



ANAS S.p.A.

Direzione Centrale Programmazione Progettazione

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA
ITINERARIO AGRIGENTO –CALTANISSETTA–A19

S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE"

AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001
Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19

PROGETTO DEFINITIVO

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

ATI:
TECHNITAL s.p.a. (mandataria)
S.I.S. Studio di Ingegneria Stradale s.r.l.
DELTA Ingegneria s.r.l.
INFRATEC s.r.l Consulting Engineering
PROGIN s.p.a.

I RESPONSABILI DI PROGETTO

Dott. Ing. M. Raccosta
Ordine Ing. Verona n° A1665
Prof. Ing. A. Bevilacqua
Ordine Ing. Palermo n° 4058
Dott. Ing. M. Carlino
Ordine Ing. Agrigento n° A628
Dott. Ing. N. Troccoli
Ordine Ing. Potenza n° 836
Dott. Ing. S. Esposito
Ordine Ing. Roma n° 20837

IL GEOLOGO

INTEGRAZIONE PRESTAZIONI
SPECIALISTICHE

Dott. Ing. M. Raccosta

VISTO:IL RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Massimiliano Fidenzi

VISTO:IL RESPONSABILE DEL
SERVIZIO PROGETTAZIONE

Dott. Ing. Antonio Valente

DATA

PROTOCOLLO

OPERE D'ARTE MAGGIORI: GALLERIE NATURALI
RELAZIONI

RELAZIONE DI CALCOLO
GALLERIA NATURALE CALTANISSETTA

CODICE PROGETTO		NOME FILE	REVISIONE	FOGLIO	SCALA:
L0407B D 0501		L0407B_D_0501_T01_GN01_STR_RE04_B.DOC	B	-- DI --	-----
CODICE ELAB.		T01GN01STRRE04			
D					
C					
B	REVISIONE A SEGUITO ISTRUTTORIA ANAS DEL 19/03/2007	Aprile 2007	L. Cedrone	F. Arciuli	C. Marro
A	EMISSIONE	Ottobre 2006	L. Cedrone	F. Arciuli	C. Marro
REV.	DESCRIZIONE	DATA	VERIFICATO RESP. TECNICO	CONTROLLATO RESP. D'ITINERARIO	APPROVATO RESP. DI SETTORE

INDICE

- 1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO**
- 2. PREMESSA**
- 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO, E IDROGEOLOGICO (FASE CONOSCITIVA)**
- 4. CONSIDERAZIONI TECNICHE GENERALI**
 - 4.1 Caratteristiche Del Rivestimento Definitivo In Conci Prefabbricati**
 - 4.2 Riempimento a tergo dei conci**
 - 4.3 Considerazioni sul tipo di fresa**
- 5. ANALISI CON LINEE CARATTERISTICHE**
- 6. DEFINIZIONE DEGLI STATI LIMITI**
 - 6.1 Caratteristiche Dei Materiali**
 - 6.2 Coefficienti di sicurezza sulla resistenza dei materiali**
 - 6.3 Coefficienti di amplificazione delle sollecitazioni**
- 7. VERIFICHE IN ESERCIZIO: RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE**
 - 7.1 Geometria del modello: individuazione della sezione di calcolo**
 - 7.2 Parametri di calcolo**
 - 7.3 Caratteristiche del rivestimento in conci**
 - 7.4 Fasi di calcolo**
- 8. VERIFICHE STATICHE**
 - 8.1 Verifiche allo stato limite ultimo**
 - 8.1.1 Verifica a pressoflessione**
 - 8.1.2 Verifica delle azioni taglianti**
 - 8.1.3 Verifiche allo stato limite di esercizio**
 - 8.1.4 Verifiche allo stato per fessurazione**
- 9 VERIFICHE STATICHE IN FASE TRANSITORIA**
 - 9.1 Scasseratura**
 - 9.2 Movimentazione e Stoccaggio**
 - 9.3 Spinta dei Martinetti**
- 10 MONITORAGGIO**
- 11 CONCLUSIONI E ALLEGATI**

1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

- • Legge n° 1086 del 05/11/1971: “Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica”.
- • D.M. LL.PP. 14/02/1992 e relative istruzioni emanate con Circ. n° 37406/STC del 24/06/1993: “Norme tecniche per l’esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche”.
- • D.M. LL.PP. 11/03/1988: “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- • D.M. LL.PP. 12/02/1982 e relative istruzioni emanate con Circ. n° 22631 del 24/05/1982: “Aggiornamento delle norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica della sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”.
- • D.M. LL.PP. 09/01/1996: “Norme tecniche per il calcolo, l’esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche”.
- • Norme CNR 10011/85: “Costruzioni di acciaio: Istruzioni per il calcolo, l’esecuzione, il collaudo e la manutenzione”.
- • D.M. LL.PP. 16/01/1996: “Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”.

2. PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del progetto definitivo dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 all'interno del quale è previsto l'adeguamento alla categoria B della S.S. 640 secondo le norme del D.M. 5.11.2001.

In funzione delle caratteristiche geomeccaniche delle formazioni attraversate dalla galleria Caltanissetta, analizzate nella specifica relazione, verranno nel seguito affrontate le problematiche connesse alla realizzazione dello scavo e alla verifica del rivestimento definitivo.

Verranno successivamente illustrate le analisi svolte mediante i metodi delle linee caratteristiche e delle differenze finite e i risultati ottenuti per lo studio in esame.

Le gallerie in questione verranno scavate mediante fresa a piena sezione. La tipologia di macchina da adottare per lo scavo è un problema che dovrà essere necessariamente affrontato nei successivi step progettuali, in questa fase si ritiene comunque opportuno fare delle ipotesi sulla base del comportamento del terreno nei confronti dello scavo.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO (FASE CONOSCITIVA)

Indagini: Sondaggi S25 – S26 – S27 – S28 – S29.

L'opera è caratterizzata dalla presenza di marne argillose ed argille marnose di colore grigio chiaro, con locali intercalazioni di marne calcaree. La formazione è ritenuta, geologicamente, assimilabile ai Trubi e pertanto databile al Pliocene inferiore. Sono presenti anche intercalazioni di argille grigie a struttura brecciata.

Le marne argillose e/o argille marnose si dimostrano molto consistenti tanto che tutte le prove con pocket penetrometer forniscono valori ampiamente fuori scala (>5 Kg/cmq).

Il terreno è certamente sovraconsolidato. Si può considerare un grado di sovraconsolidazione variabile tra 1,5 – 3.

Nella galleria Caltanissetta in seno alle marne argillose sono presenti anche argille brecciate in condizioni di eteropia di facies. Tali argille, sovraconsolidate e consistenti, si differenziano in maniera evidente per la presenza di una struttura costituita da minute scaglie argillitiche di aspetto traslucido immerse in una pasta di fondo limo argillosa. La presenza del litotipo in argomento ha una estrema variabilità in senso sia verticale che laterale senza che regole geologiche consentano di prevederne l'esatta successione

Le caratteristiche granulometriche del materiale sembrano essere analoghe a quelle delle marne argillose sopra descritte da cui derivano per un processo di colate e frane sinsedimentarie. Esse evidenziano caratteristiche di resistenza e deformabilità dello stesso ordine di grandezza della marne argillose sopra descritte.

4. CONSIDERAZIONI TECNICHE GENERALI

I concetti alla base del metodo ADECO-RS possono essere trasferiti allo scavo meccanizzato in quanto le problematiche di stabilità del fronte di scavo influenzano la tipologia di fresa da utilizzare, l'eventuale necessità di mantenere il fronte in pressione o di eseguire infilaggi al fronte con chiodi in VTR per contenere le deformazioni.

La valutazione dell'evoluzione dello stato tensionale nel terreno a seguito della realizzazione di una galleria viene condotta attraverso l'analisi dei fenomeni deformativi del mezzo attraversato, che forniscono informazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine.

Utilizzando lo scavo meccanizzato il problema principale è la stabilità del fronte di scavo nel breve o brevissimo tempo, in quanto la velocità di scavo è tale che (a meno di non scavare in terreni granulari) le problematiche legate alla stabilità nel lungo termine sono secondarie se non praticamente nulle.

Risolto il problema della stabilità del fronte, il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza nei confronti della stabilità del cavo a lungo termine.

4.1 Caratteristiche Del Rivestimento Definitivo In Conci Prefabbricati

Il rivestimento definitivo è composto da un anello composto da 7 conci, 6 dei quali hanno uno sviluppo in estradosso di circa 6.4 m mentre il concio cosiddetto "di chiave" ha uno sviluppo in estradosso di 2.61 m circa. Lo spessore dei conci è di 45 cm.

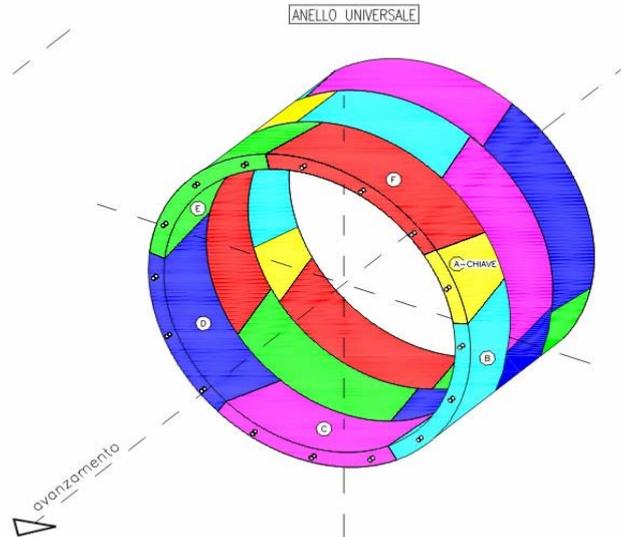
Si prevede l'utilizzo un anello di tipo universale, che consente, mediante la semplice rotazione attorno al proprio asse di un anello rispetto al precedente, di seguire l'andamento piano-altimetrico del tracciato e di apportare le eventuali correzioni in corso d'opera, senza ricorrere ad elementi speciali.

Le caratteristiche geometriche principali di tale anello sono le seguenti:

diametro esterno: 12.90 m

diametro interno: 12 m

spessore: 0.45 m
lunghezza media: 1.20 m
numero di conci: 7 (6 + 1 concio di chiave)



Anello universale

Le caratteristiche degli inserti e delle guarnizioni, nonché i dati della macchina (spinta dei martinetti), dovranno essere definiti in accordo con l'Impresa e/o dai fornitori o costruttori nelle successive fasi progettuali.

Di particolare interesse è il concio di chiave che risulta essere l'ultimo ad essere posizionato nella sequenza di montaggio dell'anello e ha la funzione di solidarizzare la struttura una volta completato il montaggio. Esso infatti viene realizzato a forma di 'cuneo' e durante il suo inserimento va a serrare i giunti longitudinali (quelli presenti tra conci adiacenti di uno stesso anello). Ovviamente i due conci adiacenti presentano l'inclinazione delle facce laterali complementari a quella del concio di chiave.

Gli altri 4 conci presentano i giunti longitudinali paralleli all'asse galleria. E' importante notare che a causa della forma dell'anello, delimitata da due sezioni non parallele, ogni concio ha una propria geometria e non esistono due elementi perfettamente uguali. Inoltre la presenza della spinta della TBM (agente mediante gruppi di martinetti disposti lungo tutta la circonferenza) comporta che i conci abbiano un proprio verso di avanzamento: a tergo delle facce sulle quali si esercitano i carichi concentrati dei martinetti è presente una

specifica armatura di frettaggio che manca invece sulle facce opposte. (tale armatura è funzione del numero di martinetti e della spinta da essi esercitata.)

Sulle facce laterali di ogni concio sono disposti i fori per l'inserimento dei bulloni.

Ogni concio è dotato di quattro fori troncoconici radiali predisposti per l'inserimento del perno temporaneo per il supporto del passaggio del back-up. Alcuni di questi fori vengono impiegati per l'iniezione del riempimento a tergo del rivestimento.

Sulle quattro facce di giunto è presente una scanalatura per il posizionamento della guarnizione.

I conci non sono dotati di spigoli "vivi" ma di smussi che rendono tali zone meno soggette a fratture e lesioni locali durante le fasi di movimentazione e montaggio inoltre permettono la scasseratura dei conci stessi.

La conicità del singolo anello consente, senza l'impiego di elementi speciali, di seguire l'andamento planoaltimetrico del tracciato con una serie continua di approssimazioni e correzioni delle deviazioni della macchina in fase di avanzamento, ottenute semplicemente sfalsando le posizioni relative dei conci tra anelli successivi. Bisognerà comunque avere cura di evitare il ripetersi di sequenze di installazione uguali tra anelli contigui, per non formare giunti tra conci allineati longitudinalmente.

Assume un ruolo fondamentale il corretto studio di impostazione del software di gestione del sistema di guida da parte del costruttore della macchina, che dovrà in corso d'opera, sulla base delle risultanze del controllo topografico dell'effettivo andamento planoaltimetrico tenuto dalla macchina, fornire al sistema di controllo dell'ereuttore la più adeguata sequenza di installazione dei conci del singolo anello. Il rivestimento definitivo, oltre a svolgere e garantire la normale funzione di sostegno a breve e a lungo termine, deve nel caso specifico fornire la richiesta tenuta idraulica.

Non ritenendo sufficiente le garanzie fornite dalla iniezione di intasamento a tergo dei conci, si prevede di munire i conci di appositi inserti e delle guarnizioni, i quali dovranno essere definiti in accordo con l'Impresa e/o dai fornitori o costruttori nelle successive fasi progettuali.

4.2 Riempimento a tergo dei conci

In ogni scavo meccanizzato, nel quale si preveda la posa in opera immediata del rivestimento definitivo in conci prefabbricati all'interno del mantello, rimane uno spazio

anulare tra l'estradosso dei conci stessi ed il profilo di scavo, dell'ordine di alcuni centimetri. Lo scudo dovrà perciò essere dotato di un sistema in grado di colmare lo spazio anulare suddetto nel momento stesso in cui si origina.

La metodologia che si ritiene offra le migliori garanzia prevede il pompaggio di una apposita malta (o betoncino) attraverso ugelli posti lungo la circonferenza della coda dello scudo, consentendo così di colmare lo spazio anulare tra lo scudo ed il rivestimento immediatamente dietro lo scudo.

Una volta completato il montaggio dell'anello di conci prefabbricati è necessario provvedere al riempimento dell'intercapedine presente tra il profilo di scavo e l'estradosso del rivestimento. La sua funzione principale nel progetto in esame è quello di assicurare l'inghisaggio dei conci al terreno.

La malta (o betoncino) al momento del pompaggio è mantenuta in pressione grazie alla presenza di un cassero di testata in modo da contrastare la tendenza del terreno ad assestarsi attorno al rivestimento prefabbricato, minimizzando così il rischio di cedimenti superficiali.

In particolare sarà necessario assicurare un letto di malta cementizia al momento dell'uscita dei conci dalla coda dello scudo in modo da ridurre l'affondamento dell'anello seppur vincolato a quello precedente dai bulloni. In seguito sarà necessario iniettare a tergo dei conci il pea-grevel e quindi la malta di cementazione.

Una volta inghisato il rivestimento al terreno sarà possibile rimuovere i bulloni posti in opera al momento del montaggio di ogni singolo anello.

Nello specifico si tratta di colmare uno spazio anulare teorico tra l'estradosso dei conci stessi ed il profilo di scavo di 10 cm di spessore.

Tale valore risulta spesso maggiore a causa degli extrascavi generati in fase di scavo. In ogni caso dovrà essere garantito il completo intasamento di tale vuoto.

L'intasamento del vuoto verrà così eseguito:

- Esecuzione di un letto di malta cementizia su $90^\circ \div 120^\circ$ all'arco rovescio per ridurre l'affondamento dell'anello, seppur ancorato a quello precedente mediante i bulloni. La malta sarà composta indicativamente dal cemento tipo 525 nella misura di 5 q/mc, da sabbia lavata nella misura di 1.05 mc/mc e da additivi superfluidificanti.

Il letto di malta dovrà essere eseguito immediatamente al momento dell'uscita dei conci dalla coda dello scudo, da fori radiali predisposti nei conci stessi.

- Intasamento della parte restante dell'anello con ghiaietto monogranulare 6 mm, pulito e di forma rotonda non appiattita (pea-grevel). Il ghiaietto deve essere costituito da elementi omogenei derivanti da rocce sane e resistenti. L'intasamento dei conci deve seguire il più presto possibile, da fori radiali predisposti sui conci stessi. Le operazioni di intasamento con pea-grevel devono essere completate entro 4,5 m dall'uscita dei conci dalla coda dello scudo.
- Immissione della restante parte dell'anello per l'inghisaggio dei conci sarà eseguita mediante boiaccia a base di cemento tipo 525, con rapporto a/c non superiore a 1 e con l'aggiunta di superfluidificante. L'inghisaggio dovrà avvenire entro 30 m dal fronte, dai fori predisposti.

L'intasamento a tergo dei conci avverrà attraverso le due coppie di fori presenti sui conci prefabbricati. L'iniezione avverrà solo attraverso alcuni di detti fori garantendo comunque il perfetto riempimento dello spazio anulare fra conci e terreno

4.3 Considerazioni sul tipo di fresa

Sebbene le problematiche legate al tipo di fresa da utilizzare sono un aspetto che andrà affrontato in sede di progettazione esecutiva eventualmente di concerto con il costruttore si ritiene utile fare alcune considerazioni: Date le dimensioni dello scavo e le caratteristiche di resistenza e deformabilità della galleria il comportamento risultante in base ai risultati della curva caratteristica è di tipo C. In queste condizioni appare indispensabile l'utilizzo di un sistema di sostegno al fronte, appare quindi possibile l'utilizzo di una EPB oppure di una Mixschild. La seconda ipotesi è legata alla possibilità di scavare tratti di galleria in buone condizioni geomeccaniche senza la necessità di utilizzo di pressioni al fronte.

In ogni caso la macchina dovrà essere dotata della possibilità di effettuare consolidamenti in avanzamento mediante infilaggi da eseguire dal retro macchina.

5. ANALISI CON LINEE CARATTERISTICHE

E' stato effettuato un predimensionamento, mediante il metodo delle linee caratteristiche, con la massima copertura della tratta (110m).

I parametri di calcolo utilizzati sono quelli dichiarati nella relazione geotecnica. Si è considerato un raggio di scavo pari a 6.5 m con un spessore dei conci pari a 45 cm. Le analisi tengono conto del contributo che può dare la TBM in termini di pressioni al fronte. Il contributo in termini di resistenza di mezzo nucleo che fornisce tale pressione è

calcolabile col metodo della coesione equivalente. Ponendo $\sigma_3 = 350$ kPa (pressione ipotizzata al fronte) si ottiene che il valore delle resistenza di mezzo nucleo, corrispondente alla pressione esercitata, dalla macchina sarà pari ad :

Copertura pari a 110 m

$$\Delta c = \frac{\sigma_3}{2} \tan(45 + \varphi' / 2) = 270 \text{ kPa}$$

La resistenza di mezzo nucleo risulta: $R_{1/2} = \Delta c * Kp^{0.5} + c * Kp^{0.5} = 445$ kPa

Il valore di riferimento della pressione agente sul rivestimento in conci è stato ricavato con la curva caratteristica del rivestimento stesso:

$$q = k_s \frac{u}{a} \text{ dove}$$

k_s = rigidezza del rivestimento

q = pressione agente

u = spostamento

a = raggio interno del rivestimento

Il Modulo elastico del Cls per un Rck pari a 45 MPa è stato posto pari a 38000 MPa.

Dalle curve caratteristiche si ottiene che, al momento dell'istallazione del rivestimento risulta $P=61.90$ t/m² (pressione sul rivestimento) $u=8.00$ cm (spostamento radiale). Tale pressione risulta essere pari al 28 % del carico litostatico (220 t/m²) per cui nei calcoli prima dell'installazione del rivestimento verrà scaricato il 70 % del carico litostatico.

