (CL=calcarenite bioclastica, CV=calcarenite vacuolare, CN=calcarenite nodulare) ai terreni sciolti (SC=sabbia calcarenitica, SG=sabbia con ghiaia, etc.). In generale le indagini geognostiche svolte hanno mostrato che per effetto delle operazioni di perforazione e di prelievo durante i sondaggi, la Calcarenite subisce una fratturazione nei punti cementati, e al limite viene carotata addirittura come sabbia sciolta. Tale evenienza è stata confermata anche attraverso le riprese televisive effettuate in alcuni fori di sondaggio.

In definitiva la formazione si presenta come un'alternanza di rocce tenere e terreni sciolti, con livelli a cementazione variabile da ben cementata e lapidea, a debolmente cementata, a terreni sciolti. Dal punto di vista geotecnico, e ai fini del presente studio, si è ritenuto opportuno non considerare nei modelli stratigrafie complesse e differenti, ma piuttosto considerare un mezzo omogeneo ed effettuare analisi di calcolo parametriche in funzione della variabilità di alcune caratteristiche geotecniche.

Le analisi FEM riportate nel cap. 3, sono state quindi condotte allo scopo di definire un intervallo di variabilità delle subsidenze e delle sollecitazioni nel rivestimento delle gallerie, al mutare della deformabilità e della resistenza dell'unità CL entro un campo ragionevole di valori. Pertanto, considerando un grado di cementazione variabile per il complesso delle Calcareniti, sulla base delle informazioni disponibili in letteratura e dei risultati della campagna di indagini in sito effettuata, sono stati considerati i seguenti intervalli di valori per i parametri di resistenza e deformabilità:

Calcareniti CL (da sciolte a cementate):

- | | | |
|------------------------|-------------------|--|
| ➤ $\gamma = 20$ | kN/m ³ | peso naturale dell'unità di volume; |
| ➤ $c' = 0 \div 40$ | kPa | coesione efficace; |
| ➤ $\phi' = 35 \div 40$ | ° | angolo di resistenza al taglio; |
| ➤ $E = 10 \div 100$ | MPa | modulo elastico in fase di carico (CL deb. cementate); |
| ➤ $E = 100 \div 500$ | MPa | modulo elastico in fase di carico (CL ben cementate). |

Gli intervalli dei parametri geotecnici sopra riportati sono in alcuni casi abbastanza ampi, specialmente per quanto concerne i valori della coesione e dei moduli di rigidezza. In particolare il grado di cementazione tende a fare aumentare i valori di c' ed E , ma va detto

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM delle gallerie di linea

che i valori massimi sopra riportati possono essere considerati in presenza di bancate molto omogenee di roccia calcarenitica ben cementata. Per quanto riguarda i valori dei parametri geotecnici adottati nei calcoli che seguono, si sono quindi ipotizzati livelli di cementazione differenti per la formazione in esame, e le analisi sono state svolte in forma parametrica al variare di detti parametri (v. cap. 3).

La falda è stata posta nelle analisi di calcolo cautelativamente a circa 9.0 m di profondità dal p.c., valore che corrisponde ai minimi riportati sul profilo geologico, ad eccezione di alcune tratte particolari del tracciato (es. in prossimità di Piazza Borsa).

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM delle gallerie di linea

3 ANALISI FEM

Lo studio dell'interazione struttura-terreno, dei cedimenti indotti in superficie e delle sollecitazioni nel rivestimento definitivo è stato condotto mediante analisi FEM (Finite Element Method) nell'ipotesi di stato piano di deformazione, con il codice di calcolo Plaxis.

Le analisi sono state condotte con modelli bidimensionali (2D). Dovendo analizzare lo stato tenso-deformativo nella zona immediatamente retrostante il fronte di scavo, nel terreno e nelle strutture provvisorie e definitive, il calcolo dovrebbe essere condotto ricorrendo a modelli tridimensionali. E' tuttavia accettabile e ragionevole ricorrere a modelli piani nei quali si analizza una sezione del cavo e si impone, in corrispondenza del perimetro di scavo una pressione di sostentamento fittizia p_i gradualmente decrescente da un valore equivalente allo stato tensionale preesistente allo scavo della galleria σ_0 (tensione geostatica iniziale) ad un valore che viene scelto in funzione della distanza tra il fronte e la sezione in esame.

Secondo questo procedimento, l'avanzamento del fronte è rappresentabile nella sezione trasversale analizzata con una sequenza di fasi a pressione fittizia decrescente.

Nell'ipotesi di assial-simmetria, cui si può in prima approssimazione fare riferimento, la successione è definita secondo il parametro di rilassamento λ , mediante l'espressione:

$$p_i = (1-\lambda) \cdot \sigma_0$$

dove:

$$\lambda = 0 \quad \rightarrow \quad p_i = \sigma_0 \quad \text{condizioni iniziali;}$$

$$\lambda \in (0,1) \quad \rightarrow \quad p_i \in (\sigma_0, 0) \quad \text{nei pressi del fronte;}$$

$$\lambda = 1 \quad \rightarrow \quad p_i = 0 \quad \text{lontano dal fronte in assenza di rivestimenti.}$$

Lo scavo della galleria è quindi simulato seguendo l'evoluzione delle tensioni e delle deformazioni nel terreno circostante il cavo in accordo ad una determinata sequenza di analisi effettuata in fasi successive nelle quali la pressione fittizia interna sul cavo decresce dal valore iniziale fino a zero.

Pertanto, nelle analisi è stato simulato un ciclo di lavorazione che prevede le seguenti fasi principali con i relativi tassi di deconfinamento:

- scavo con la TBM e tasso di deconfinamento variabile da 0.3 a 0.5;
- posa in opera del rivestimento e tasso di deconfinamento pari a 1.0.