Le tensione nel rivestimento è stata valutata adottando la formula di Mariotte valida per

anelli sottili, (poiché $s/r < 0.11$): $\sigma_c = \frac{P \cdot R}{s}$ dove

p = pressione esercitata sul rivestimento

s = spessore

R = raggio di scavo

Da cui si ottiene: $\sigma_c = 9$ MPa

Valutazione dei rilasci tensionali in fase di scavo

Dati

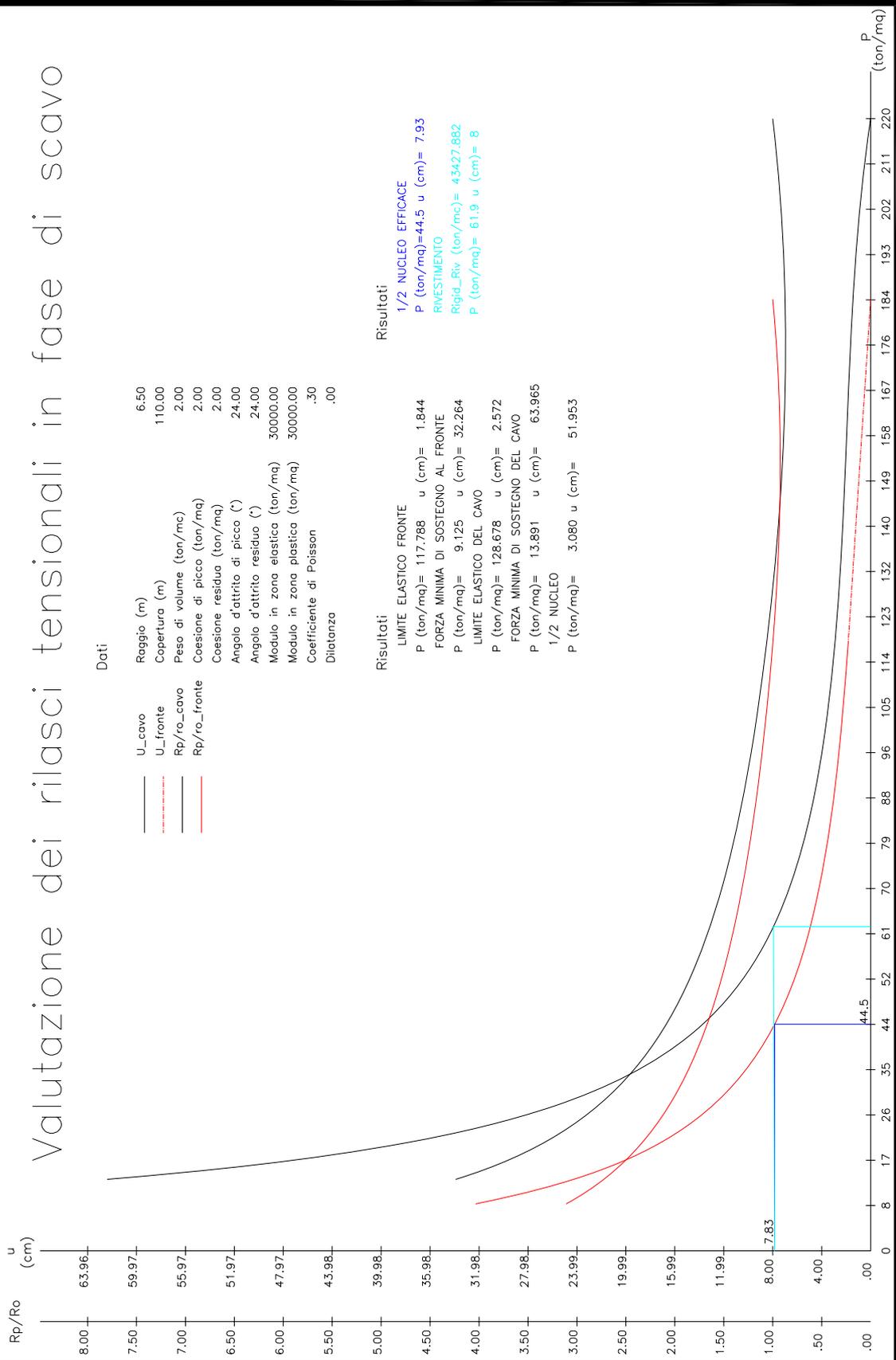
U_cavo	6.50
U_fronte	110.00
Rp/ro_cavo	2.00
Rp/ro_fronte	2.00
Angolo d'attrito di picco (°)	24.00
Angolo d'attrito residuo (°)	24.00
Modulo in zona elastica (ton/mq)	30000.00
Modulo in zona plastica (ton/mq)	30000.00
Coefficiente di Poisson	.30
Dilatazza	.00

Risultati

LIMITE ELASTICO FRONTE	
P (ton/mq)= 117.788	u (cm)= 1.844
FORZA MINIMA DI SOSTEGNO AL FRONTE	
P (ton/mq)= 9.125	u (cm)= 32.264
LIMITE ELASTICO DEL CAVO	
P (ton/mq)= 128.678	u (cm)= 2.572
FORZA MINIMA DI SOSTEGNO DEL CAVO	
P (ton/mq)= 13.891	u (cm)= 63.965
1/2 NUCLEO	
P (ton/mq)= 3.080	u (cm)= 51.953

Risultati

1/2 NUCLEO EFFICACE	
P (ton/mq)=44.5	u (cm)= 7.93
RIVESTIMENTO	
Rigid_Riv (ton/mc)= 43427.882	
P (ton/mq)= 61.9	u (cm)= 8



6. DEFINIZIONE DEGLI STATI LIMITI

Di seguito si riportano le verifiche statiche relativi ai conci prefabbricati effettuate mediante l'ausilio del codice di calcolo alle differenze finite FLAC 2D.

Le verifiche statiche dei conci prefabbricati sono eseguite mediante il metodo agli stati limite definendo, anzitutto, le sollecitazioni di progetto N_d , M_d , T_d , determinati nelle diverse fasi delle analisi numeriche, successivamente è stata verificata la loro appartenenza ai domini di resistenza in relazione alle percentuale di armatura adottata per i conci.

6.1 Caratteristiche Dei Materiali

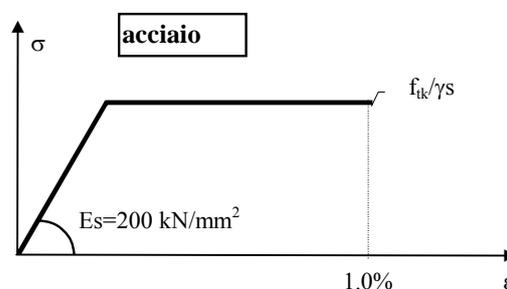
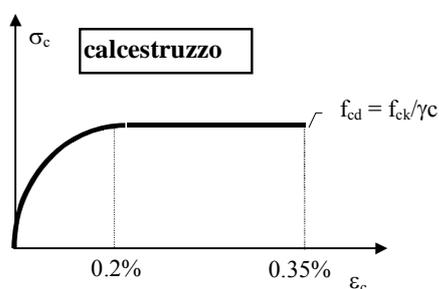
Per quanto riguarda le caratteristiche dei materiali utilizzate nei calcoli di verifica, si è considerato:

CALCESTRUZZO:

classe (resistenza caratteristica cubica):	R_{ck} 45 MPa
resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck}=0.83 \times R_{ck} = 37.4$ MPa
resistenza caratteristica a trazione:	$f_{ctk}=0.7 \times 0.269 \times (R_{ck})^{2/3} = 2.4$ MPa
modulo elastico:	$E_c=5700 \times R_{ck}^{0.5} = 38250$ MPa
massima deformazione di accorciamento:	$\varepsilon_c = 3.5 \text{ ‰}$

ACCIAIO PER ARMATURA:

tipo:	FeB 44 K
tensione caratteristica di snervamento:	$f_{yk} = 435$ MPa
modulo elastico:	$E_s = 210000$ MPa
massima deformazione di allungamento:	$\varepsilon_a = 10 \text{ ‰}$



6.2 Coefficienti di sicurezza sulla resistenza dei materiali

Per il calcolo delle azioni resistenti della sezione sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di sicurezza (a dividere i valori di resistenza dei materiali).

- per la resistenza a compressione del cls.: $\gamma_c=1.6$
- per la resistenza dell'acciaio: $\gamma_a=1.15$

Per tenere conto della diminuzione della resistenza del calcestruzzo sottoposto a carichi di lunga durata, nelle verifiche in fase definitiva la resistenza caratteristica cilindrica (f_{ck}) viene opportunamente ridotta di un ulteriore coefficiente pari a 0.85.

I valori di calcolo delle resistenze del calcestruzzo e dell'acciaio risultano quindi:

- $f_{cd1}=0.85 \times f_{ck} / \gamma_c = 19.8 \text{ MPa}$

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di lunga durata).

- $f_{cd2}=f_{ck} / \gamma_c = 23.3 \text{ MPa}$

resistenza di calcolo a compressione del cls (carichi di breve durata).

- $f_{ctd}=f_{ctk} / \gamma_c = 1.5 \text{ MPa}$ resistenza di calcolo a trazione del cls.
- $f_{yd}=f_{yk} / \gamma_a = 378 \text{ MPa}$ resistenza di calcolo a snervamento dell'acciaio

In presenza di carichi localizzati sulla superficie del calcestruzzo viene tollerata una resistenza a compressione che può raggiungere il valore limite di $f_{cd,loc}=f_{ck} / 1.1=34.0 \text{ MPa}$ (secondo quanto previsto dalle norme per le piastre di ancoraggio degli elementi in calcestruzzo armato precompresso).

6.3 Coefficienti di amplificazione delle sollecitazioni

Le sollecitazioni agenti sulla sezione nelle diverse condizioni di carico, sia in fase definitiva che in fase transitoria vengono amplificate secondo un coefficiente di sicurezza

pari a $\gamma_{gtu}=1.5$ per le verifiche agli stati limite ultimi, mentre $\gamma_{gte}=1.0$ per le verifiche agli stati limite di esercizio. Le sollecitazioni di calcolo sono quindi:

- $N_d = N \times \gamma_{gt}$
- $M_d = M \times \gamma_{gt}$
- $T_d = T \times \gamma_{gt}$

7. VERIFICHE IN ESERCIZIO: RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE

In questo capitolo vengono presentati i risultati delle analisi numeriche effettuate con il codice di calcolo FLAC 2D per la verifica statica del rivestimento in conci prefabbricati.

7.1 Geometria del modello: individuazione della sezione di calcolo

L'analisi tenso - deformativa è stata condotta in condizioni di deformazione piana, pertanto viene ritenuta rappresentativa di una sezione corrente di galleria.

E' stata presa in esame una porzione di continuo estesa per una profondità di 190 m circa dal piano campagna e per una ampiezza di 250 m; entro tale porzione sono state modellate le due gallerie con interasse di circa 35 m; la scelta di adottare l'interasse minimo, in corrispondenza della massima copertura (l'interasse è di circa 50 m) è dettata dalle necessità di studiare eventuali fenomeni d'interazione tra lo scavo delle due canne.

Il modello è costituito da circa 9600 elementi, le cui dimensioni sono state opportunamente ridotte nell'area di interesse per ottenere una maggiore accuratezza di calcolo. Il contorno del modello è stato vincolato lateralmente ed inferiormente mediante carrelli. La copertura considerata nel calcolo è di 110 m pari al valore massimo di copertura che si riscontra nella zona delle due gallerie.

La stratigrafia considerata nel modello di calcolo è caratterizzata, a partire dal piano campagna, da:

1. Calcari Marnosi dal piano campagna fino alla fine della mesh.

Il raggio, equivalente, di scavo della galleria è di circa 6,5m, con avanzamento a piena sezione; lo spessore del rivestimento definitivo in conci è di 0.45m.

7.2 Parametri di calcolo

Nell'analisi condotta si sono assunti, per caratterizzare l'ammasso, i parametri di resistenza (espressa con il criterio di Mohr-Coulomb) e di deformabilità riportati nella seguente tabella.

Proprietà geomeccaniche dell'ammasso

Materiale	γ (kN/m ³)	c' (MPa)	ϕ' (°)	E' (GPa)	ν'
Calcari marnosi	20	0.02	24	0,300	0.30

essendo:

γ = peso di volume

c = coesione

ϕ = angolo di attrito

E = modulo elastico di Young

ν = modulo di Poisson

E' stato utilizzato un legame costitutivo elastico-plastico ideale (parametri di resistenza residui coincidenti con quelli di picco), con criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Il rapporto K_0 tra le tensioni iniziali orizzontali e verticali è pari a 0.8.

7.3 Caratteristiche del rivestimento in conci

Il rivestimento definitivo in conci armati è stato modellato attraverso una successione di aste rettilinee, elementi tipo "beam", collegate con continuità tra loro ed ai nodi del reticolo giacenti sul contorno delle due gallerie. In questo modo sono state ottenute le sollecitazioni agenti sul rivestimento stesso in termini di azioni interne.

Le aste che rappresentano il rivestimento definitivo sono state inserite quali ‘continue’ ossia in grado di trasferire i momenti flettenti in ogni sezione con la medesima rigidità. In realtà il rivestimento è costituito da conci discontinui sfalsati e collegati longitudinalmente da connettori meccanici.

Tale architettura del rivestimento permetterebbe una schematizzazione come anello di conci avente, in corrispondenza dei giunti, una rigidità a flessione ridotta. In ogni caso si ritiene che il comportamento del complesso conci sfalsati, connettori meccanici e spinte del terreno abbia un comportamento globale a “guscio”. Del resto tale posizione risulta anche cautelativa in quanto porta a calcolare momenti flettenti più elevati rispetto ad uno schema che preveda rigidità flessionali ridotte.

Il rivestimento viene inserito nel modello dopo un rilascio a vuoto delle forze di scavo. Si riesce così a simulare l’effetto tridimensionale del passaggio del fronte che determina un deconfinamento dell’ammasso prima della chiusura dell’anello di conci.

In base al modello geologico ed idrogeologico proposto non è possibile escludere la presenza di pressioni idrauliche a tergo del rivestimento. Pertanto nelle fasi finali del calcolo sono state applicate delle forze radiali equivalenti alla pressione esercitata da 10 m di battente sopra la galleria. Tale condizione permette anche di tener conto di eventuali sovrappressioni indotte sul rivestimento in fase di iniezioni a tergo dei conci. Si fa notare che le pressioni idrauliche possono venire regimentate comunque mediante opportuni drenaggi.

Nella seguente tabella sono sintetizzati gli elementi principali per la costruzione dei modelli numerici:

γ = peso di volume = 25 kN/m³

E = modulo elastico di Young = 38000 MPa

ν = modulo di Poisson = 0.2

7.4 Fasi di calcolo

L’analisi è stata organizzata in cinque successive fasi di calcolo che consentono la simulazione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di

carico del rivestimento definitivo; le prime sei fasi di calcolo sono riferite alla simulazione della costruzione della canna destra, le rimanenti time si riferiscono alla simulazione della costruzione della canna sinistra.

I risultati più significativi sono riportati in relazione sotto forma di allegati grafici. Dall'esame di tali allegati è possibile ricavare lo stato tensionale e deformativo dell'ammasso interessato allo scavo, nonché dei rivestimenti della galleria. I risultati tensionali riportati negli allegati grafici sono descritti in termini di tensioni e sollecitazioni, espresse rispettivamente in Pa e N proporzionalmente ad una scala graduata. Le sollecitazioni ritenute rappresentative ai fini delle verifiche statiche sono pertanto segnalate nel seguito.

Per i rivestimenti, avendo impiegato elementi monodimensionali, dall'analisi si ottengono direttamente i valori delle sollecitazioni (forza normale N, forze di taglio T1 e T2 e momenti M1 e M2 agli estremi di ciascun elemento beam).

Descrizione delle fasi di scavo:

FASE 0 – Geostatico

In questa fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno, ovvero viene ricostruita in termini di sforzi e deformazioni la situazione iniziale preesistente alla costruzione delle gallerie.

FASE 1 – Scavo a piena sezione Canna dx

Si simula lo scavo della canna destra ipotizzando il passaggio della macchina, ad una distanza dal fronte di circa 10 m, prima della posa in opera dei conci. Si effettua una riduzione delle forze di scavo del 70 %.

FASE 2 - Avanzamento degli scavi e posizionamento del rivestimento definitivo canna dx

Viene simulata la messa in opera del rivestimento definitivo in conci prefabbricati della canna destra ($E=38\text{GPa}$); si effettua una riduzione delle forze di scavo pari al 100%.

FASE 3 – Scavo a piena sezione Canna sx

Si simula lo scavo della canna sinistra ipotizzando il passaggio della macchina, ad una distanza dal fronte di circa 10 m, prima della posa in opera dei conci. Si effettua una riduzione delle forze di scavo del 70 % .

FASE 4 - Avanzamento degli scavi e posizionamento del rivestimento definitivo canna sx

Viene simulata la messa in opera del rivestimento definitivo in conci prefabbricati della canna sinistra ($E=38\text{GPa}$); si effettua una riduzione delle forze di scavo pari al 100%.

FASE 5 –Applicazione del battente idraulico

Si ipotizza che il drenaggio al contorno delle gallerie e le caratteristiche di permeabilità dell'ammasso siano tali da indurre, a regime, un andamento pseudostatico della falda tale da raggiungere una altezza d'acqua, in corrispondenza della calotta, pari a circa 10 m. Pertanto in questa ultima fase di calcolo è stato applicato al contorno delle gallerie un sistema di forze equivalenti ad un battente d'acqua, sopra la calotta di circa 1 bar (100KPa).

8. VERIFICHE STATICHE

Nel seguente paragrafo vengono riportate le verifiche statiche relative alla fase di esercizio dei conci prefabbricati.

Il modello di calcolo fornisce sollecitazioni che si riferiscono ad un'estensione longitudinale della galleria di 1 m, basandosi sull'ipotesi che il rivestimento delle gallerie sia omogeneo ed abbia rigidità e resistenza indipendenti dallo sviluppo longitudinale. Data la discontinuità del rivestimento posto in opera, dovuta alla presenza dei giunti tra gli anelli, le verifiche vengono effettuate considerando che il momento flettente possa essere assorbito, a livello di trazioni, soltanto dove è presente la continuità strutturale.

Pertanto le verifiche sono condotte considerando due anelli consecutivi mentre l'armatura è quella relativa ad un solo anello.

8.1 Verifiche allo stato limite ultimo

8.1.1 Verifica a pressoflessione

Le verifiche delle sollecitazioni di pressoflessione sono state condotte nelle sezioni più significative dell'anello. In allegato si riporta, sotto forma di output grafico, l'andamento delle azioni interne nel rivestimento.

Di seguito sono riportati i valori delle sollecitazioni ottenute dal codice di calcolo, riferite ad un metro di sviluppo in direzione longitudinale, sia per la galleria di destra (scavata per prima) che quella di sinistra.

Le sollecitazioni di progetto sono riferite a 2.4 m di rivestimento definitivo e sono ottenute moltiplicando per il coefficiente di sicurezza $\gamma_{gtu}=1.5$.

I valori delle sollecitazioni di progetto possono essere inseriti all'interno del dominio di resistenza per la canna destra e sinistra, diversi a causa di un differente stato di sollecitazione .

Le sollecitazioni di seguito riportate si riferiscono alla fase finale del calcolo (fase5)

Canna destra

Elemento	H [cm]	N [KN/m]	M KN*m/m	N _d [KN]	M _d [KN*m]
104	45	-4468	-114.3	-16084	-411.48
29	45	-5856	84.50	-21082	305.42
51	45	-4731	-117.30	-17032	-422.3
78	45	-5434	69.45	-19562	250

Canna sinistra

Elemento	H [cm]	N [KN/m]	M KN*m/m	N _d [KN]	M _d [KN*m]
104	45	-4344	-69.42	-15638	-250
29	45	-4925	47.02	-17730	169.20
51	45	-4583	-73.30	-16450	-264
78	45	-4985	43.13	-17946	155

$N < 0$ se di compressione ; $M > 0$ se tende fibre all'estradosso

Come si osserva dalla precedente tabella il rivestimento del fornice destro (o comunque quello scavato per primo) risulta essere maggiormente sollecitato pertanto ,per esso, si dovrà prevedere una maggiore armatura. In sintesi si adotteranno le seguenti armature:

Canna destra

$$b = 240 \text{ cm}$$

$$h = 45 \text{ cm}$$

$$A'_f = 10 \phi 12 + 11 \phi 22 = 53.11 \text{ cm}^2$$

$$A_f = 10 \phi 12 + 11 \phi 22 = 53.11 \text{ cm}^2$$

In particolare il momento resistente in assenza di sollecitazione normale risulta:

$$- M_{resI}(N_{res}=0) = 707 \text{ kN*m}$$

Canna sinistra

$$b = 240 \text{ cm}$$

$$h = 45 \text{ cm}$$

$$A'_f = 10 \phi 12 = 11.3 \text{ cm}^2$$

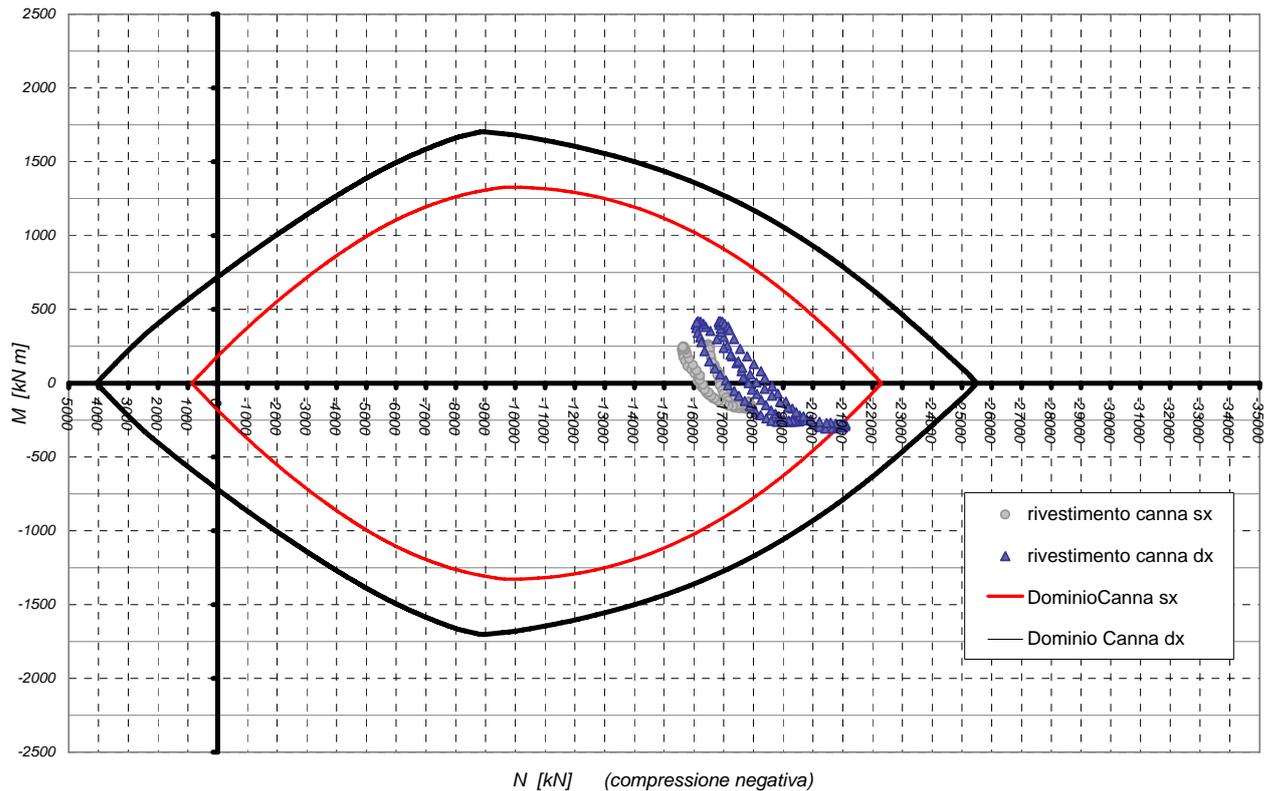
$$A_f = 10 \phi 12 = 11.3 \text{ cm}^2$$

In particolare il momento resistente in assenza di sollecitazione normale risulta:

$$- M_{resI}(N_{res}=0) = 175 \text{ kN*m}$$

Di seguito si riportano i domini di resistenza relativamente ai conci delle due canne; il dominio nero si riferisce alla canna destra, scavata per prima, mentre il dominio rosso si riferisce alla canna di sinistra, scavata in una fase successiva. Come si osserva dal diagramma la necessità di una diversa adozione di armatura dei conci è dovuto ad un effetto di interazione dello scavo delle due canne, infatti l'adozione di un armatura, per i conci, pari $10 \phi 12$ comporterebbe per diversi punti, relativi ai conci adiacenti alla canna sinistra, la collocazione fuori dal dominio di resistenza.

VERIFICA ALLO S.L.U. - SOLLECITAZIONEDI PRESSOFLESSIONE



8.1.2 Considerazioni sull'armatura dei conci

I calcoli alle differenze finite sono stati eseguiti considerando un'interasse medio tra le canne della galleria Caltanissetta pari a circa 35 m, in queste condizioni date le dimensioni notevoli dello scavo e i parametri di resistenza e deformabilità relativamente non elevati, la canna che viene scavata per prima risente degli effetti indotti al contorno dello scavo dalla realizzazione della seconda canna. Questo aspetto è in parte confermato dalla linea caratteristica condotta per la valutazione dei rilasci tensionali; infatti a fronte contenuto attraverso la pressione esercitata dalla fresa il raggio plastico assume un valore confrontabile con il raggio della galleria. Cautelativamente considerando la variabilità della pressione esercitata ed una variabilità del modulo elastico che a basse coperture potrebbe risultare inferiore si può assumere per il raggio plastico una variabilità compresa tra 1 e 3 volte il raggio di scavo. Questo vuol significare che il setto di terreno tra le due canne può sviluppare deformazioni plastiche in seguito allo scavo che provocano notevoli incrementi di carico sul rivestimento (questo aspetto può essere osservato anche dalle figure allegate relative all'analisi numerica condotta). Alla luce di quanto affermato si può ritenere ragionevole armare la galleria così come indicato nella presente relazione per tutto il tratto di tracciato in cui la distanza tra le canne si mantiene inferiore a 40/45 m e che

vale circa 2600 m i restanti 1250 m circa possono essere armati con l'armatura relativa alla canna scavata per seconda. Infine prescindendo da queste considerazioni va sottolineato che i quantitativi di armatura adottati vanno visti alla luce del comportamento che nel lungo termine potrebbe avere il terreno al contorno del rivestimento il quale potrebbe esercitare spinte notevoli in relazione al detensionamento subito e i cui effetti non si producono nel breve termine.

8.1.3 Verifica delle azioni taglianti

L'armatura trasversale che viene considerata nelle verifiche a taglio è costituita da staffe a due bracci ϕ 8 passo 25 cm. La massima sollecitazione al taglio che viene sopportata dalla sezione del singolo concio per rottura del conglomerato compresso è:

- $T_{res1} = 0.3 f_{cd1} \cdot b \cdot d = 3207 \text{ kN}$ per carichi di lunga durata
- $T_{res1} = 0.3 f_{cd2} \cdot b \cdot d = 3774 \text{ kN}$ per carichi di breve durata

(b =larghezza della sezione=1.2 m d =altezza della sezione=0.45 m)

La massima sollecitazione al taglio sopportata dalla sezione per snervamento delle armature trasversali è:

- $T_{res2} = 0.6 f_{ctd} \cdot b \cdot d + A_s/s f_{yd} \cdot 0.9 \cdot d = 622 \text{ kN}$

(s =passo dell'armatura trasversale di area A_s)

La sollecitazione di taglio ultima della sezione coincide quindi con il minore tra i due valori sopra calcolati:

- $T_{res} = \min(T_{res1}, T_{res2}) = 622 \text{ kN}$

La massima sollecitazione di taglio per unità di lunghezza ottenuta vale $T=40.55 \text{ kN/m}$ (relativa alla canna destra) equivalente ad una sollecitazione di calcolo agente su due anelli consecutivi di rivestimento pari a:

- $T_d = T \times 2.4 \times \gamma_g = 40.55 \times 2.4 \times 1.5 = 146 \text{ kN} < T_{res} = 622 \text{ kN}$

8.1.4 Verifiche allo stato limite di esercizio

Le condizioni ambientali più gravose per i conci si stabiliscono in fase definitiva con il rivestimento completato; tali condizioni possono considerarsi appartenenti al gruppo “b” (moderatamente aggressivo, caratterizzato da elevata umidità relativa in assenza di vapori corrosivi), pertanto le massime tensioni tollerate nei materiali sono le seguenti:

CLS.

- σ_{\max} per combinaz. di carico rara $0.60 \cdot f_{ck} = 22.4 \text{ MPa}$
- σ_{\max} per combinaz. di carico quasi permanente $0.45 \cdot f_{ck} = 16.8 \text{ MPa}$

ACC.

- σ_{\max} $0.7 \cdot f_{yk} = 308 \text{ MPa}$

Si verifica pertanto che il rivestimento in conci, in ogni fase transitoria e definitiva, non raggiunga gli stati limite di esercizio sopra definiti. I calcoli delle tensioni agenti vengono eseguite considerando la possibile parzializzazione della sezione (resistenza a trazione nulla del calcestruzzo) e con un comportamento elastico lineare sia per l'acciaio che per il calcestruzzo compresso.

Canna destra

Elemento	H [cm]	N [KN/m]	M KN*m/m	N _d [KN]	M _d [KN*m]	σ_{cls} [MPa]	σ_s [MPa]
104	45	-4468	-114.3	-10723	-274	11.4	159.8
29	45	-5856	84.50	-14055	203	13.3	192.3
51	45	-4731	-117.30	-11355	-282	11.97	168.3
78	45	-5434	69.45	-13042	167	12.20	166.6

Canna sinistra

Elemento	H [cm]	N [KN/m]	M KN*m/m	N _d [KN]	M _d [KN*m]	σ_b [MPa]	σ_a [MPa]
104	45	-4344	-69.42	-10425	-166	7.3	162.1
29	45	-4925	47.02	-11820	113	11.8	146.7
51	45	-4583	-73.30	-10999	-176	7.6	171.0
78	45	-4985	43.13	-11964	104	11.9	149.8

σ = tensioni positive di compressione

N < 0 se di compressione

M > 0 se tende fibre estradosso

Le tensioni rientrano nei valori progettuali fissati.

8.1.5 Verifiche allo stato per fessurazione

Per le condizioni ambientali di tipo “a” (ambiente poco aggressivo) e per armatura poco sensibile si hanno i seguenti valori limiti per l’apertura delle fessure:

- $w_k \leq w_3 = 0.4$ mm per combinazioni di carico frequente
- $w_k \leq w_2 = 0.2$ mm per combinazioni di carico quasi permanente

Per le condizioni ambientali di tipo “b” (ambiente moderatamente aggressivo):

- $w_k \leq w_2 = 0.2$ mm per combinazioni di carico frequente
- $w_k \leq w_1 = 0.1$ mm per combinazioni di carico quasi permanente

In fase definitiva, concetti messi in opera, le sollecitazioni ottenute mantengono la sezione interamente compressa come si può evincere dall’analisi dello stato limite per tensioni d’esercizio; pertanto il calcestruzzo non è soggetto a fessurazione.

9 VERIFICHE STATICHE IN FASE TRANSITORIA

In questo paragrafo vengono esaminate le condizioni più gravose a cui sono sottoposti i concetti nelle fasi transitorie che precedono la posa in opera ed in particolare:

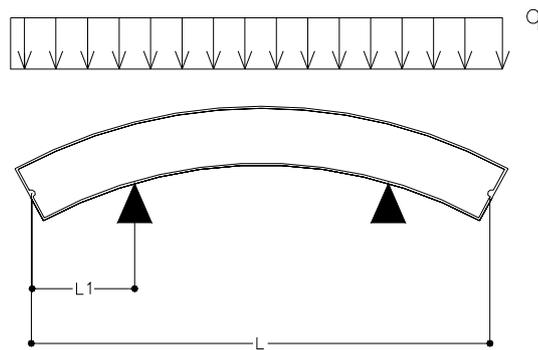
- Scasseratura
- Movimentazione
- Stoccaggio e trasporto
- Spinta dei martinetti*

*(dimensionamento di massima)

Si fa riferimento alle azioni e alla resistenza del singolo concio.

9.1 Scasseratura

Durante la fase di scasseratura, oltre al peso proprio del concio ed alla maggiorazione per carichi dinamici, si suppone la presenza delle forze di adesione alla superficie del cassero valutata in prima approssimazione, sulla base di esperienze analoghe, in circa 1000 Kg/m². Il calcolo delle sollecitazioni viene eseguito supponendo che il concio venga sollevato da due punti posti a circa 1/5 della lunghezza totale; tale condizione tende a minimizzare il momento massimo agente sulla sezione trasversale e pertanto deve essere rispettata oppure



sostituita da sistemi che determinano sollecitazioni meno gravose:

- peso proprio $P_p = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0.45 \times 1.2 = 13.50 \text{ kN/m}$
- sovracarico dinamico $D = 40\% P_p = 5.40 \text{ kN/m}$
- adesione $S = 1.2 \times 10 = 12 \text{ kN/m}$
- carico ripartito totale $q = P_p + D + S = 30.90 \text{ kN/m}$

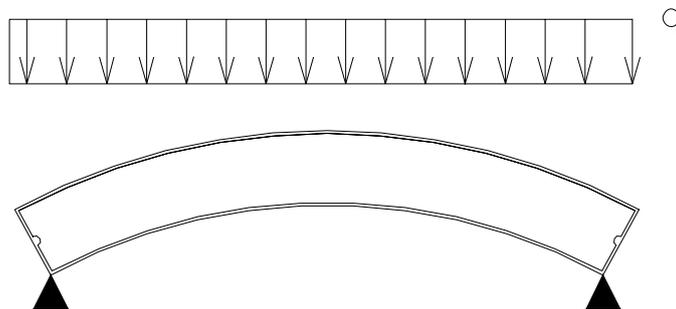
- momento flettente massimo $M = 1/2 \times q \times L1^2 = 1/2 \times 36 \times 1.2^2 = 22.25 \text{ kN m}$
- sforzo di taglio massimo $T = q \times L1 = 36 \times 1.2 = 37.08 \text{ kN}$

- $M_d = M \times 1.5 = 33.38 \text{ kN m}$ $M_d < M_{res1}$
- $T_d = T \times 1.5 = 55.62 \text{ kN}$ $T_d < T_{res}$

9.2 Movimentazione e Stoccaggio

Viene fatta l'ipotesi che il concio, durante queste fasi della lavorazione, si trovi poggiato alle estremità e sottoposto al peso proprio maggiorato dal carico dinamico:

- $P_p = 25 \times 0.45 \times 1.2 = 13.50 \text{ kN/m}$
- $q = P_p + 0.4 P_p = 18.90 \text{ kN/m}$
- $M = 1/8 \times q \times L^2 = 1/8 \times 18.90 \times 5.85^2 = 80.85 \text{ KNm}$
- $T = 1/2 \times q \times L = 1/2 \times 18.90 \times 5.85 = 55.28 \text{ KN}$



- $M_d = M \times 1.5 = 122 \text{ kN m}$ $M_d < M_{res1}$
- $T_d = T \times 1.5 = 83 \text{ kN}$ $T_d < T_{res}$

Per questa fase, che rappresenta le condizioni più sfavorevoli tra quelle che si verificano in fase provvisoria, viene eseguita la verifica agli stati limite di esercizio e di apertura delle fessure, riferendoci al caso di concio con minore armatura. I calcoli delle tensioni agenti sui materiali vengono eseguiti considerando la possibile parzializzazione della sezione (resistenza a trazione nulla del calcestruzzo) e con un comportamento elastico lineare sia per l'acciaio che per il calcestruzzo compresso.

$$M_d = M \cdot \gamma_{gfc} = 80.85 \text{ kN m} \qquad \sigma_b = 4.9 \text{ MPa} \qquad \sigma_a = 245.2 \text{ Mpa}$$

L'apertura delle fessure è pari a $w_k = 0.2 \text{ mm}$. Tale condizione si verifica in ambiente non aggressivo (fasi transitorie) in corrispondenza del quale il copriferro minimo di normativa risulta di $c_{\min} = 2 \text{ cm}$. I valori limiti di apertura delle fessure possono essere aumentati secondo il rapporto c/c_{\min} (purchè inferiore a 1.5). Dal momento che il copriferro rispettato nel presente progetto è di $c = 4 \text{ cm}$, **il valore limite di riferimento è $w_2 = 1.5 \times 0.2 = 0.3 \text{ mm}$.**

9.3 Spinta dei Martinetti

La spinta alla TBM è fornita da gruppi martinetti provvisti di piastra di ripartizione. Sebbene sia il numero di martinetti che le dimensioni della piastra di ripartizione vengono definite in sede di progetto esecutivo in accordo con il costruttore della macchina, per un predimensionamento si può ipotizzare una forza massima prevista per la spinta sul singolo gruppo di martinetti è $N_{max}=4500 \text{ kN}$ e un'area della piastra di ripartizione di $0.3 \text{ m}^2 = 100 \times 30 = (a \times b)$

La massima pressione di schiacciamento al di sotto delle piastre risulta (sotto tale ipotesi) verificata in quanto:

$$\sigma = N_{max} / (a \times b) = 15 \text{ Mpa}$$

La tensione di calcolo quindi:

$$\sigma_d = \sigma \times 1.5 = 22.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d < f_{cd,loc}$$

La spinta del martinetto determina inoltre una forza di divaricamento sul concio in direzione radiale che può essere stimata secondo la formula proposta da Leonardht :

$$F_t = 0.3 N_{max} (1 - a/h) = 445.5 \text{ kN} \quad \rightarrow \quad F_{td} = F_t \times 1.5 = 670 \text{ kN}$$

(in cui a =altezza della piastra=30 cm; h =altezza della sezione=45 cm).

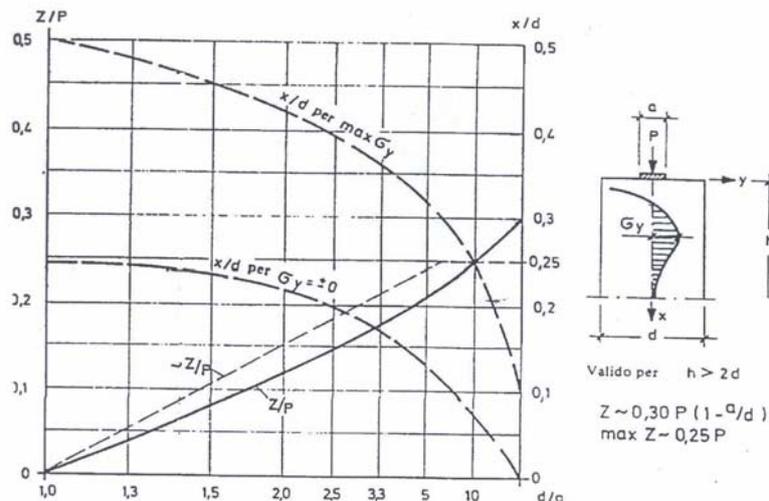
Va pertanto prevista una armatura per il frettaggio che preliminarmente si può assumere costituita da: **doppio strato di staffe a due bracci $\phi 10$ passo 10 cm**

Dal momento che ad ogni piastra di ripartizione di lunghezza 100 cm competono 10 staffe di ogni strato, l'area di acciaio competente consiste in:

$$A_s = 10 \times 2 \times 2 \times (\pi \phi^2 / 4) = 31.4 \text{ cm}^2 \text{ (a piastra di ripartizione)}$$

E la massima forza di trazione resistente:

$$F_{t,res} = A_s \times f_{yd} = 0.00157 \text{ m}^2 \times 378 \text{ MPa} = 1186.7 \text{ kN} > 670 \text{ kN} \quad \rightarrow \quad F_{td} < F_{t,res}$$



10 MONITORAGGIO

Il piano di monitoraggio per la galleria in esame va suddiviso in due fasi

- 1) Monitoraggio esterno
- 2) Monitoraggio interno

Il sistema di monitoraggio è stato studiato in modo da fornire un quadro dei principali effetti indotti dallo scavo con il progredire del suo avanzamento. Esso deve garantire la misura dei parametri significativi utili a verificare la sicurezza degli scavi e delle opere in superficie (eventualmente interferenti) e a decidere rapidamente le azioni correttive da attuare nel caso in cui si riscontrassero situazioni impreviste e potenzialmente pericolose. Al tal fine si è optato per il rilievo di un numero limitato di grandezze che garantiscano semplicità e praticità di monitoraggio e parallelamente completezza e precisione di informazione.

Il rilievo così eseguito permette in ogni momento di intervenire sui parametri di scavo modificandoli in base alle necessità.

Date le coperture e l'assenza di preesistenze superficiali che interagiscono direttamente con la galleria si ritiene più significativo concentrare la fase di monitoraggio nei rilievi in sotterraneo (nell'intorno della galleria):

- cedimenti di punti posti all'interno dei terreni sopra la calotta,
- spostamenti orizzontali lungo le verticali poste in prossimità della galleria,

- pressioni neutre nell'intorno dello scavo (in presenza di falda).

La dove comunque soprattutto nelle zone di imbocco dovessero verificarsi situazioni di interferenza con preesistenze superficiali allora vanno eseguiti rilievi in superficie:

- cedimenti e spostamenti orizzontali dei manufatti prossimi al tracciato,
- variazione delle lesioni già esistenti sugli edifici,
- cedimenti e spostamenti orizzontali del piano campagna interessato dal bacino di subsidenza indotto

Per quanto riguarda lo stato di sollecitazione sul rivestimento della galleria, è previsto di strumentare gli anelli di rivestimento.

Ciascun anello di rivestimento è formato da sei conci (distinti dalla numerazione 1,2,...,6) più un concio di chiusura come da figura di seguito riportata.

Ciascuno dei conci contraddistinti da un numero pari sarà dotato di due coppie di estensimetri orientate in senso circonferenziale ed ubicate al centro dell'arco del concio e ad una distanza di circa 25 cm da ciascuno degli spigoli laterali.

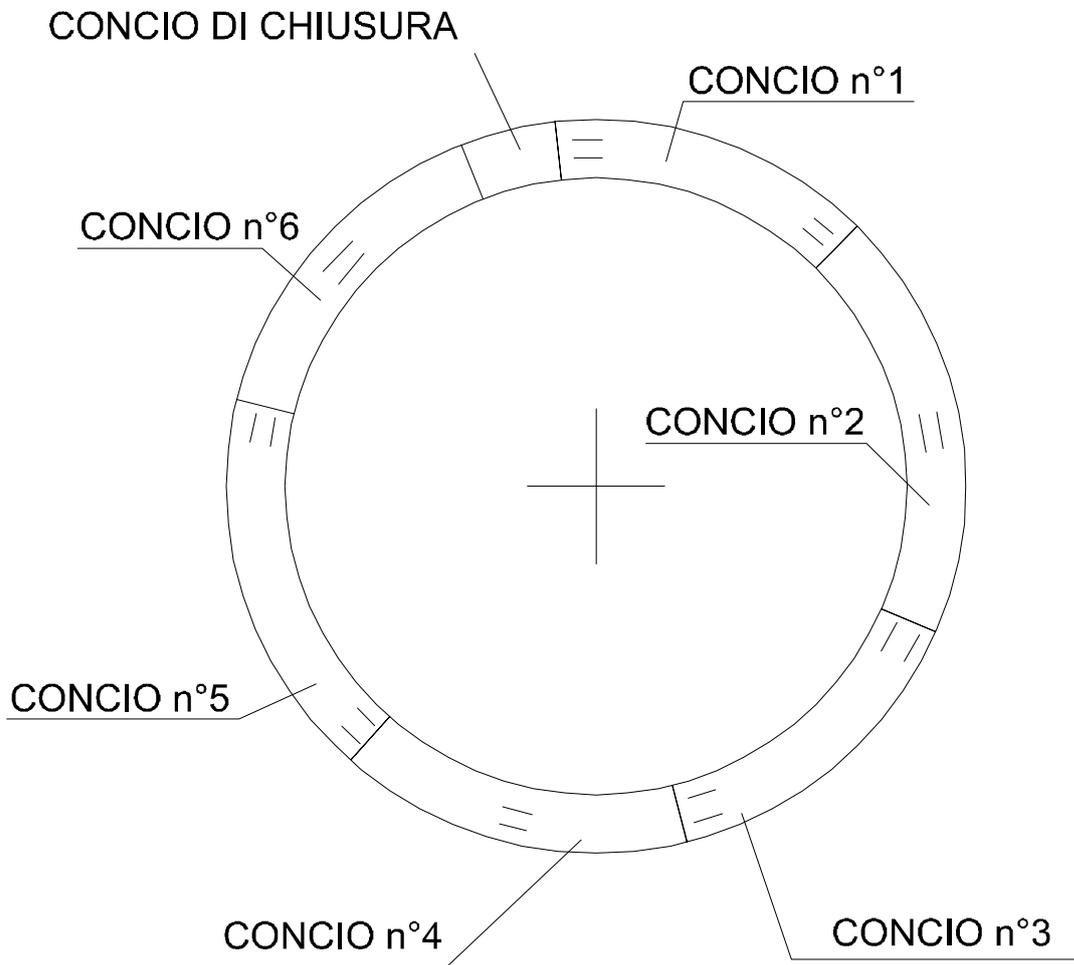
I tre conci contraddistinti da un numero dispari saranno dotati ciascuno di 6 coppie di celle estensimetriche (tre coppie per ciascuna delle estremità dell'arco del concio distanziate di 80 cm dalle facce di contatto con i conci adiacenti); le coppie di celle prossime agli spigoli avranno direzione circonferenziale mentre le due coppie restanti avranno direzione longitudinale nel senso dell'asse della galleria.