Si osserva che nel caso di scavo meccanizzato e nelle condizioni geotecniche in esame, l'intervallo di variabilità di λ è rispettivamente cautelativo al fine della determinazione dei cedimenti massimi ($\lambda = 0.5$) e delle sollecitazioni massime sul rivestimento ($\lambda = 0.3$).

Di seguito si riportano sinteticamente le principali caratteristiche del modello utilizzato nelle analisi.

La profondità delle due gallerie è stata scelta pari a 18.00 m in asse tunnel, l'interasse orizzontale tra le due canne è pari a 20.0 m, il diametro di scavo di ciascuna galleria è pari a $D=6.00$ m.

Il volume di terreno significativamente interessato dalla variazione tensionale causata dalla realizzazione della galleria naturale è stato reso discreto con una mesh (v. fig. 3.1) larga 140 m e profonda 50 m dal p.c., costituita da circa n. 2156 elementi triangolari a 15 nodi e da n.

10320 nodi (n. 12936 punti di Gauss).

Le dimensioni della mesh, in relazione alle dimensioni delle gallerie affiancate, sono sufficienti a garantire che i risultati delle analisi siano indipendenti dalla particolare mesh adottata e sono tali da permettere di vincolare il lato inferiore della mesh bloccando gli spostamenti verticali ed i lati sinistro e destro bloccando gli spostamenti orizzontali.

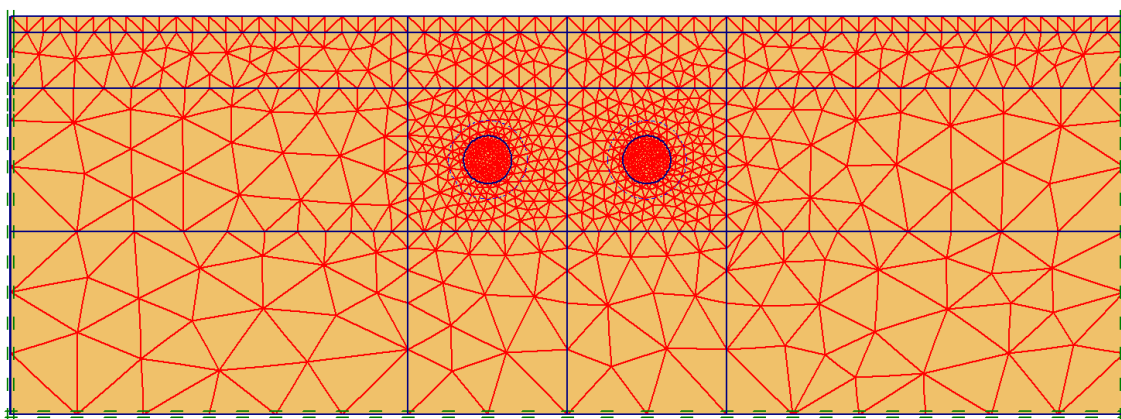


Figura 3.1: Modello geometrico e mesh di calcolo

L'analisi FEM è stata condotta nell'ipotesi di condizioni drenate perché tale ipotesi sul regime idraulico è la più cautelativa sia per la valutazioni delle deformazioni che per le sollecitazioni sui rivestimenti. La falda è stata posta a circa 9.0 m di profondità da p.c..

L'unità CL è stata modellata come mezzo poroso continuo, caratterizzato da un legame costitutivo elastico isotropo, plastico incrudente con flusso non associato e superficie di snervamento chiusa (v. figura 3.2).

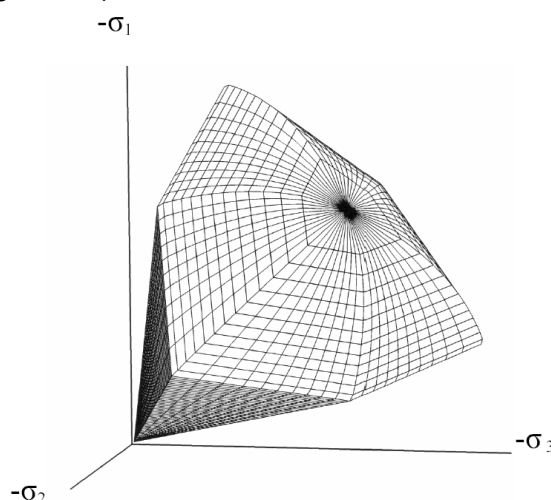


Figura 3.2: Superficie di snervamento dell'Hardening Soil Model

Le caratteristiche principali del modello adottato (Hardening Model) sono:

- una differente rigidezza per percorsi tensionali di primo carico e di scarico-ricarico;
- la rigidezza secante E_{50} per percorsi tensionali di primo carico è funzione della tensione di confinamento applicata:

$$E_{50} = E_{50,ref} \cdot [(c' \cdot \cos\phi - \sigma'_{min} \cdot \sin\phi) / (c' \cdot \cos\phi + p_{ref} \cdot \sin\phi)]^m$$

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.
	Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM delle gallerie di linea

dove p_{ref} è la pressione di riferimento, σ'_{min} è la tensione principale minore, $E_{50,ref}$ è il modulo di rigidezza secante alla pressione di riferimento, E_{50} è il modulo di rigidezza secante alla tensione σ'_{min} ed m è un parametro dipendente dal litotipo considerato;

- rigidezza secante E_{ur} per percorsi tensionali di scarico-ricarico funzione della tensione di confinamento applicata:

$$E_{ur} = E_{ur,ref} [(c' \cdot \cos\phi - \sigma'_{min} \cdot \sin\phi) / (c' \cdot \cos\phi + p_{ref} \cdot \sin\phi)]^m$$

dove p_{ref} è la pressione di riferimento, σ'_{min} è la tensione principale minore, $E_{ur,ref}$ è il modulo di rigidezza secante alla pressione di riferimento, E_{ur} è il modulo di rigidezza secante alla tensione σ'_{min} ed m è un parametro dipendente dal litotipo considerato;

- sviluppo di deformazioni plastiche per stati tensionali deviatorici e sferici;
- criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb.