Le misure alle celle estensimetriche consentiranno di determinare con sufficiente accuratezza le tensioni agenti nel rivestimento.

Oltre alla lettura di zero le misure delle celle estensimetriche verranno effettuate, per ogni sezione, con la seguente cadenza temporale:

- n°1 misura al giorno nei primi 30 m di avanzamento oltre la sezione monitorata;
- n°10 misure distribuite nell'arco temporale della costruzione della galleria.

SEZIONE DELLA GALLERIA CON UBICAZIONE SCHEMATICA
DELLE CELLE ESTENSIMETRICHE CIRCONFERENZIALI



Sezione con disposizione delle celle estensimetriche

11 CONCLUSIONI E ALLEGATI

Nella presente relazione è stata presentata un'analisi statica del rivestimento definitivo della galleria Caltanissetta. Sono state considerate le condizioni di sollecitazione a cui sono sottoposti i conci prefabbricati nelle fasi transitorie di scasseratura, stoccaggio, trasporto, montaggio e nella fase definitiva per il carico esercitato dal terreno. In ogni condizione di carico si sono ottenute le caratteristiche di sollecitazione agenti sulle sezioni e confrontate con le caratteristiche di resistenza calcolate mediante il metodo degli stati limite secondo

la normativa vigente. I risultati dei calcoli hanno confermato l'adeguatezza statica dell'intervento proposto.

ALLEGATI ANALISI NUMERICHE FLAC

JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: MESH DI CALCOLO

FLAC (Version 4.00)

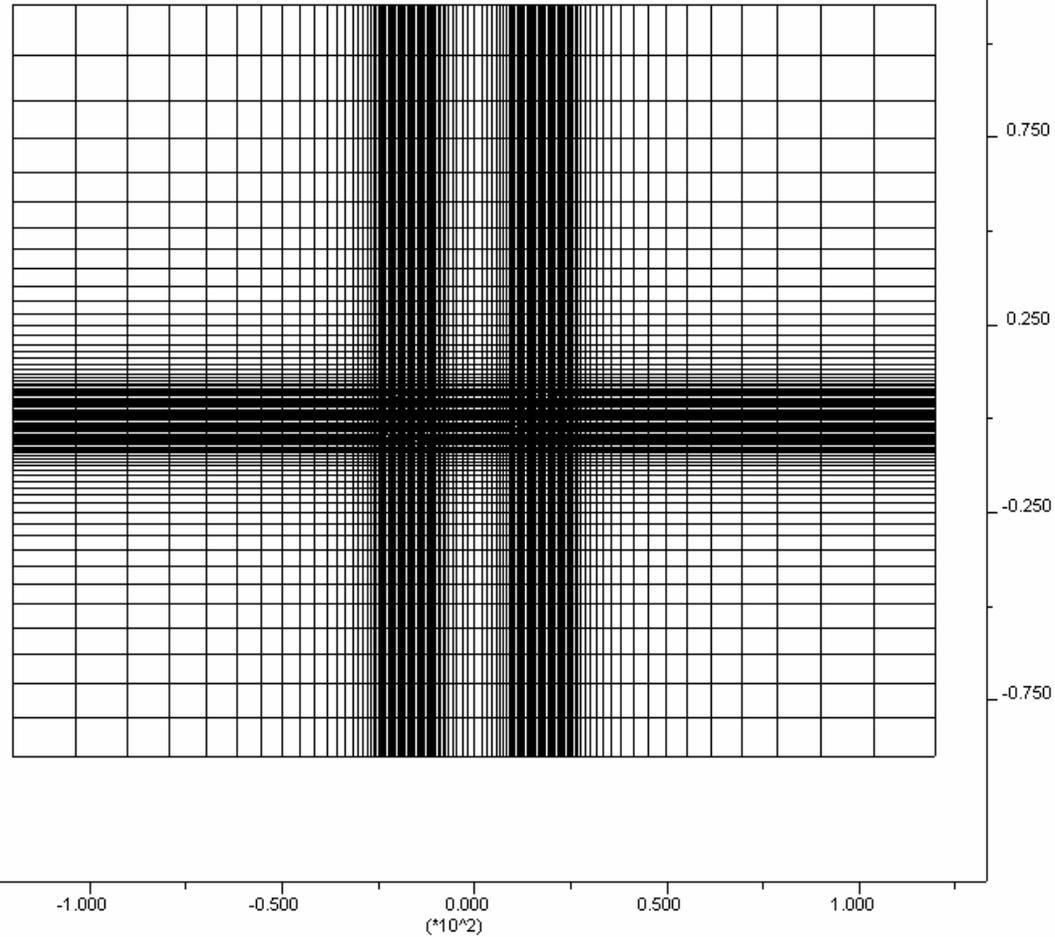
LEGEND

26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

Grid plot



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: PARTICOLARE MESH

(*10^1)

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:52

step 42

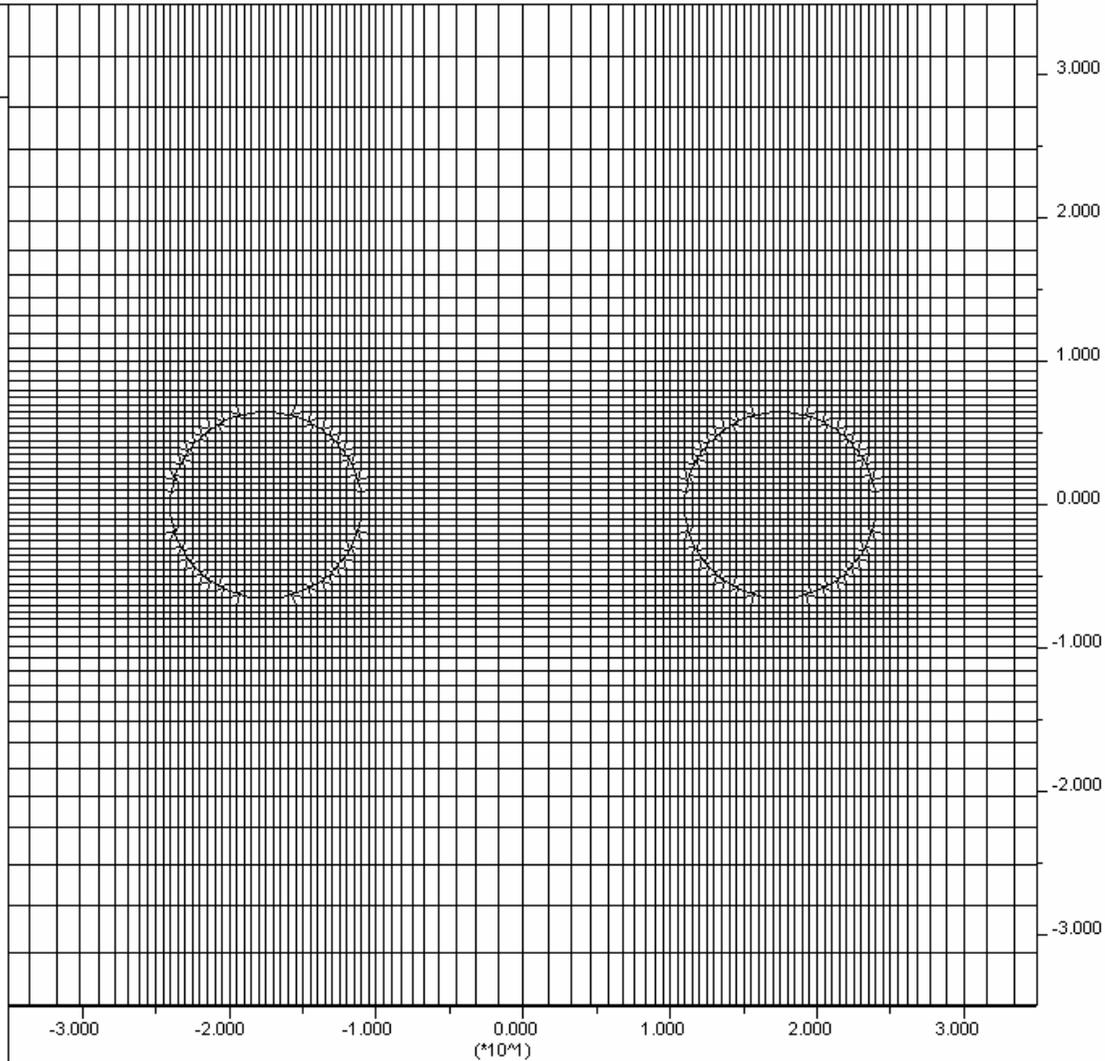
-3.500E+01 <x< 3.500E+01

-3.500E+01 <y< 3.500E+01

Grid plot



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:52

step 42

-1.333E+02 <x< 1.333E+02

-1.233E+02 <y< 1.433E+02

cohesion

■ 2.000E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



-1.000

-0.500

0.000
(*10²)

0.500

1.000

1.250

0.750

0.250

-0.250

-0.750

JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: PARAMETRI DI CALCOLO

(*10²)

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

friction
■ 2.400E+01

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



-1.000

-0.500

0.000
(*10²)

0.500

1.000

1.250

0.750

0.250

-0.250

-0.750

JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: PARANETRI DI CALCOLO

(*10^2)

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

bulk_mod
■ 2.500E+08

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



-1.000 -0.500 0.000 0.500 1.000 (*10^2)

1.250
0.750
0.250
-0.250
-0.750

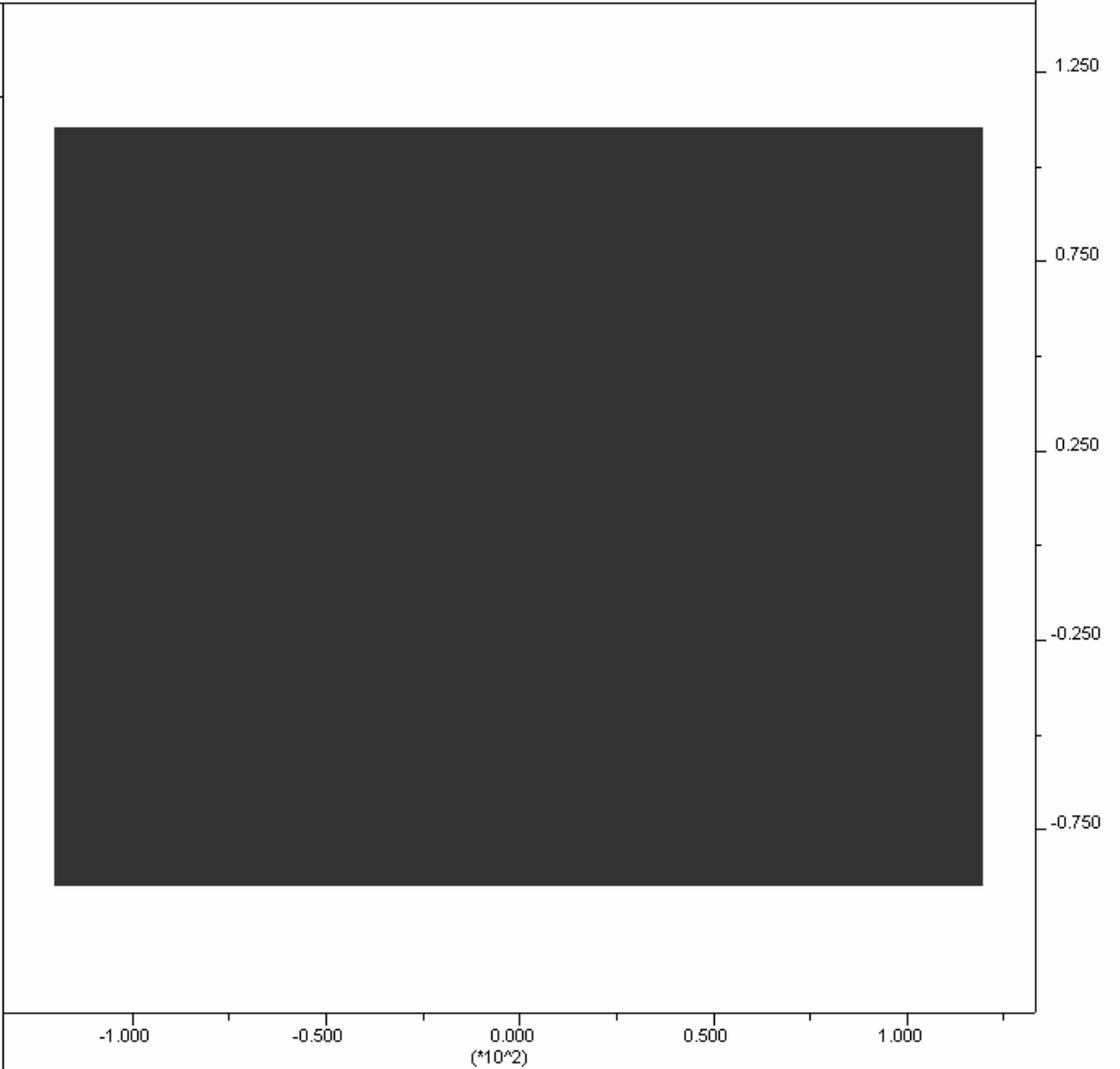
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

shear_mod
■ 1.154E+08

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



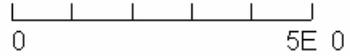
JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: NODI STRUTTURALI

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

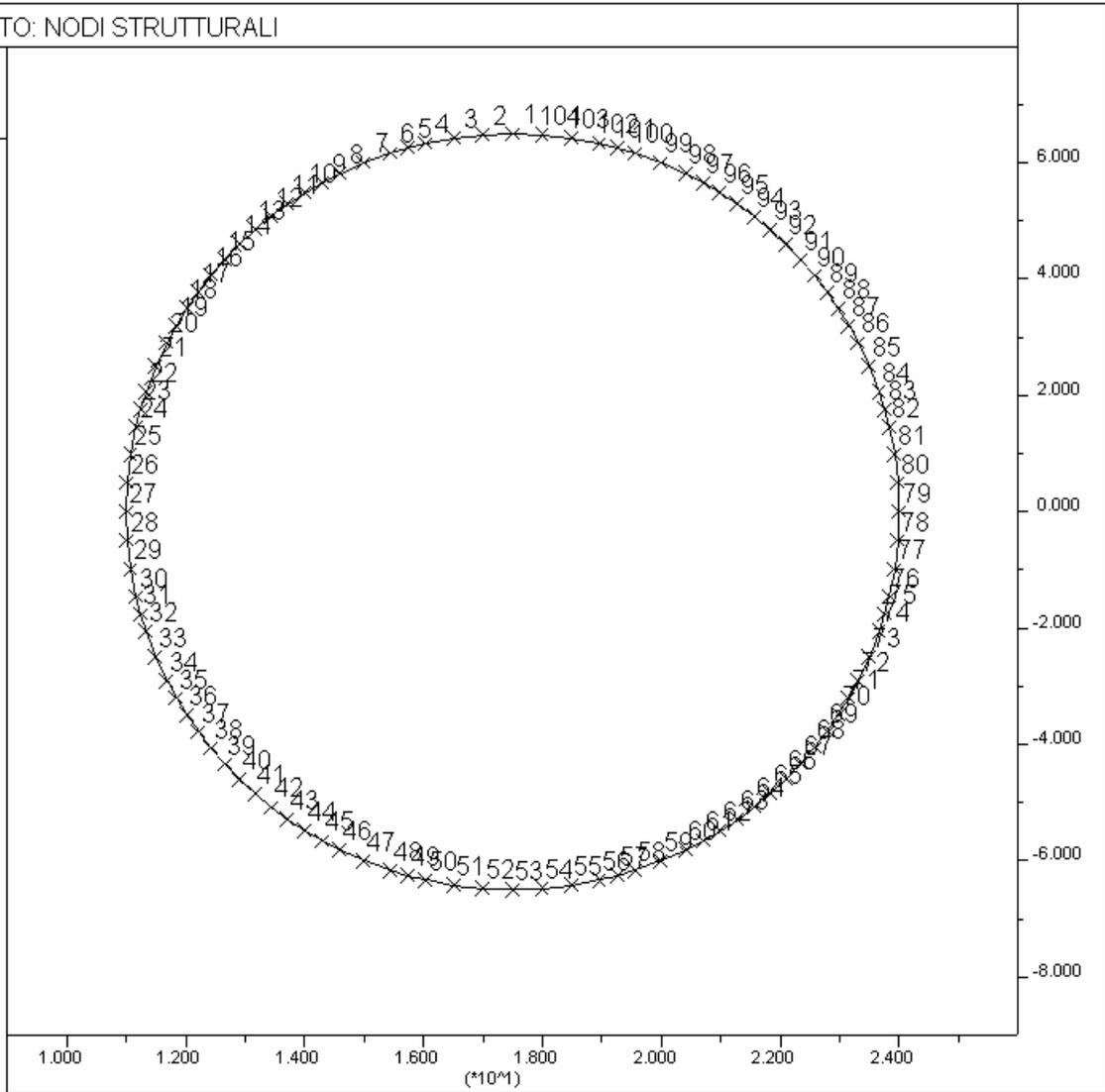
26-May-06 13:05
step 30445
9.000E+00 <x< 2.600E+01
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Boundary plot



Structural Node Numbers

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



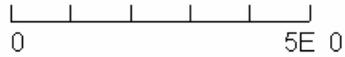
JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: NODI STRUTTURALI

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

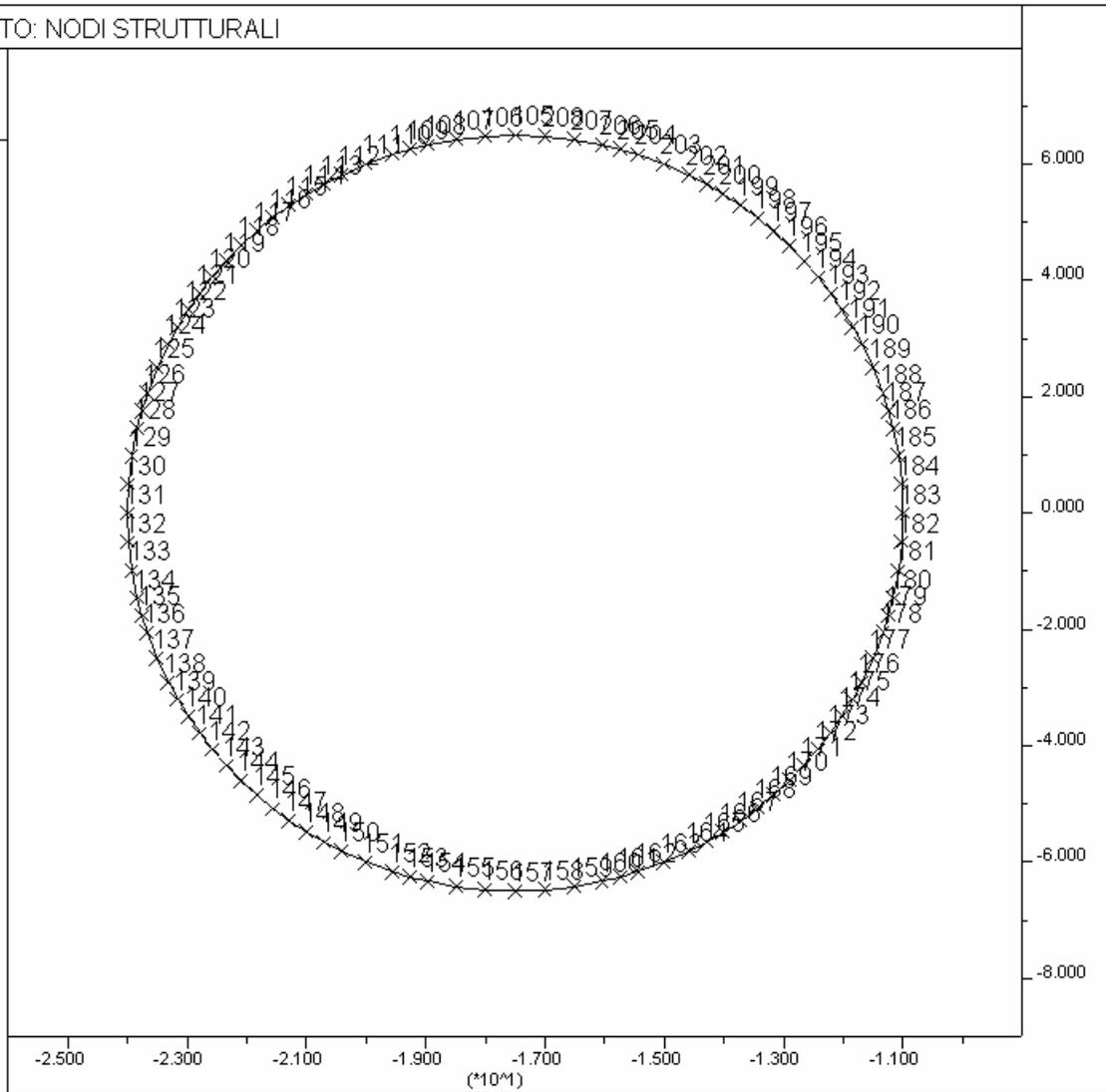
26-May-06 13:05
step 30445
-2.600E+01 <x< -9.000E+00
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Boundary plot



Structural Node Numbers

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 0 -TENSIONI TOTALI SXX

(*10²)

FLAC (Version 4.00)

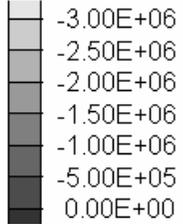
LEGEND

26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

Boundary plot



XX-stress contours



Contour interval= 5.00E+05

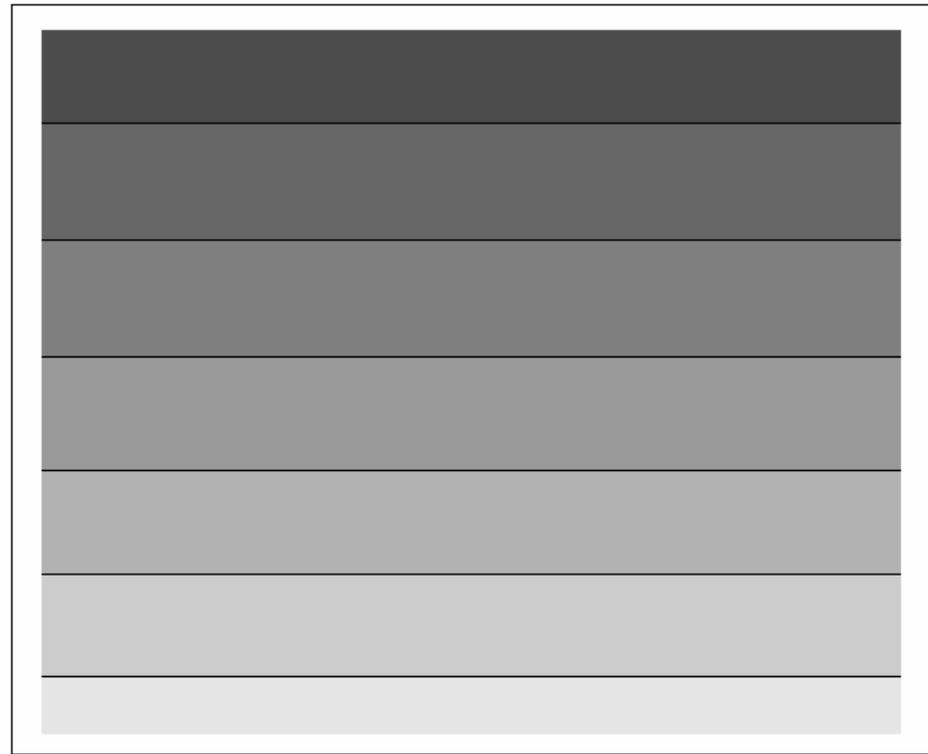
XX-stress contours

Contour interval= 5.00E+05

Minimum: -3.00E+06

Maximum: 0.00E+00

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



-1.000 -0.500 0.000 0.500 1.000
(*10²)

1.250
0.750
0.250
-0.250
-0.750

JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 0 -TENSIONI TOTALI SYY

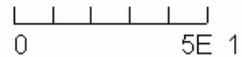
(*10²)

FLAC (Version 4.00)

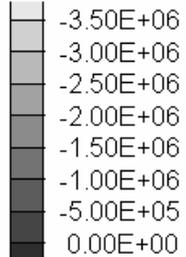
LEGEND

26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

Boundary plot



YY-stress contours



Contour interval= 5.00E+05

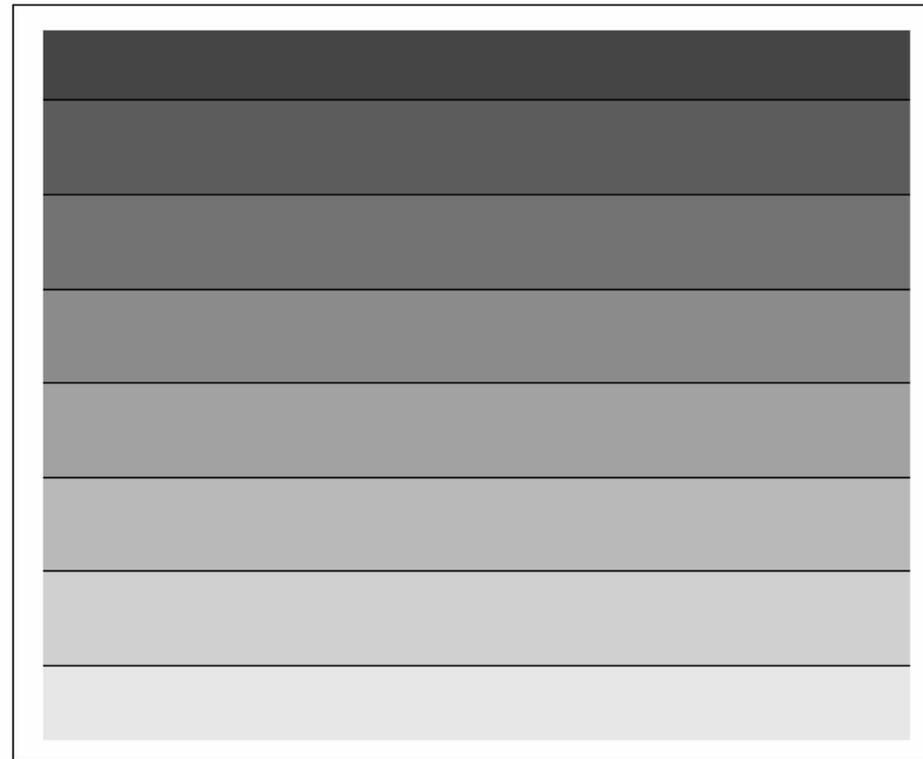
YY-stress contours

Contour interval= 5.00E+05

Minimum: -3.50E+06

Maximum: 0.00E+00

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



-1.000 -0.500 0.000 0.500 1.000
(*10²)

1.250
0.750
0.250
-0.250
-0.750

JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 0 -TENSIONI PRINCIPALI

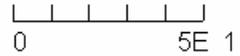
(*10^2)

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

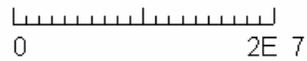
26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

Grid plot

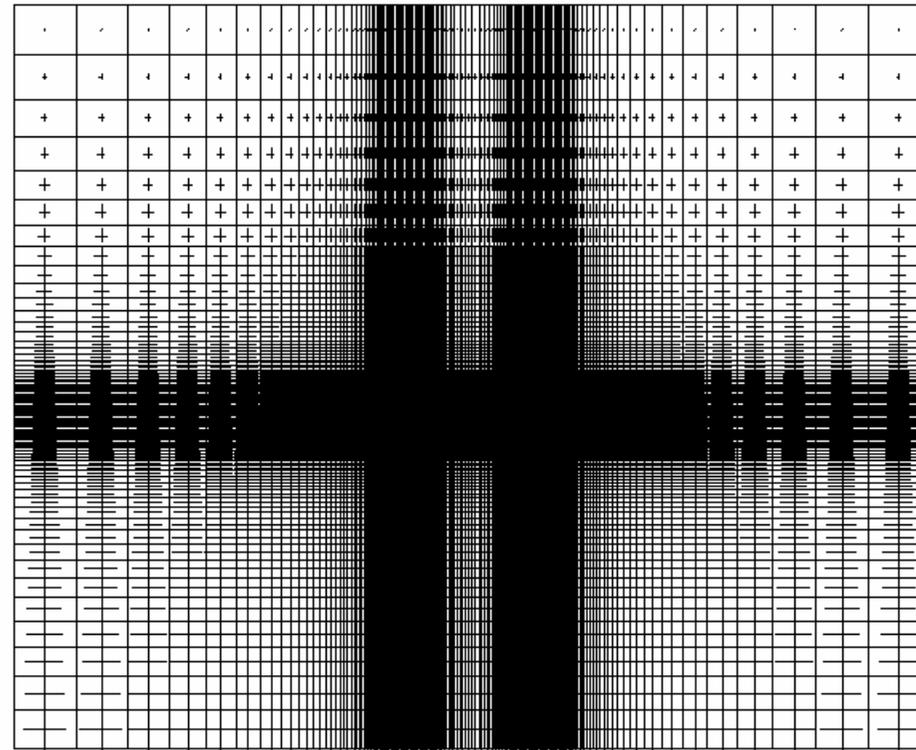


Principal stresses

Max. Value = -1.075E+05
Min. Value = -3.905E+06



Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



-1.000 -0.500 0.000 0.500 1.000
(*10^2)

1.250
0.750
0.250
-0.250
-0.750

JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 0 - DEFORMAZIONI PLASTICHE

(*10²)

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:52
step 42
-1.333E+02 <x< 1.333E+02
-1.233E+02 <y< 1.433E+02

Boundary plot



e_plastic
*** All values = 0.00E+00

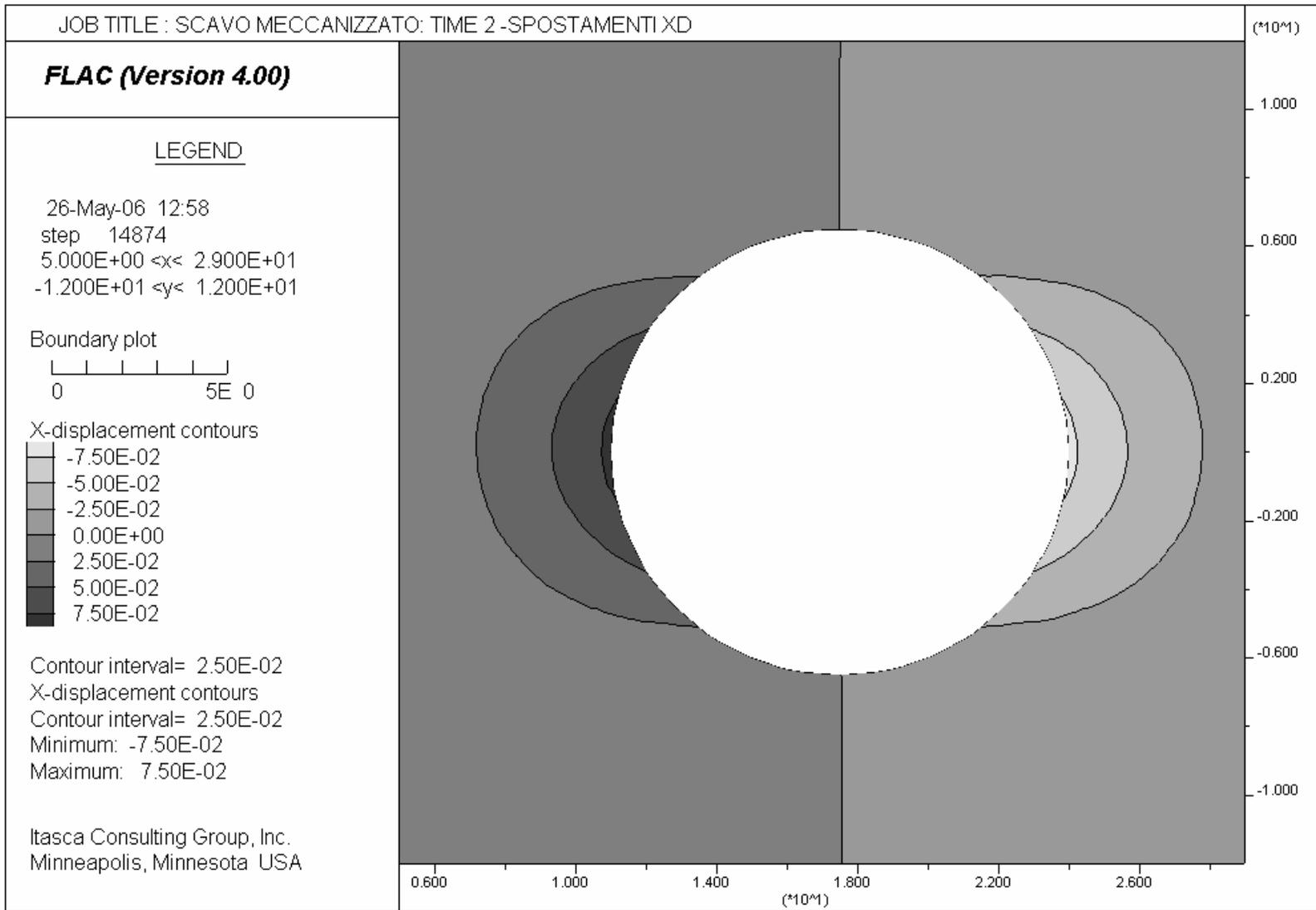
e_plastic
*** All values = 0.00E+00

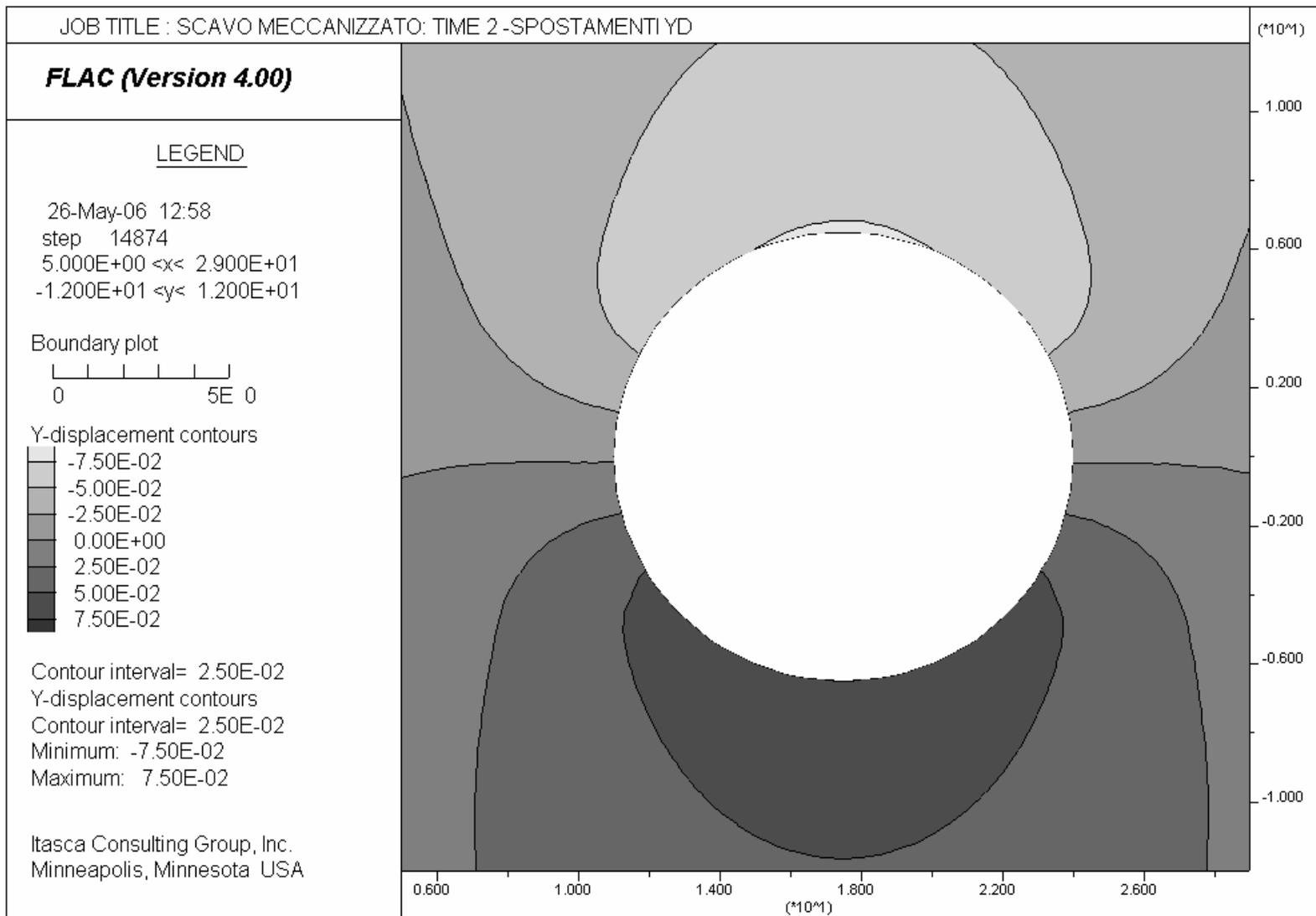
Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



-1.000 -0.500 0.000 0.500 1.000
(*10²)

1.250
0.750
0.250
-0.250
-0.750





JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 2 -TENSIONI TOTALI SXX

FLAC (Version 4.00)

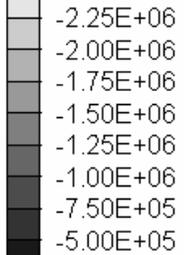
LEGEND

26-May-06 12:58
step 14874
5.000E+00 <x< 2.900E+01
-1.200E+01 <y< 1.200E+01

Boundary plot

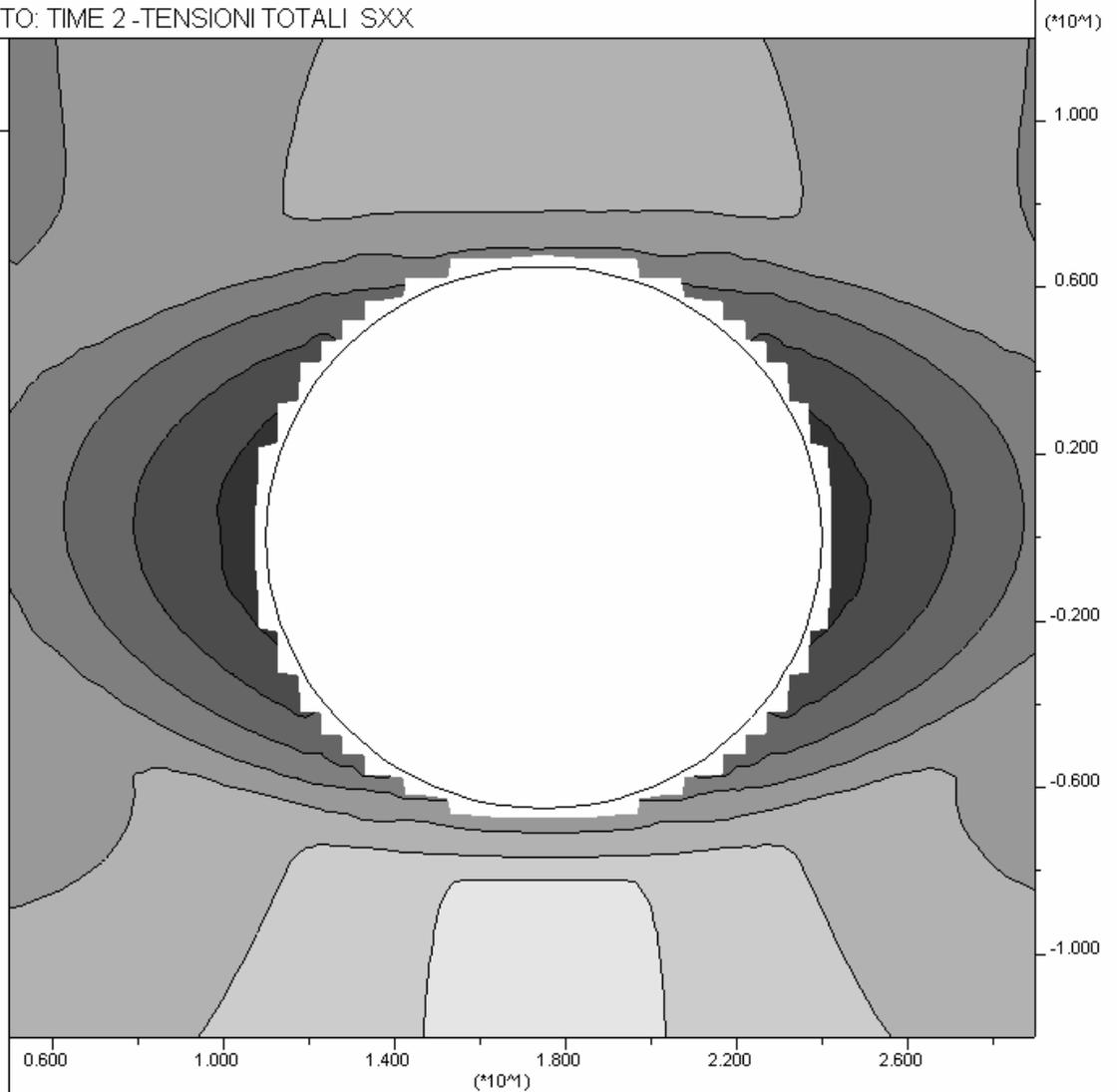


XX-stress contours



Contour interval= 2.50E+05
XX-stress contours
Contour interval= 2.50E+05
Minimum: -2.25E+06
Maximum: -5.00E+05

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 2 -TENSIONI TOTALI SY

FLAC (Version 4.00)