Le analisi FEM sono state condotte allo scopo di definire un intervallo di variabilità dei risultati ottenuti al mutare delle caratteristiche di resistenza e di deformabilità della formazione delle Calcareni, entro un campo ragionevole di valori. Pertanto, considerando un grado di cementazione variabile, ai fini della definizione del comportamento meccanico dei terreni modellati si sono adottati in due differenti serie analisi, i parametri di calcolo riportati nella Tabella 3.1:

Unità [-]	γ [kN/m ³]	$E_{50,ref}$ [kN/m ²]	$E_{ur,ref}$ [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ [-]	ψ [-]	ν [-]	p_{ref} [kN/m ²]	m [-]	K_{onc} [-]
CL cementata	20	150000	450000	20	40°	5°	0.2	100	0.6	0.500
CL sciolta	20	50000	200000	0	40°	5°	0.2	100	0.6	0.500

Tabella 3.1: Parametri di calcolo dei “terreni HM” utilizzati nelle analisi

dove

γ = peso di volume;

c' = coesione drenata;

ϕ' = angolo di attrito;

ψ = angolo di dilatanza;

E_{50ref} = modulo di rigidezza per percorsi tensionali di primo carico;

$E_{ur,ref}$ = modulo di rigidezza per percorsi tensionali di scarico-ricarico;

ν_{ur} = coefficiente di Poisson.

Il rivestimento delle gallerie (in conci prefabbricati di calcestruzzo dello spessore $s=30$ cm) è stato modellato con elementi piastra caratterizzati da un legame costitutivo lineare-elastico con un modulo di Young del calcestruzzo $E_c=30'000$ MPa ed un coefficiente di Poisson $\nu = 0.15$.

In definitiva, ai fini della valutazione del bacino di subsidenza e delle sollecitazioni sul rivestimento sono state condotte le analisi FEM qui di seguito descritte:

- Analisi 1: unità CL cementata e tasso di deconfinamento $\lambda = 0.3$;
- Analisi 2: unità CL cementata e tasso di deconfinamento $\lambda = 0.5$;
- Analisi 3: unità CL sciolta e tasso di deconfinamento $\lambda = 0.3$;
- Analisi 4: unità CL sciolta e tasso di deconfinamento $\lambda = 0.5$.

Nel capitolo 4 si riportano i principali risultati delle analisi svolte.

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.
	Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
Analisi FEM delle gallerie di linea	

4 RISULTATI DELLE ANALISI

4.1 SUBSIDENZE

Il modello descritto nel cap. 3 ha consentito di valutare le deformate indotte a livello del piano campagna in condizioni di superficie libera (green field).

Nelle figure 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 è riportato il bacino di subsidenza ottenuto rispettivamente nell'Analisi 1 (unità CL cementata, $\lambda=0.3$), nell'Analisi 2 (unità CL cementata, $\lambda=0.5$), nell'Analisi 3 (unità CL sciolta, $\lambda=0.3$) e nell'Analisi 4 (unità CL cementata, $\lambda=0.5$).

Nella Tabella 4.1 sono riportati i valori dei cedimenti massimi S_v e del volume perso V_p ottenuti rispettivamente nelle 4 analisi:

Analisi [-]	Unità [-]	λ [-]	S_v [mm]	V_p [m ³ /m]	V_s [m ³ /m ²]	V_p/V_s % [-]
Analisi 1	CL cementata	0.3	1.8	0.08	56.52	0.14
Analisi 2	CL cementata	0.5	4.1	0.20	56.52	0.35
Analisi 3	CL sciolta	0.3	3.6	0.15	56.52	0.26
Analisi 4	CL sciolta	0.5	12.5	0.56	56.52	0.99

Tabella 4.1: Valori del cedimento massimo e del volume perso nelle 4 analisi

dove

λ = tasso di deconfinamento;

S_v = cedimento massimo;

V_p = volume perso;

V_s = volume scavato.

Come si può osservare dalla tabella, a parità di condizioni geotecniche i cedimenti massimi si verificano con il tasso di deconfinamento maggiore ($\lambda = 0.5$), come peraltro è intuitivo.

Dalla curva di subsidenza dei due tunnel si è potuto valutare per ciascuna analisi il valore del volume di scavo perso, calcolato integrando l'area del bacino di subsidenza per metro di sviluppo della galleria. In Tabella 4.1 sono riportati i risultati ottenuti. I valori del volume perso sono in linea con le indicazioni di letteratura per il caso in esame (condizioni geotecniche e tecnica di scavo).

Il volume perso massimo (Analisi 4) è pari a $V_p = 0.56 \text{ m}^3/\text{m}$, che rapportato all'area di scavo dei due tunnel ($V_s = 56.52 \text{ m}^3/\text{m}$) fornisce una percentuale $V_p/V_s = 0.99\%$.

Tale valore è stato calcolato nelle ipotesi più sfavorevoli per il calcolo del bacino di subsidenza, e pertanto è un valore da considerarsi come limite superiore.

Bacino di subsidenza analisi 1

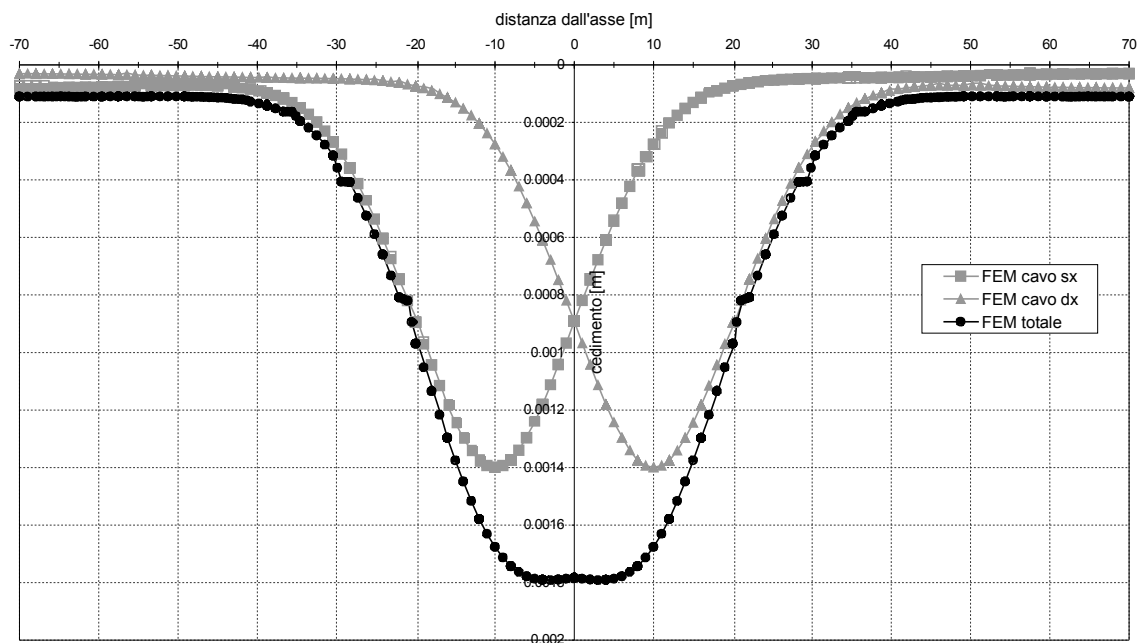


Figura 4.1: Bacino di subsidenza (Analisi 1)

Bacino di subsidenza analisi 2

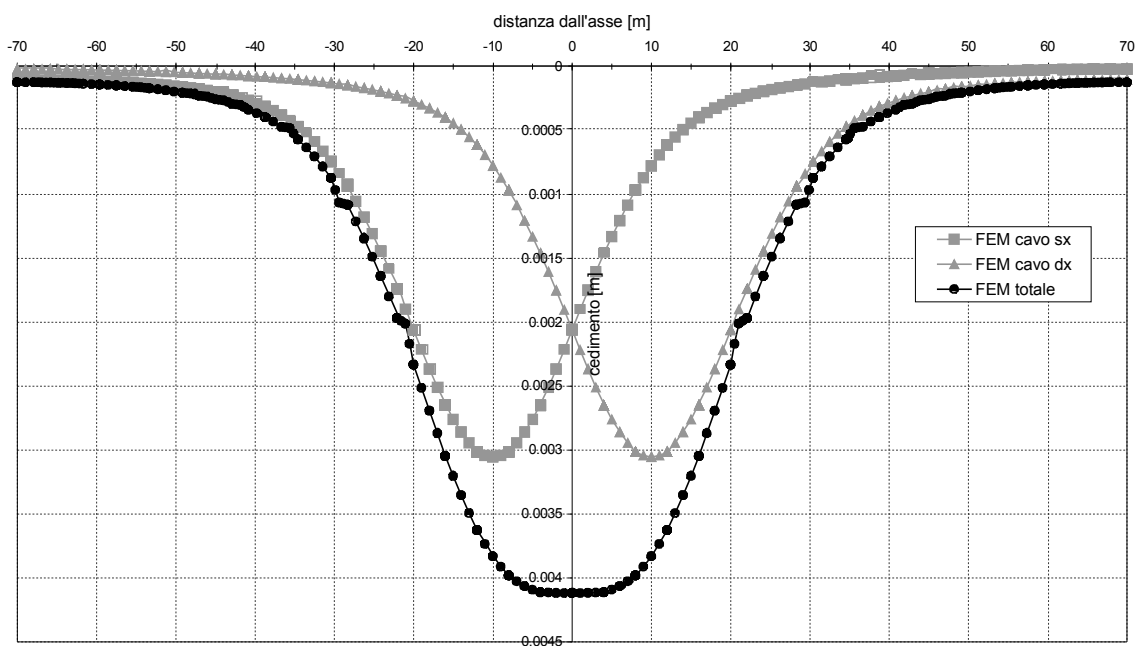


Figura 4.2: Bacino di subsidenza (Analisi 2)