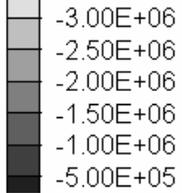
LEGEND

26-May-06 12:58
step 14874
5.000E+00 <x< 2.900E+01
-1.200E+01 <y< 1.200E+01

Boundary plot

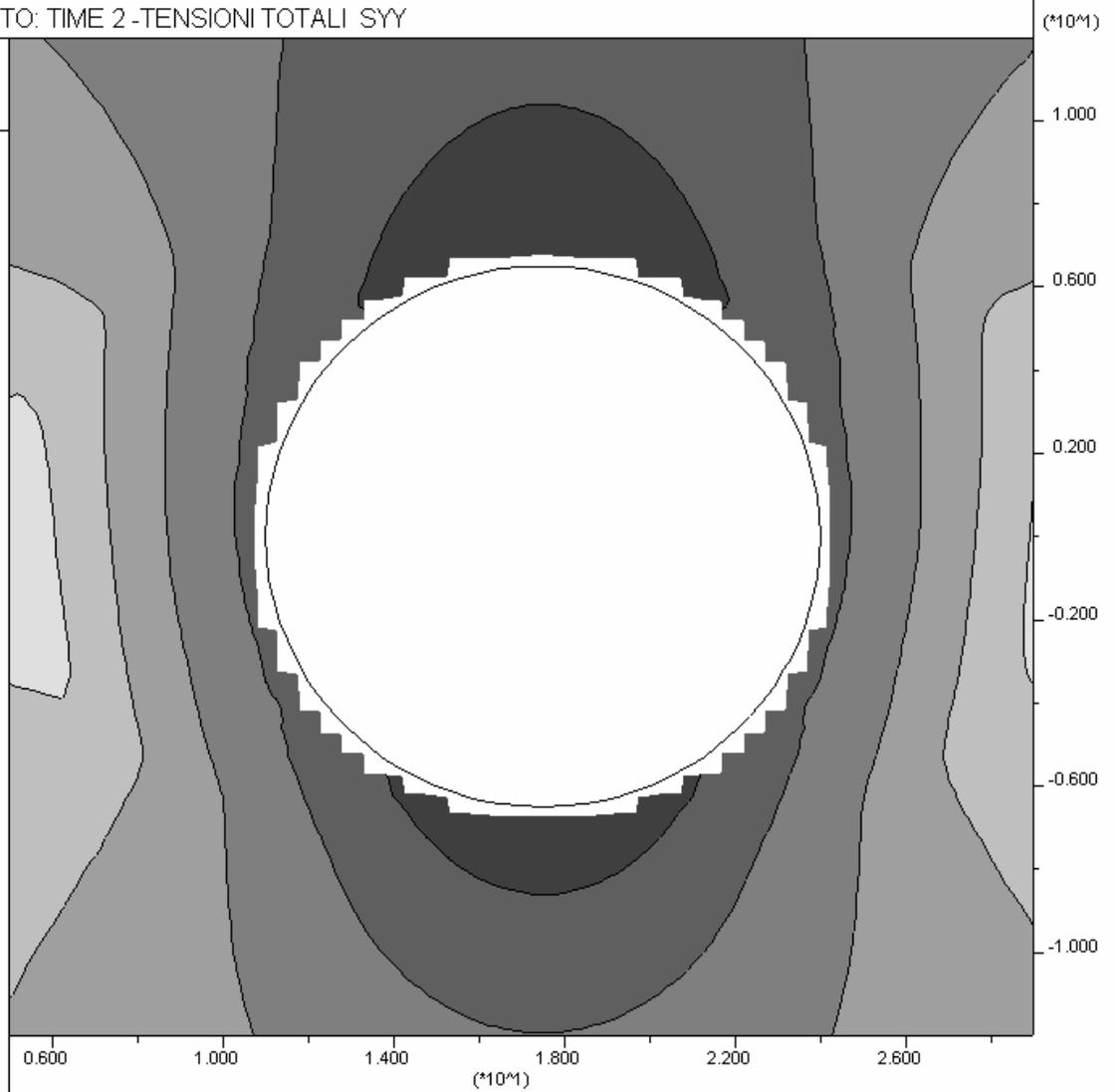


YY-stress contours



Contour interval= 5.00E+05
YY-stress contours
Contour interval= 5.00E+05
Minimum: -3.00E+06
Maximum: -5.00E+05

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 2 - DEFORMAZIONI PLASTICHE

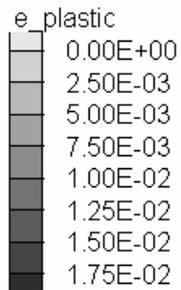
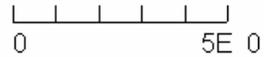
(*10^1)

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

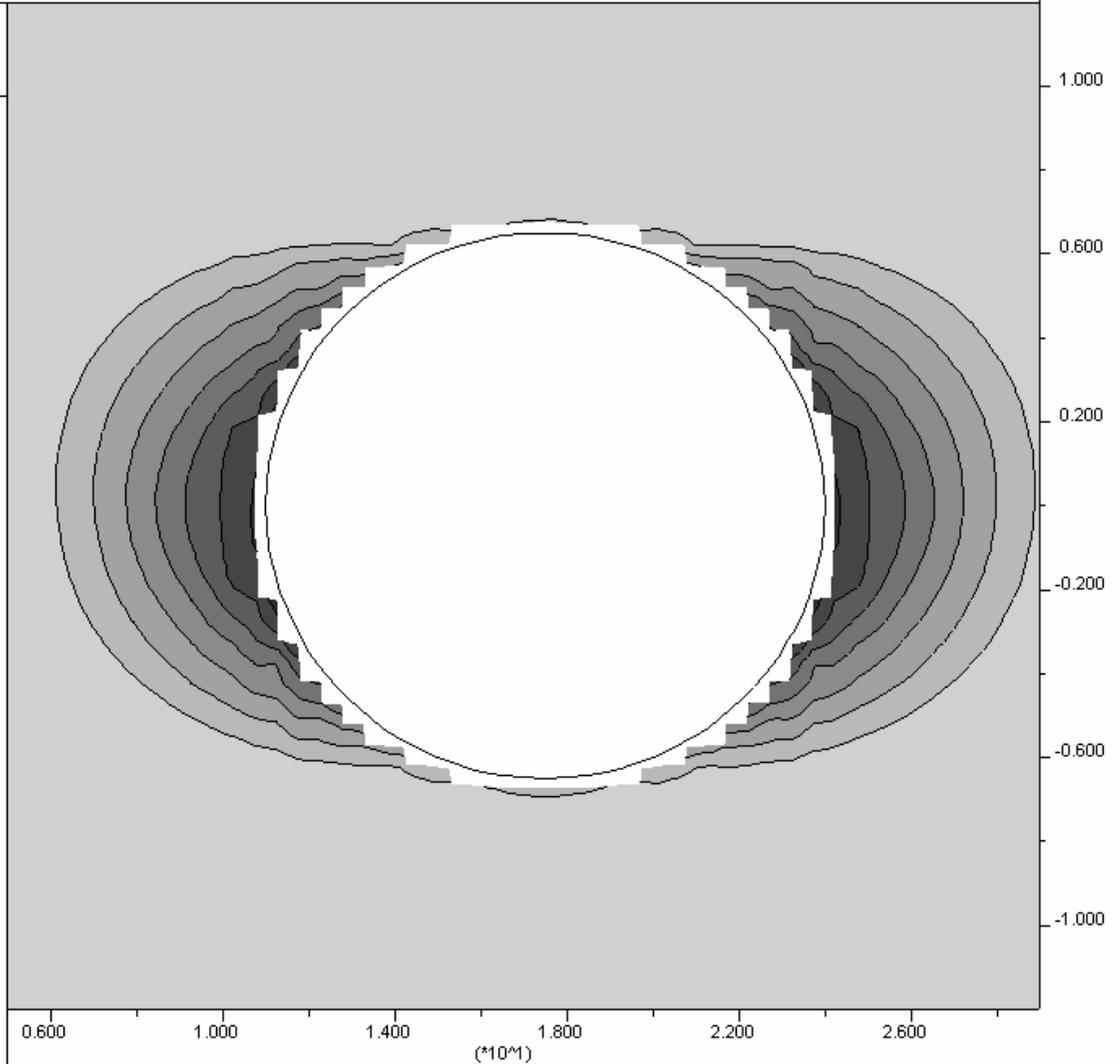
26-May-06 12:58
step 14874
5.000E+00 <x< 2.900E+01
-1.200E+01 <y< 1.200E+01

Boundary plot



Contour interval= 2.50E-03
e_plastic
Contour interval= 2.50E-03
Minimum: 0.00E+00
Maximum: 1.75E-02

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 2 - SOLLECITAZIONI FLETTENTI(CANNA DX)

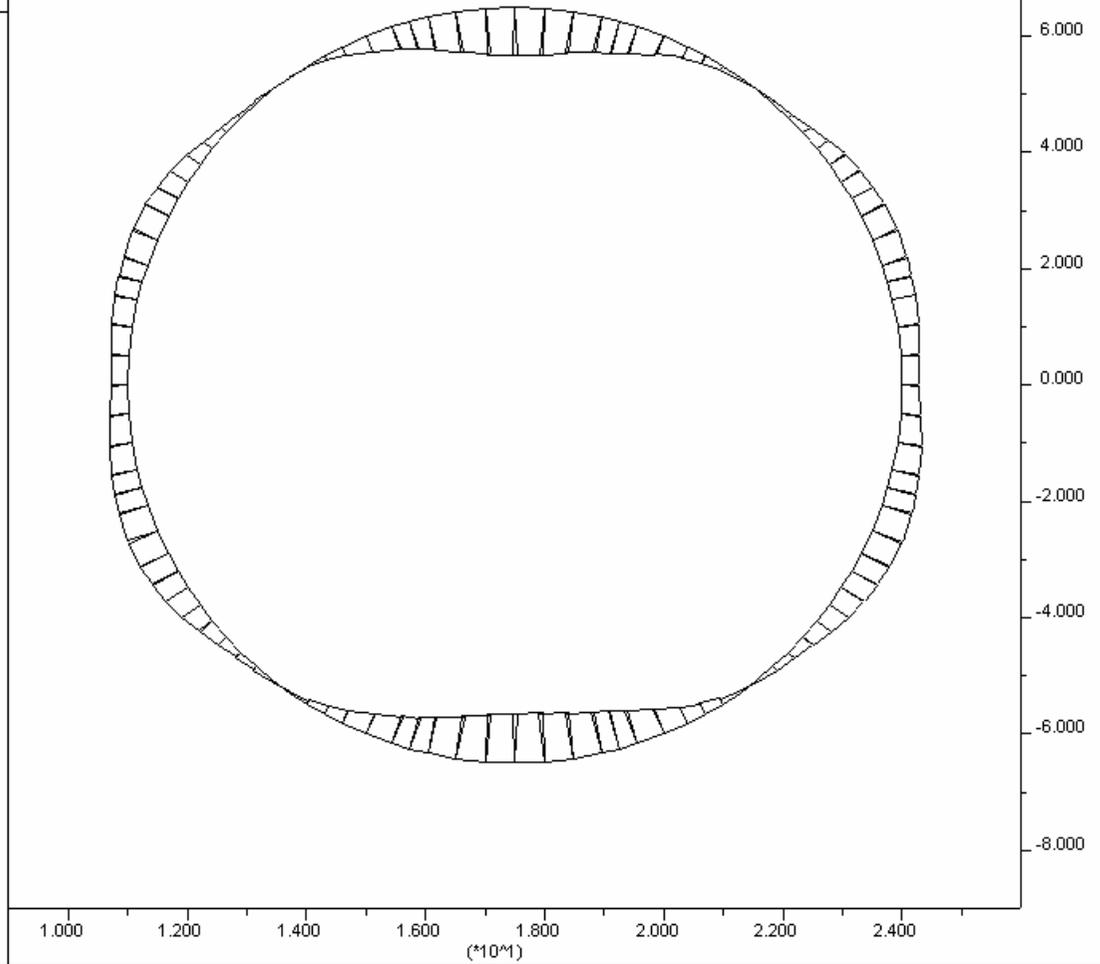
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:58
step 14874
9.000E+00 <x< 2.600E+01
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
Moment on
Structure Max. Value
1 (Beam) 7.033E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 2 - SOLLECITAZIONI ASSIALI (CANNA DX)

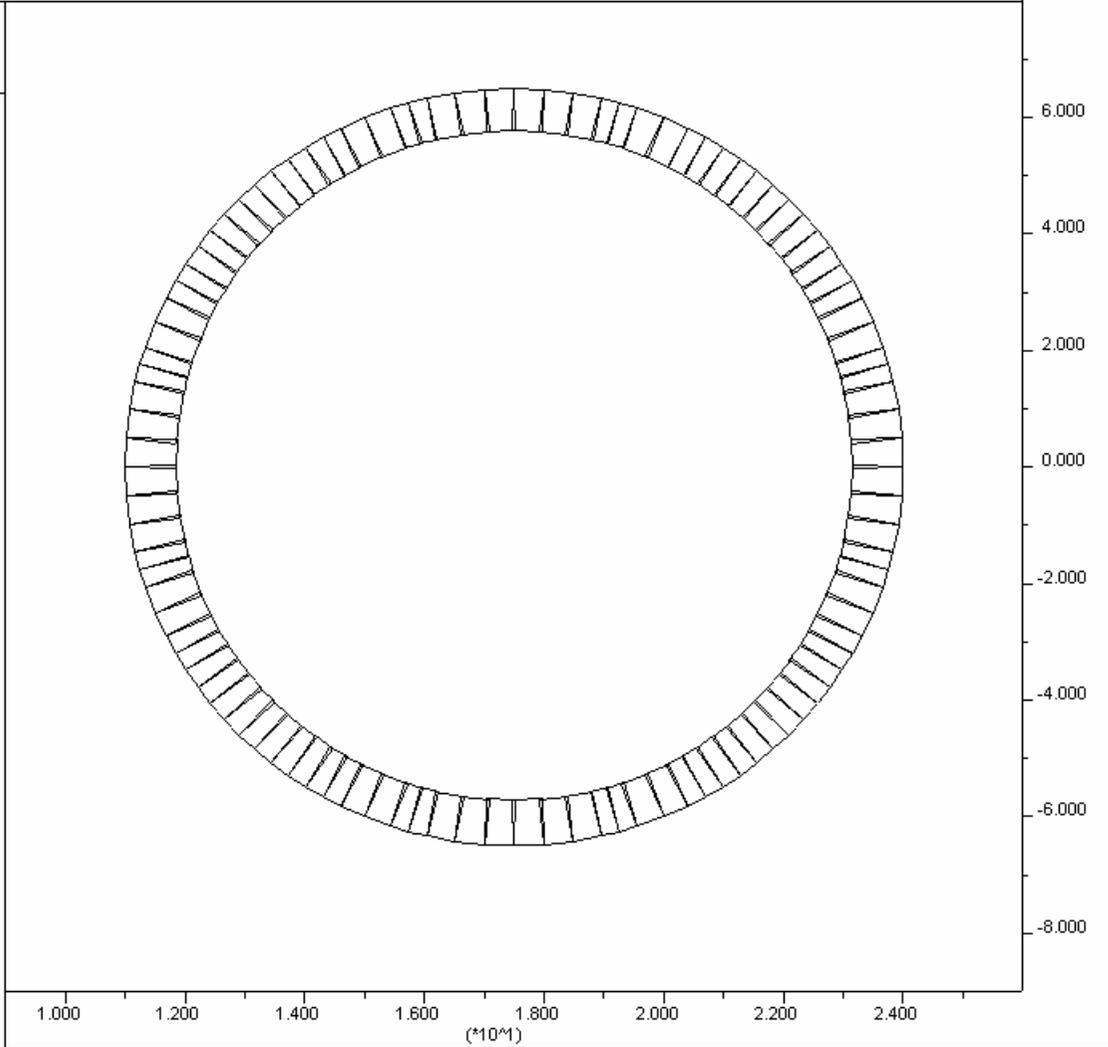
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 12:58
step 14874
9.000E+00 <x< 2.600E+01
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
Axial Force on
Structure Max. Value
1 (Beam) 4.186E+06

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 2 - SOLLECITAZIONI DI TAGLIO(CANNA DX)

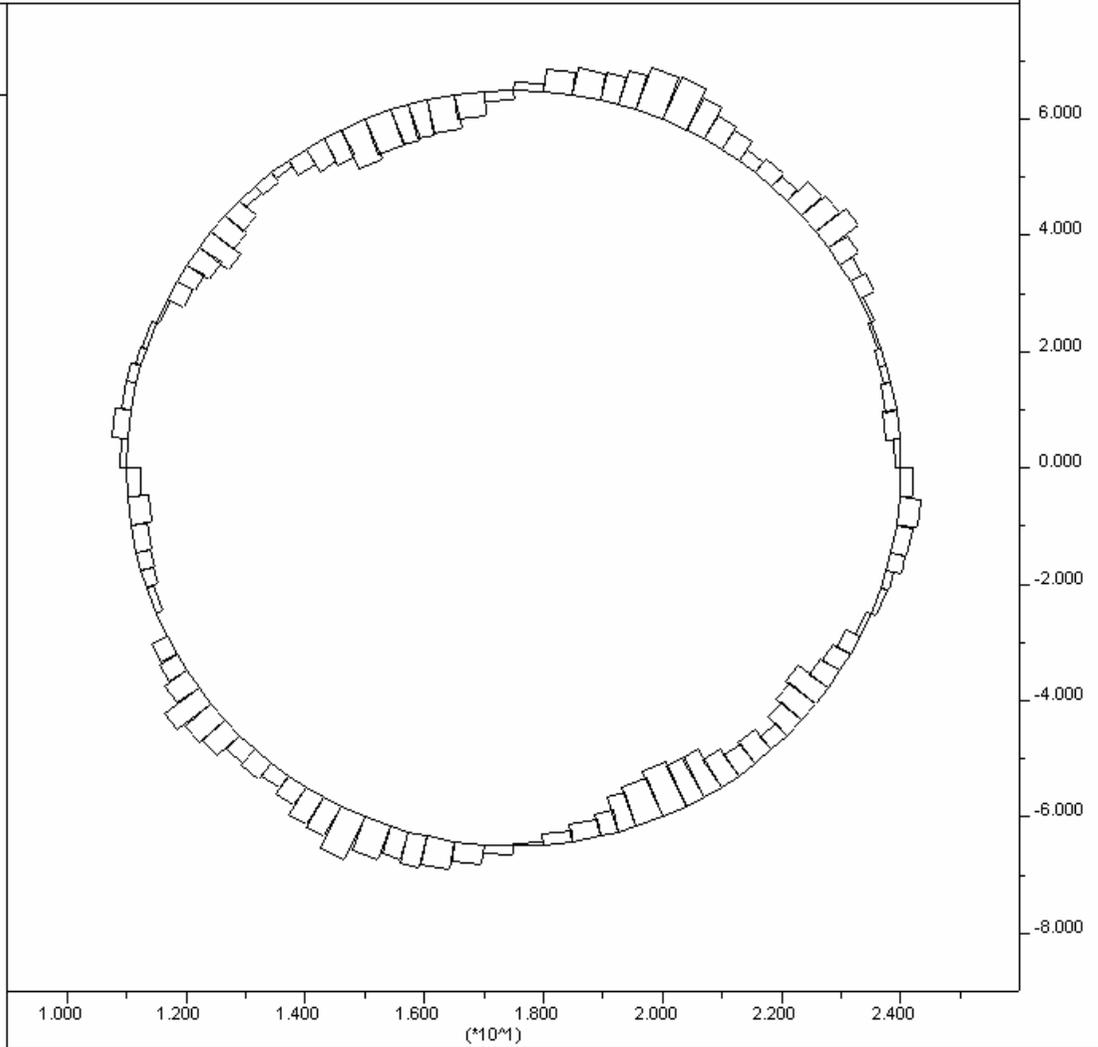
FLAC (Version 4.00)