Bacino di subsidenza analisi 3

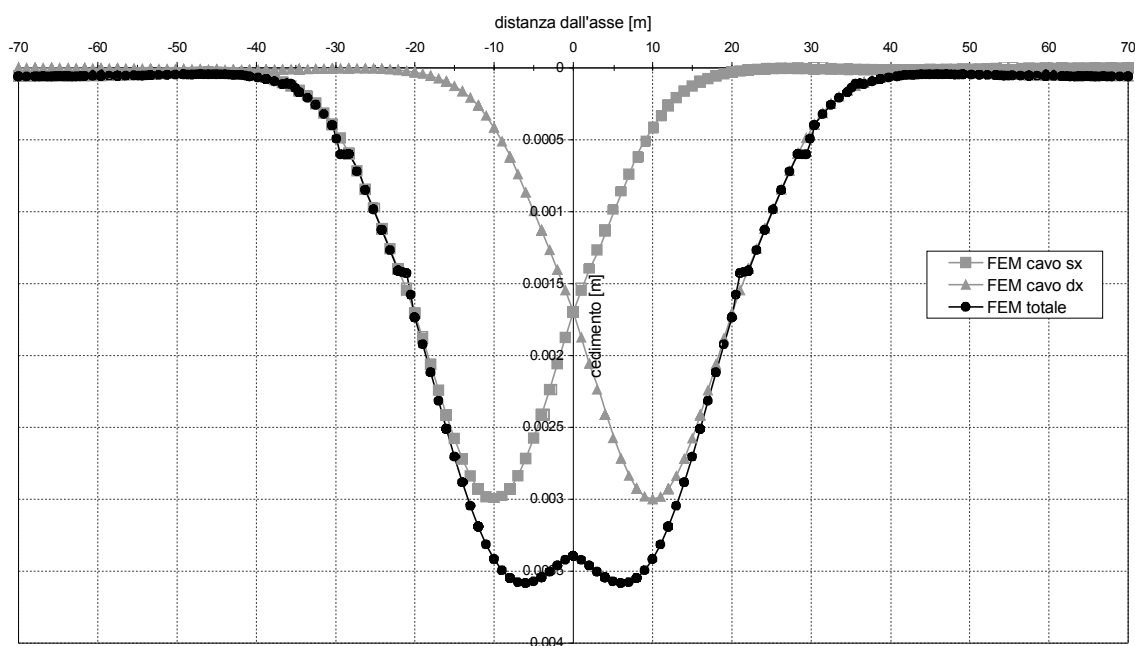


Figura 4.3: Bacino di subsidenza (Analisi 3)

Bacino di subsidenza analisi 4

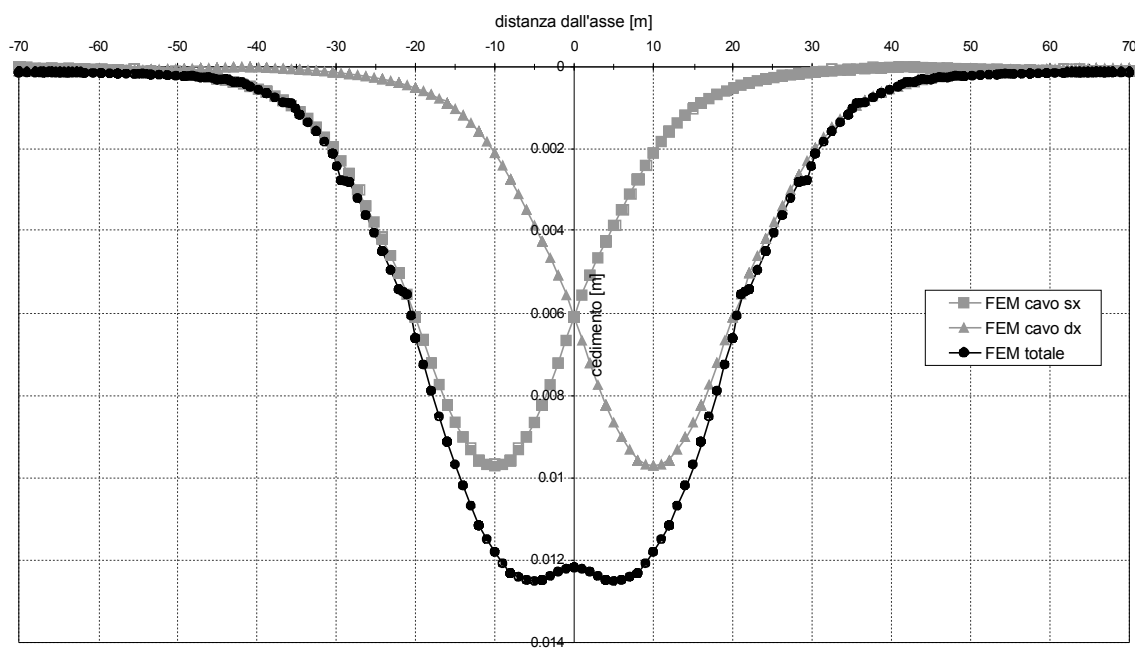


Figura 4.4: Bacino di subsidenza (Analisi 4)

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM delle gallerie di linea

4.2 SOLLECITAZIONI NEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

Nella Tabella 4.2, per ciascuna delle analisi svolte, si riassumono i valori delle sollecitazioni massime di sforzo normale e momento flettente sul rivestimento definitivo in conci prefabbricati, così come risultanti dai calcoli:

Analisi [-]	Unità [-]	λ [-]	N_{max} [kN/m]	N_{min} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]
Analisi 1	CL cementata	0.3	651	468	19
Analisi 2	CL cementata	0.5	481	351	15
Analisi 3	CL sciolta	0.3	678	488	37
Analisi 4	CL sciolta	0.5	498	362	30

Tabella 4.2: Valori delle sollecitazioni interne nei rivestimenti delle gallerie nelle 4 analisi

dove

λ = tasso di deconfinamento;

N_{max} = sforzo normale massimo (positivo se di compressione);

N_{min} = sforzo normale minimo (positivo se di compressione);

M_{max} = momento flettente massimo.

Come si può osservare dalla tabella, a parità di condizioni geotecniche le sollecitazioni massime si ottengono con il tasso di deconfinamento minore ($\lambda = 0.3$), come peraltro è atteso.

Dalla figura 4.5 alla figura 4.12, per ciascuna analisi, sono riportati i diagrammi dello sforzo normale e del momento flettente nel rivestimento definitivo. I valori massimi delle sollecitazioni sono quelli riportati nella tabella 4.2.

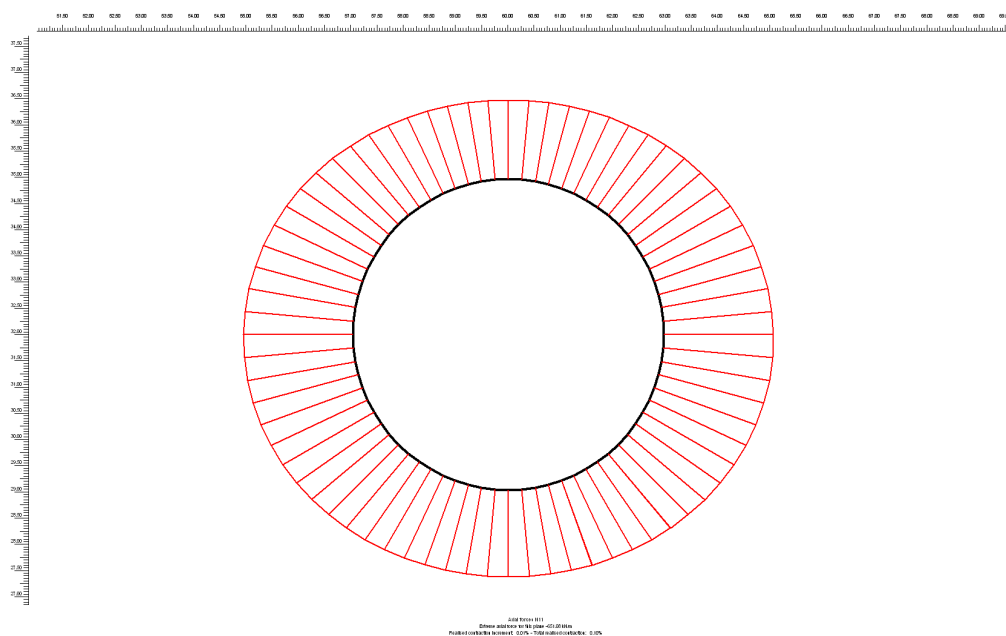


Figura 4.5: Diagramma dello sforzo normale (Analisi 1)

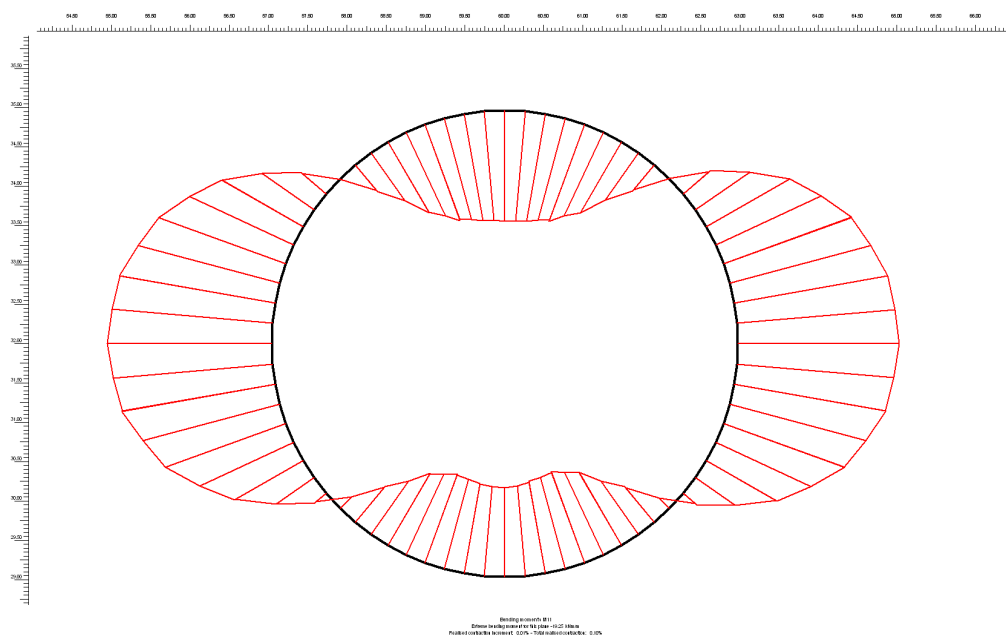


Figura 4.6: Diagramma del momento flettente (Analisi 1)

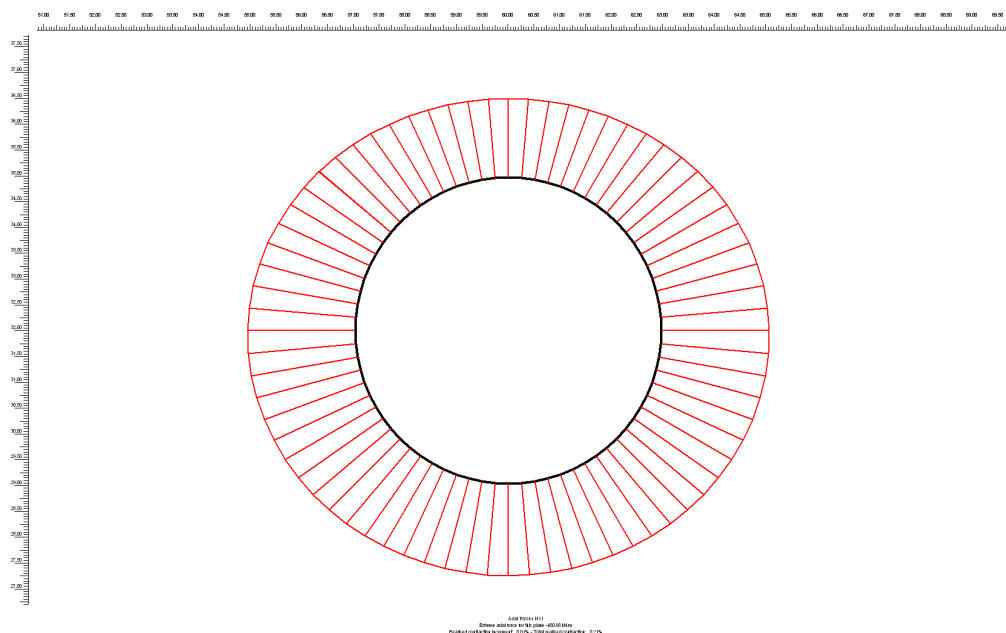


Figura 4.7: Diagramma dello sforzo normale (Analisi 2)