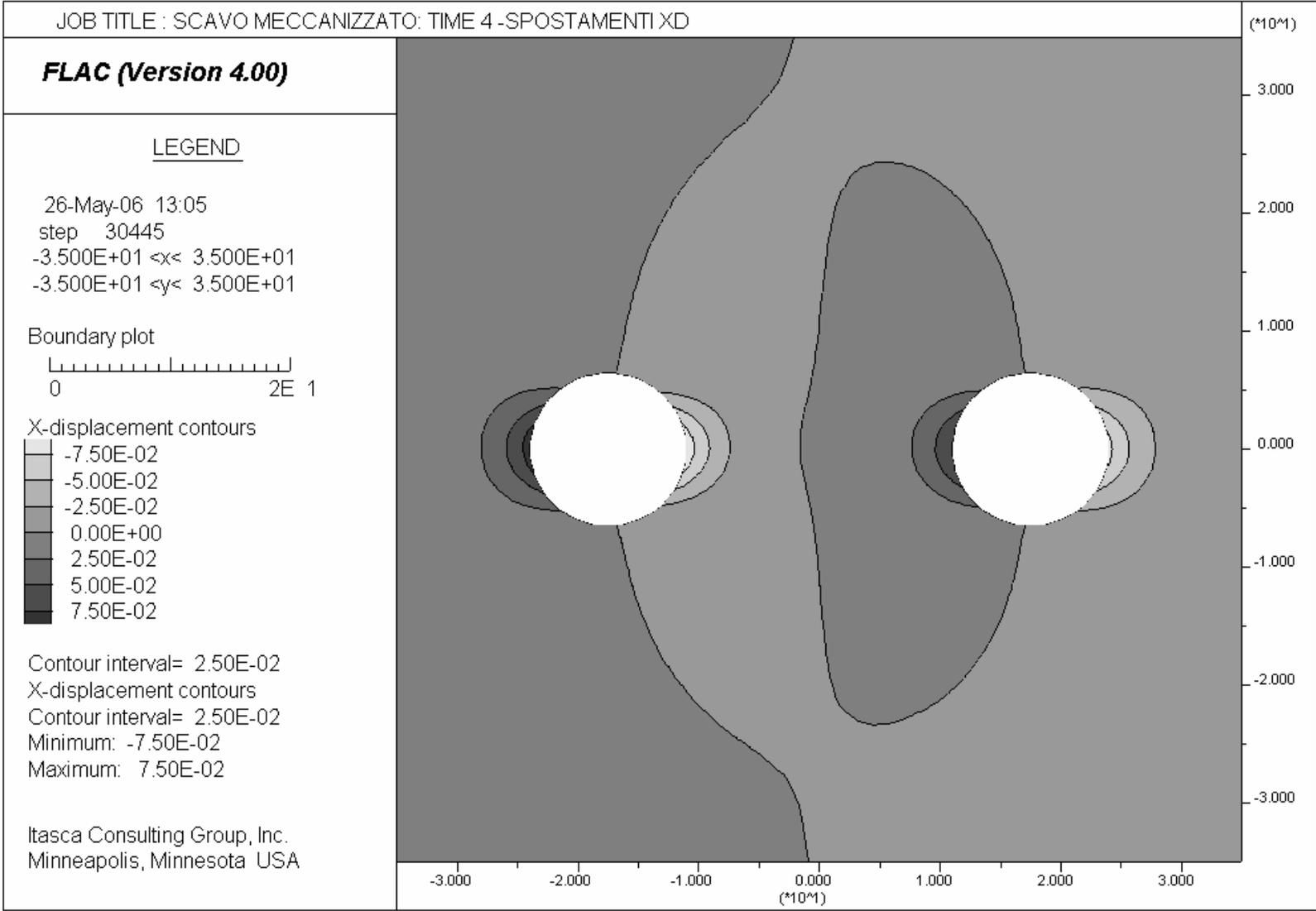
LEGEND

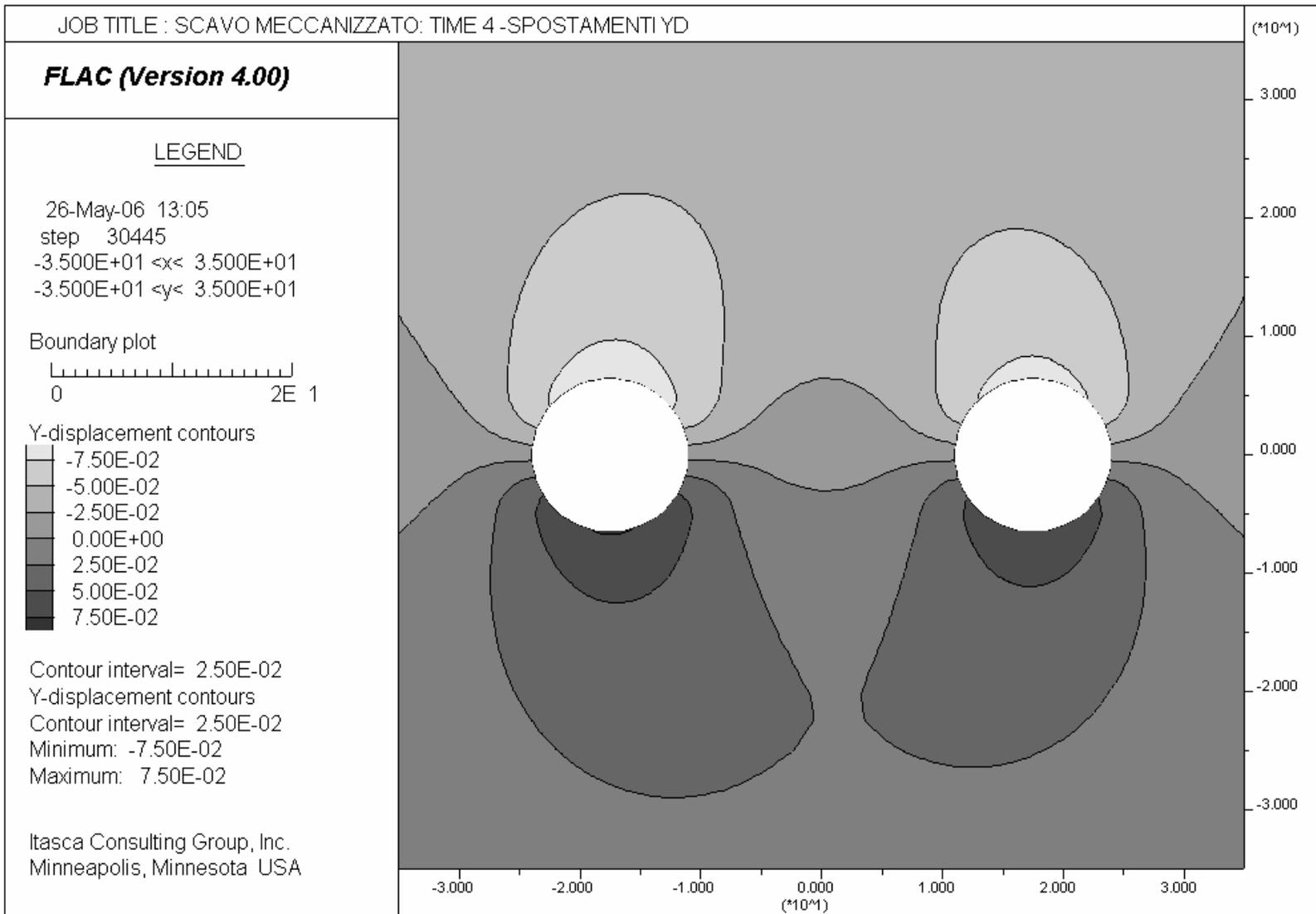
26-May-06 12:58
step 14874
9.000E+00 <x< 2.600E+01
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

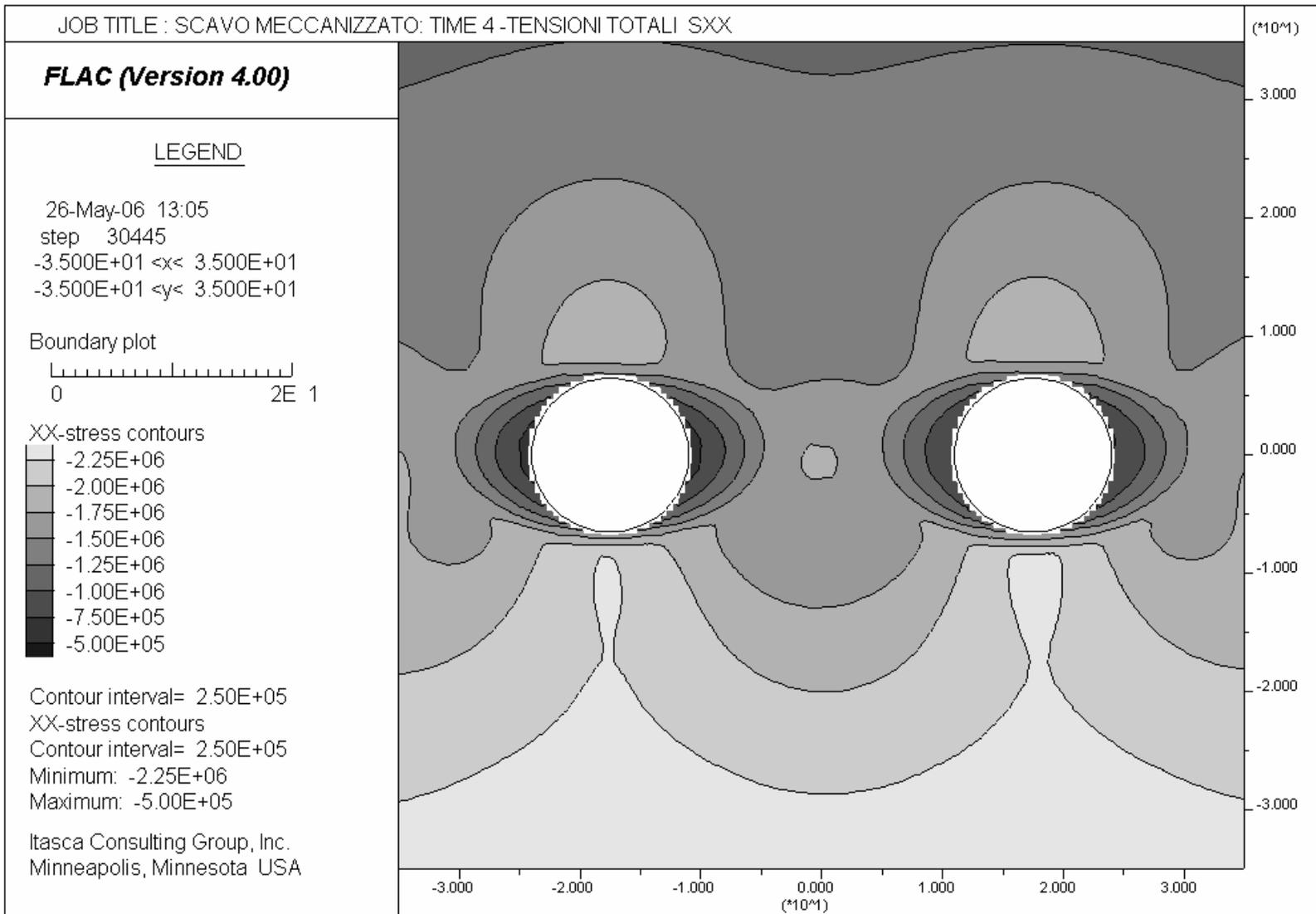
Beam Plot
Shear Force on
Structure Max. Value
1 (Beam) 2.911E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA









JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 4 -TENSIONI TOTALI SYX

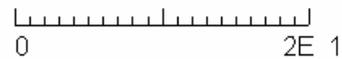
(10^6)

FLAC (Version 4.00)

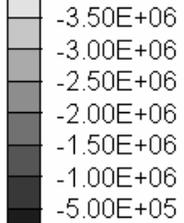
LEGEND

26-May-06 13:05
step 30445
-3.500E+01 <x< 3.500E+01
-3.500E+01 <y< 3.500E+01

Boundary plot



YY-stress contours



Contour interval= 5.00E+05

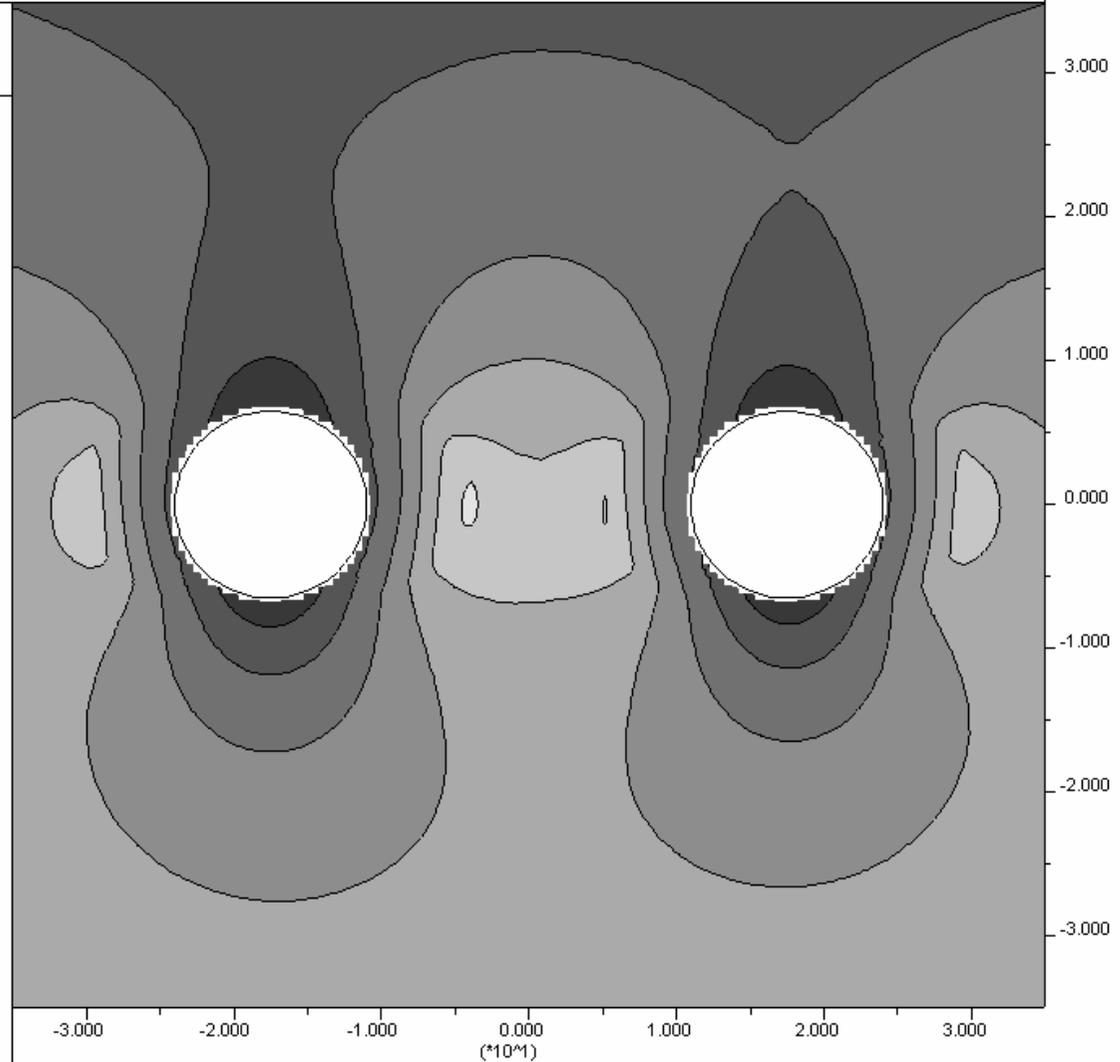
YY-stress contours

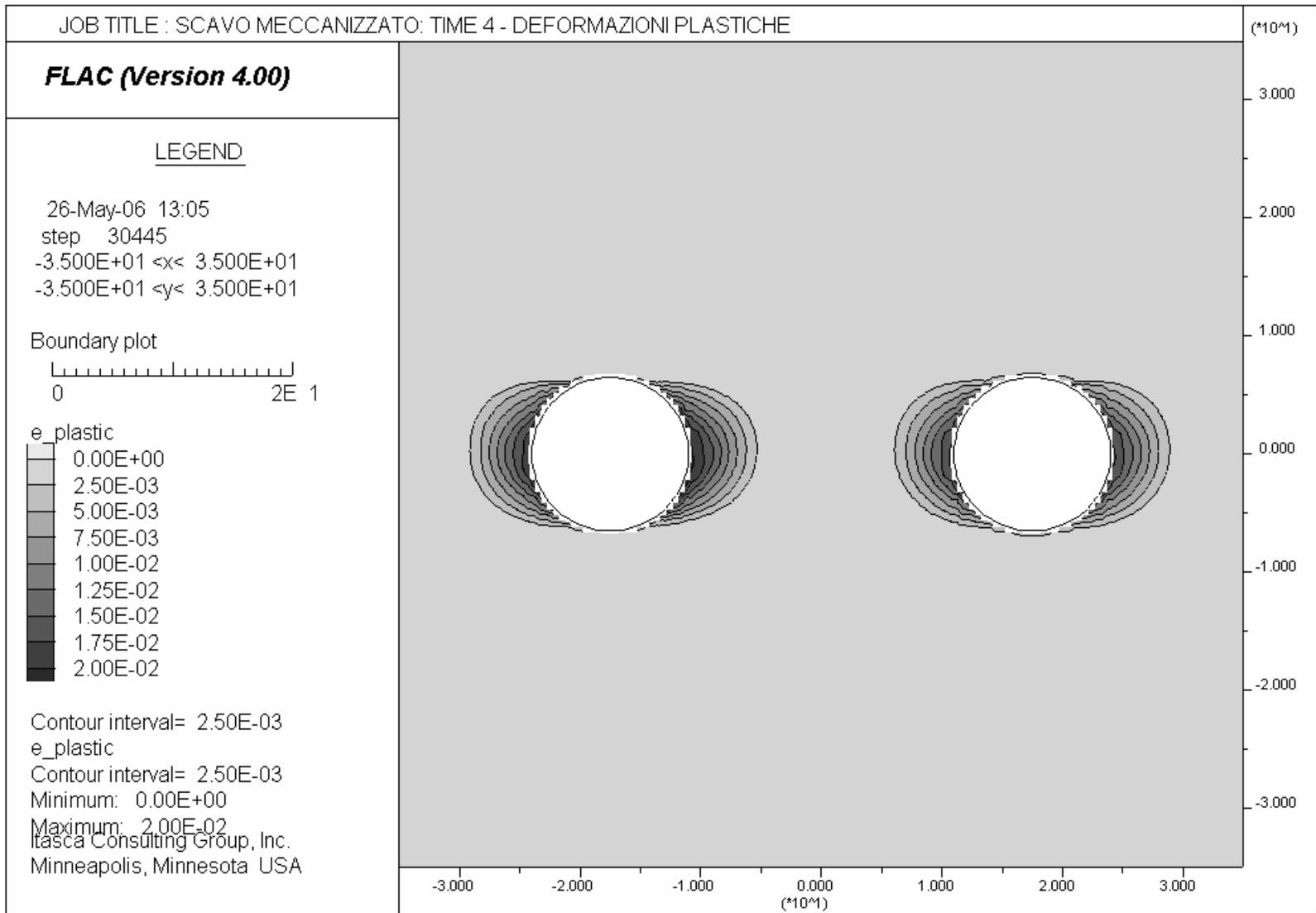
Contour interval= 5.00E+05

Minimum: -3.50E+06

Maximum: -5.00E+05

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA





JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 4 - SOLLECITAZIONI FLETTENTI(CANNA SX)

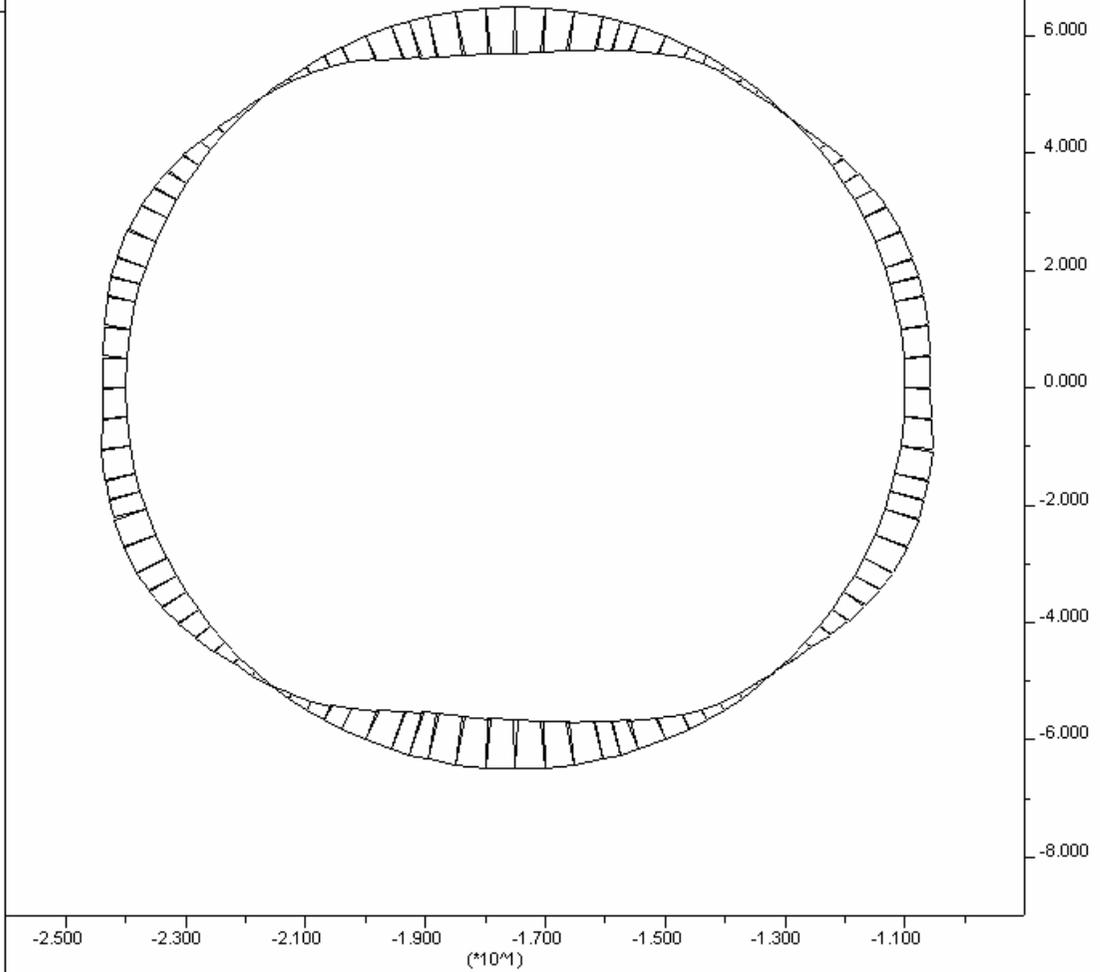
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30445
-2.600E+01 <x< -9.000E+00
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
2 (Beam) 7.332E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 4 - SOLLECITAZIONI ASSIALI (CANNA SX)