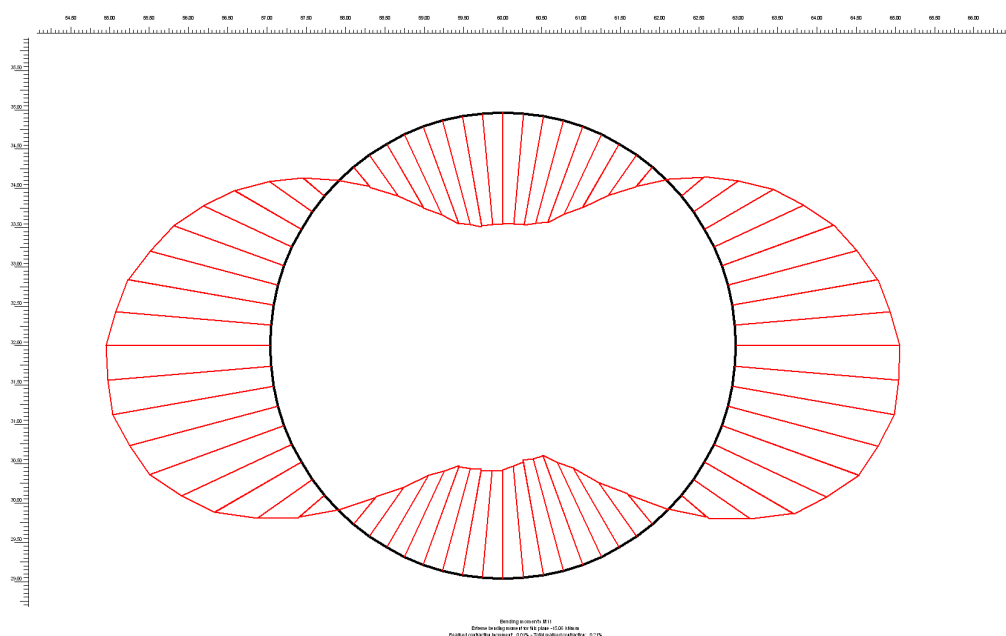


Figura 4.8: Diagramma del momento flettente (Analisi 2)

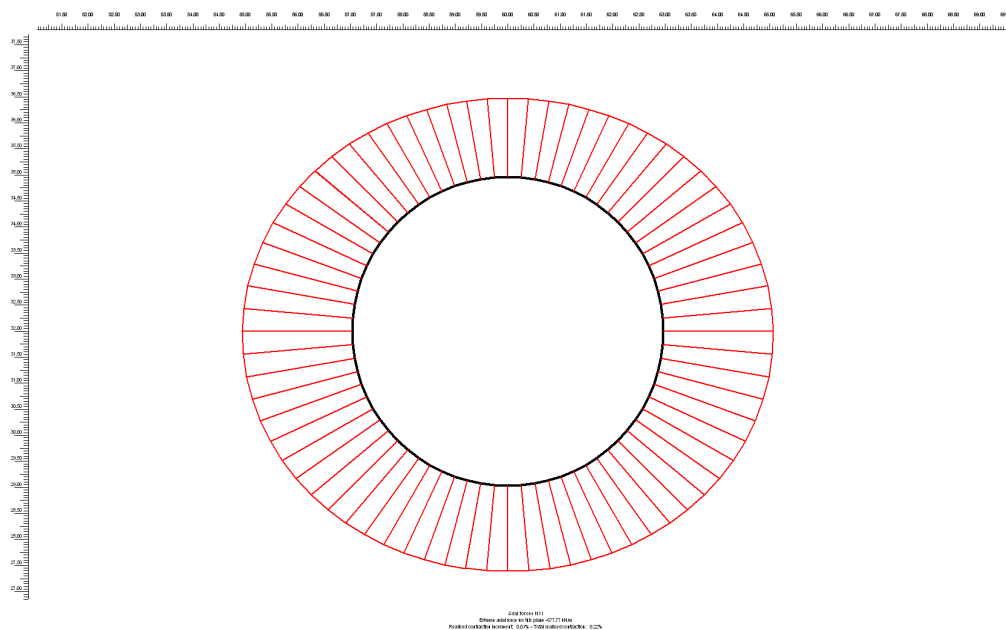


Figura 4.9: Diagramma dello sforzo normale (Analisi 3)

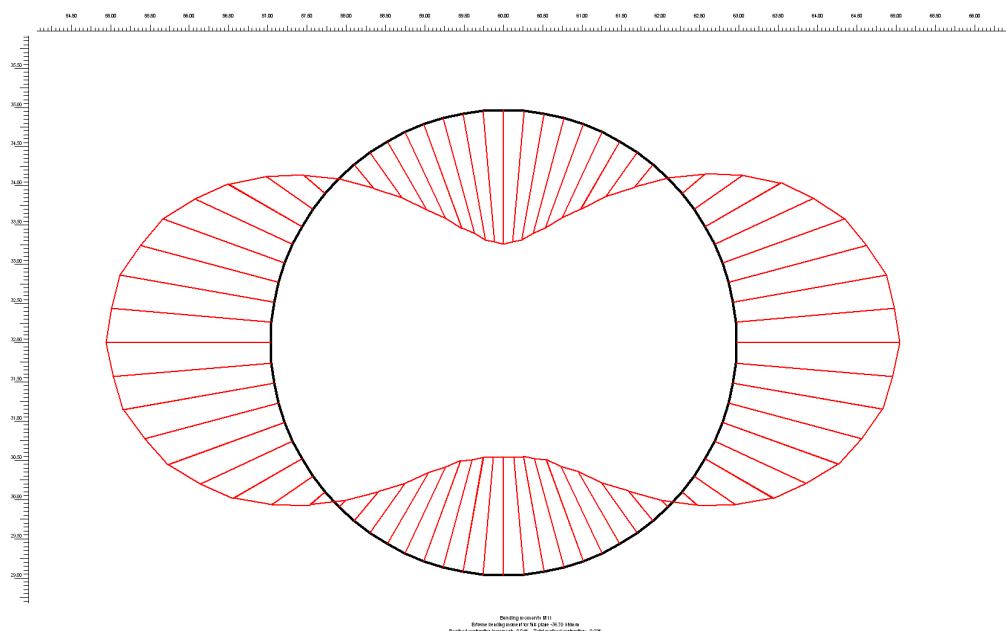


Figura 4.10: Diagramma del momento flettente (Analisi 3)

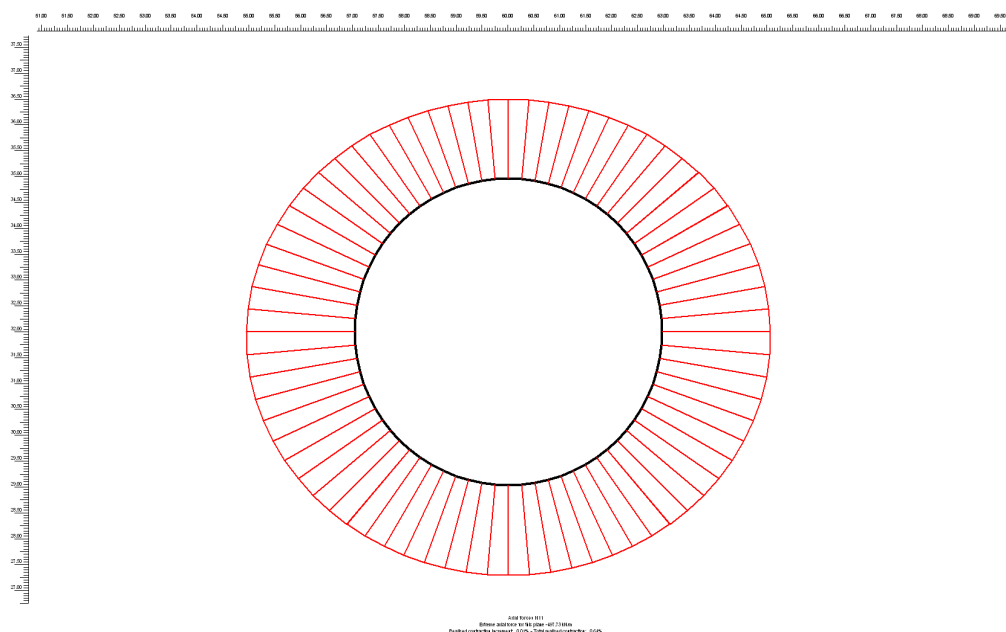


Figura 4.11: Diagramma dello sforzo normale (Analisi 4)

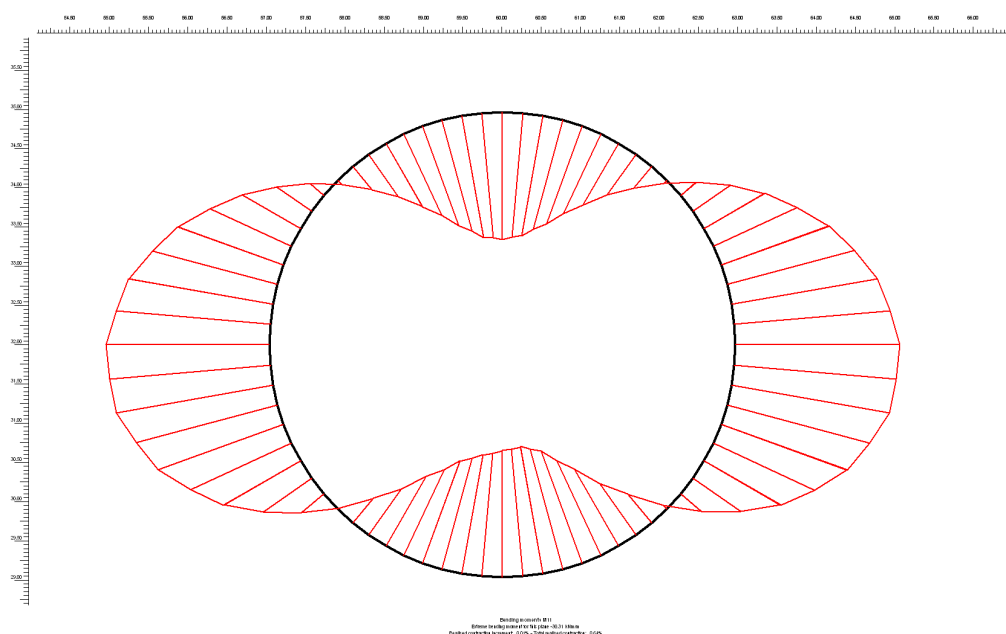


Figura 4.12: Diagramma del momento flettente (Analisi 4)