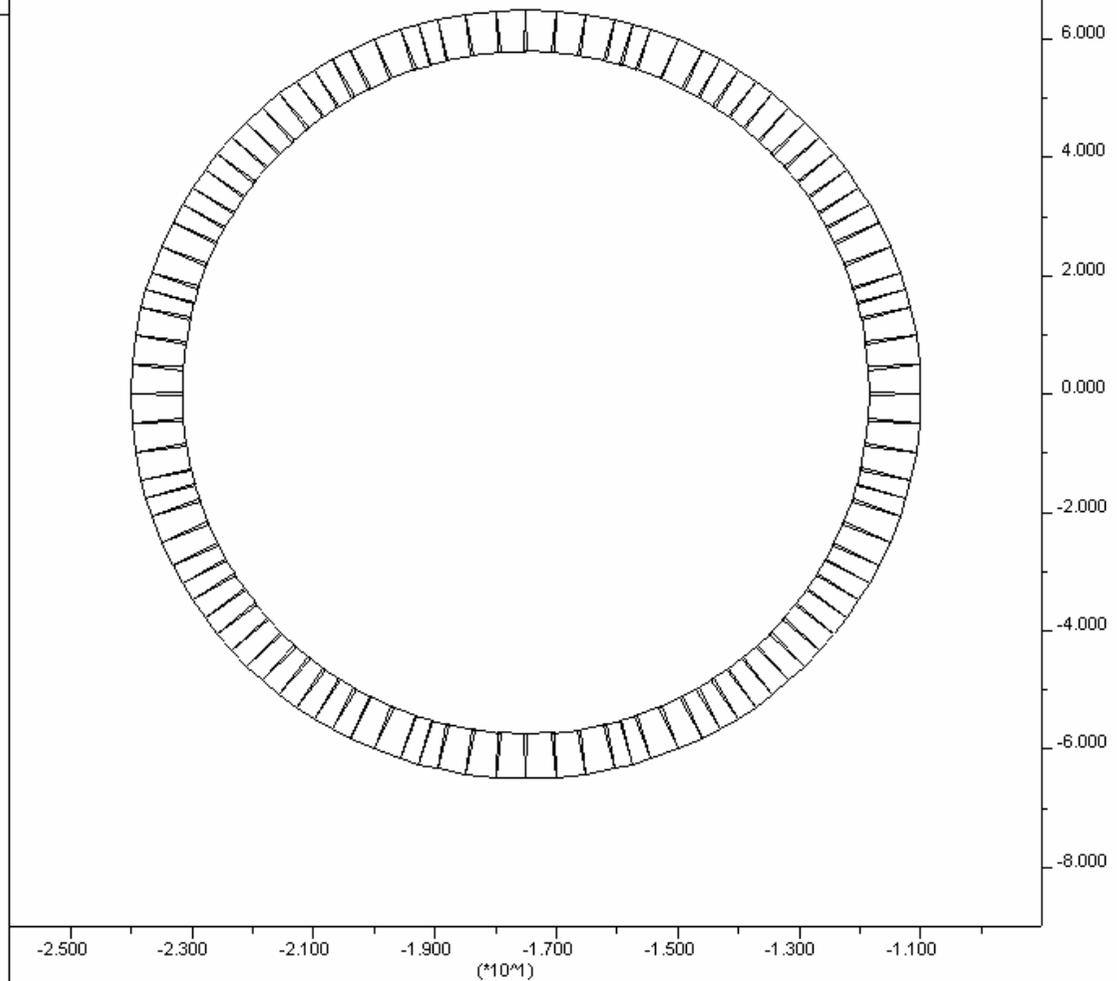
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30445
-2.600E+01 <x< -9.000E+00
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
2 (Beam) 4.335E+06

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 4 - SOLLECITAZIONI DI TAGLIO(CANNA SX)

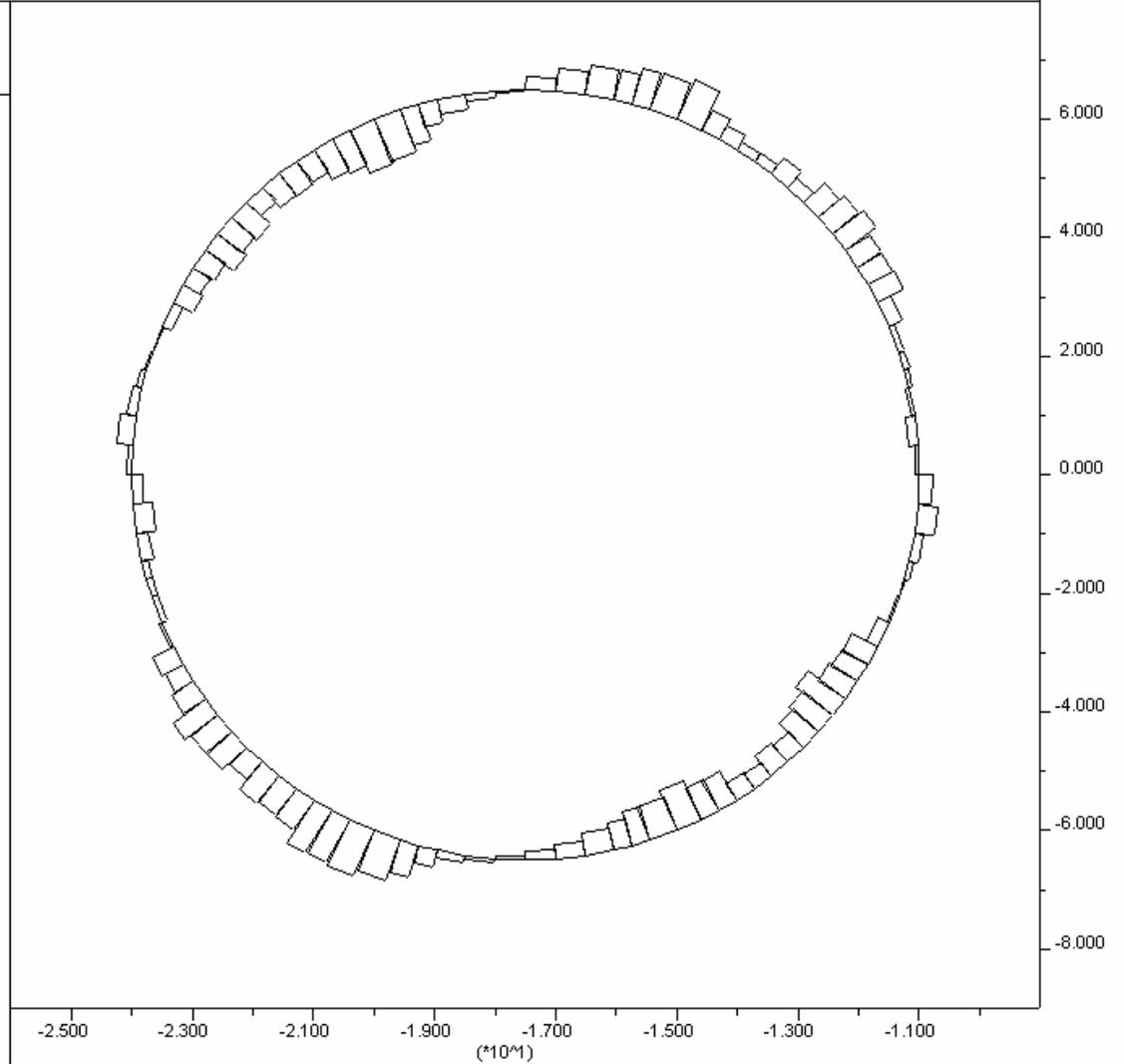
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30445
-2.600E+01 <x< -9.000E+00
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
2 (Beam) -3.048E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 5 - SOLLECITAZIONI FLETTENTI(CANNA DX)

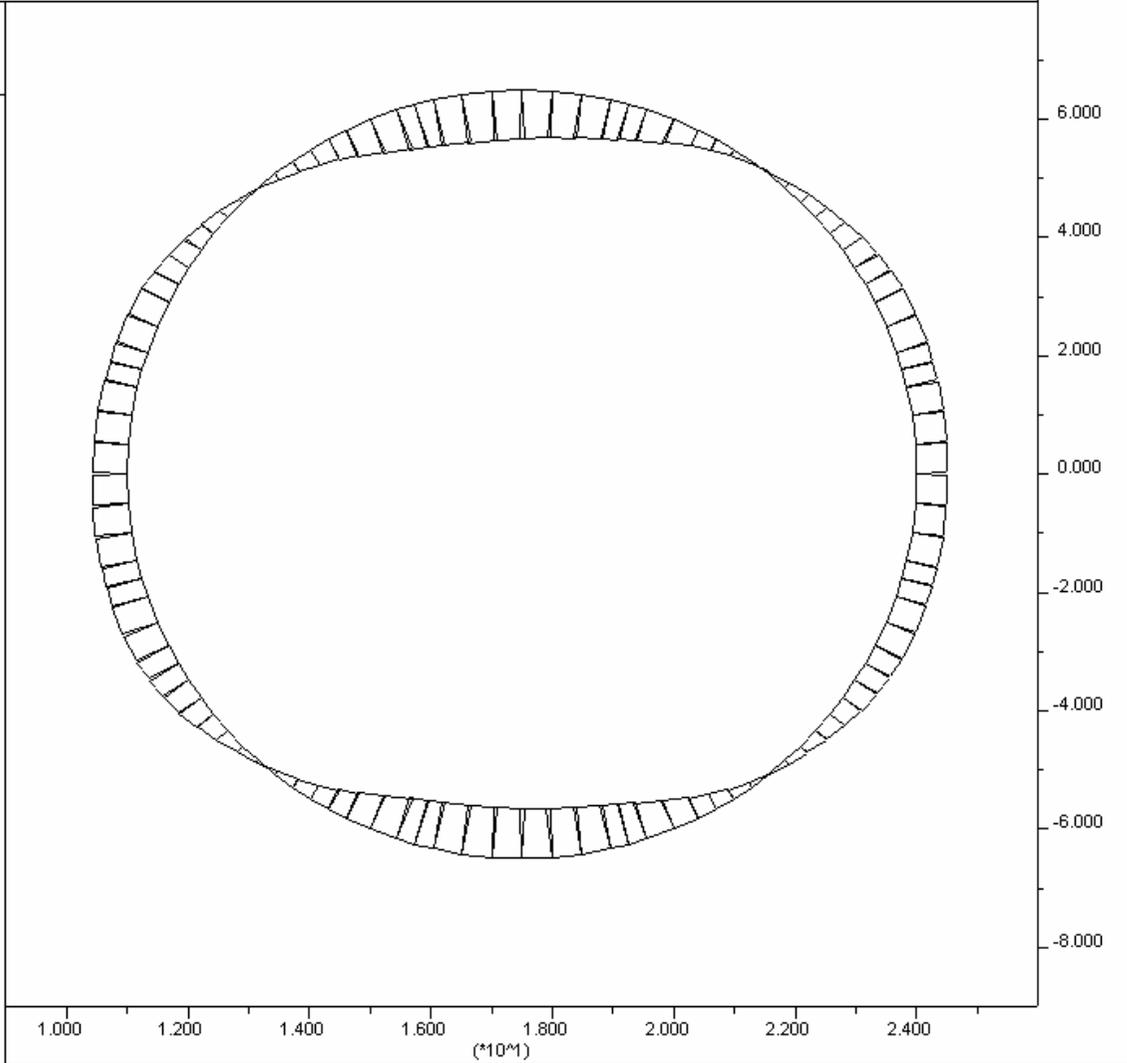
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30869
9.000E+00 <x< 2.600E+01
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
Moment on
Structure Max. Value
1 (Beam) 1.173E+05

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 5 - SOLLECITAZIONI ASSIALI (CANNA DX)

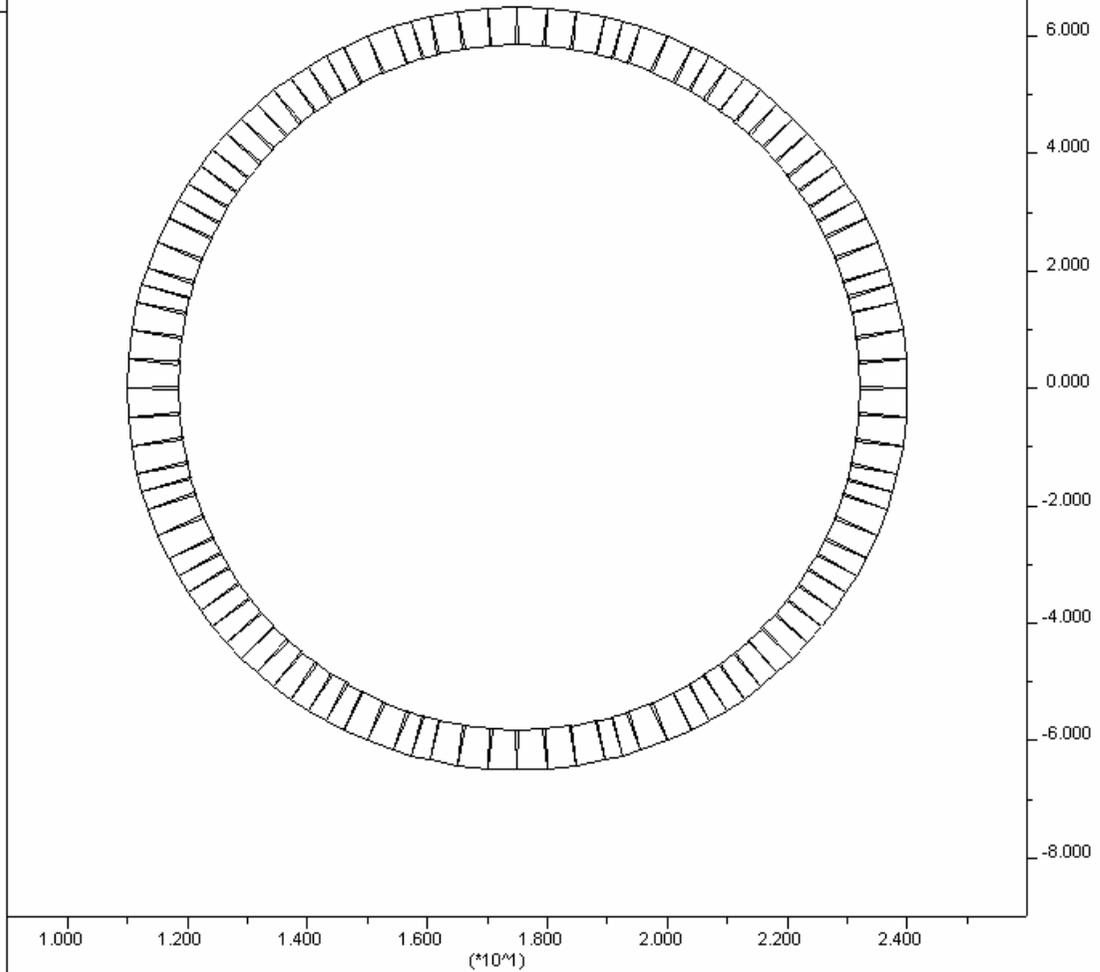
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30869
9.000E+00 <x< 2.600E+01
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
Axial Force on
Structure Max. Value
1 (Beam) 5.860E+06

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 5 - SOLLECITAZIONI DI TAGLIO(CANNA DX)

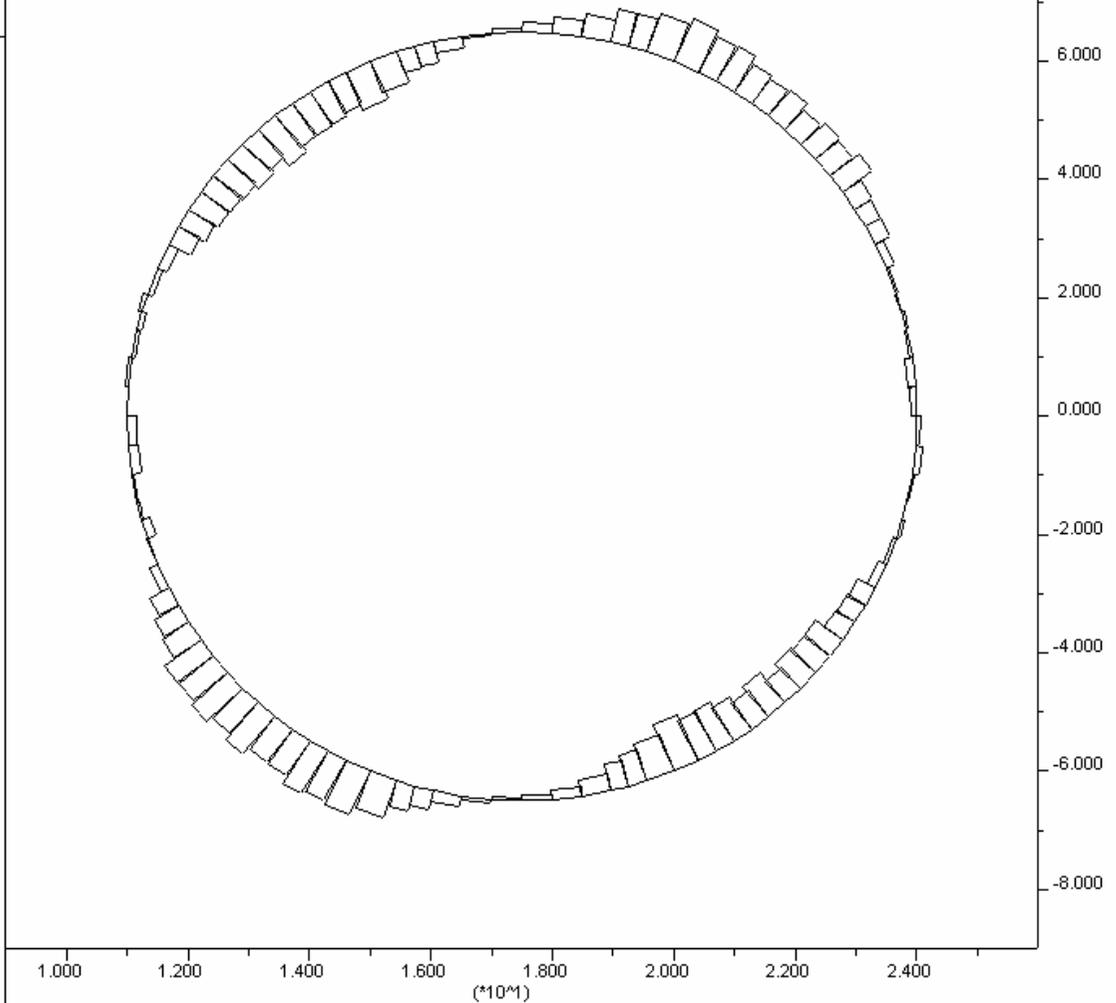
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30869
9.000E+00 <x< 2.600E+01
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
Shear Force on
Structure Max. Value
1 (Beam) -4.438E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 5 - SOLLECITAZIONI FLETTENTI (CANNA SX)

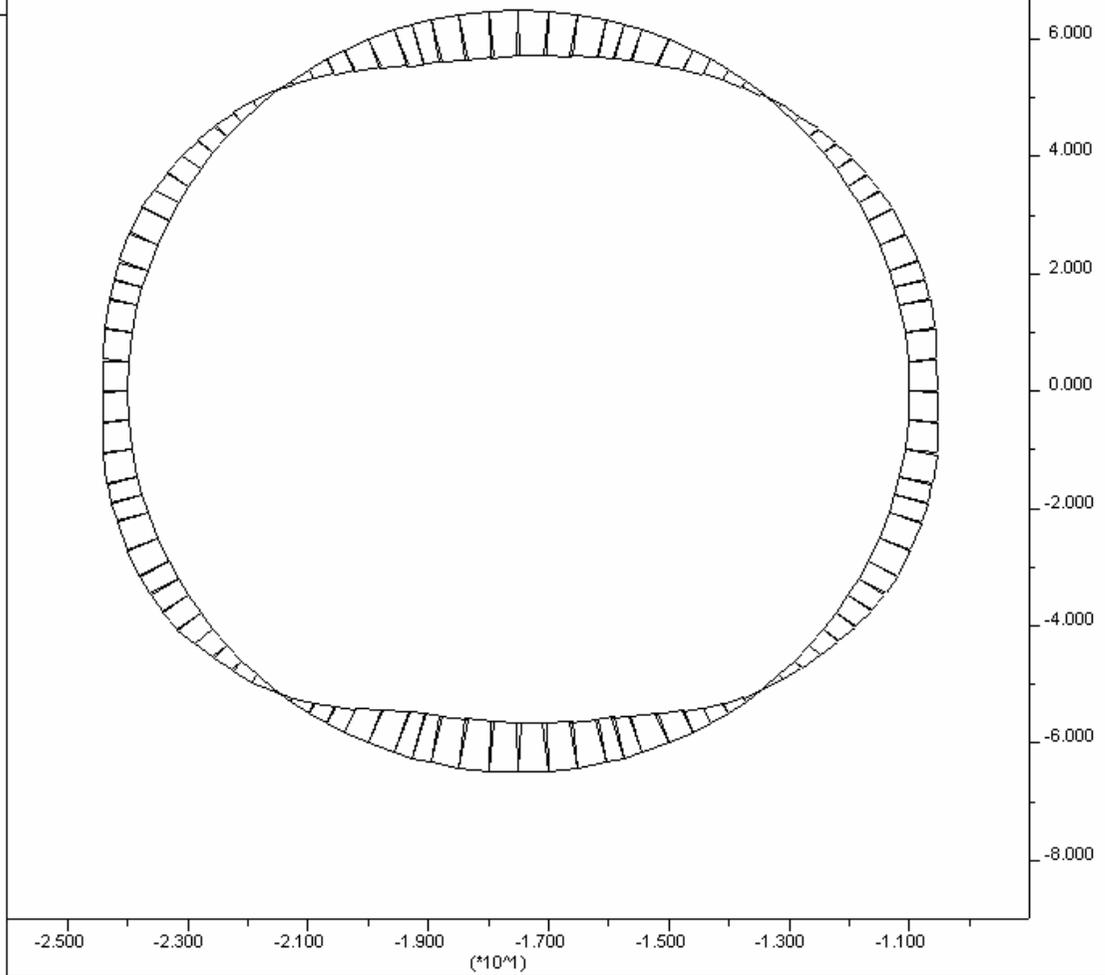
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30869
-2.600E+01 <x< -9.000E+00
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
2 (Beam) 7.330E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 5 - SOLLECITAZIONI ASSIALI (CANNA SX)

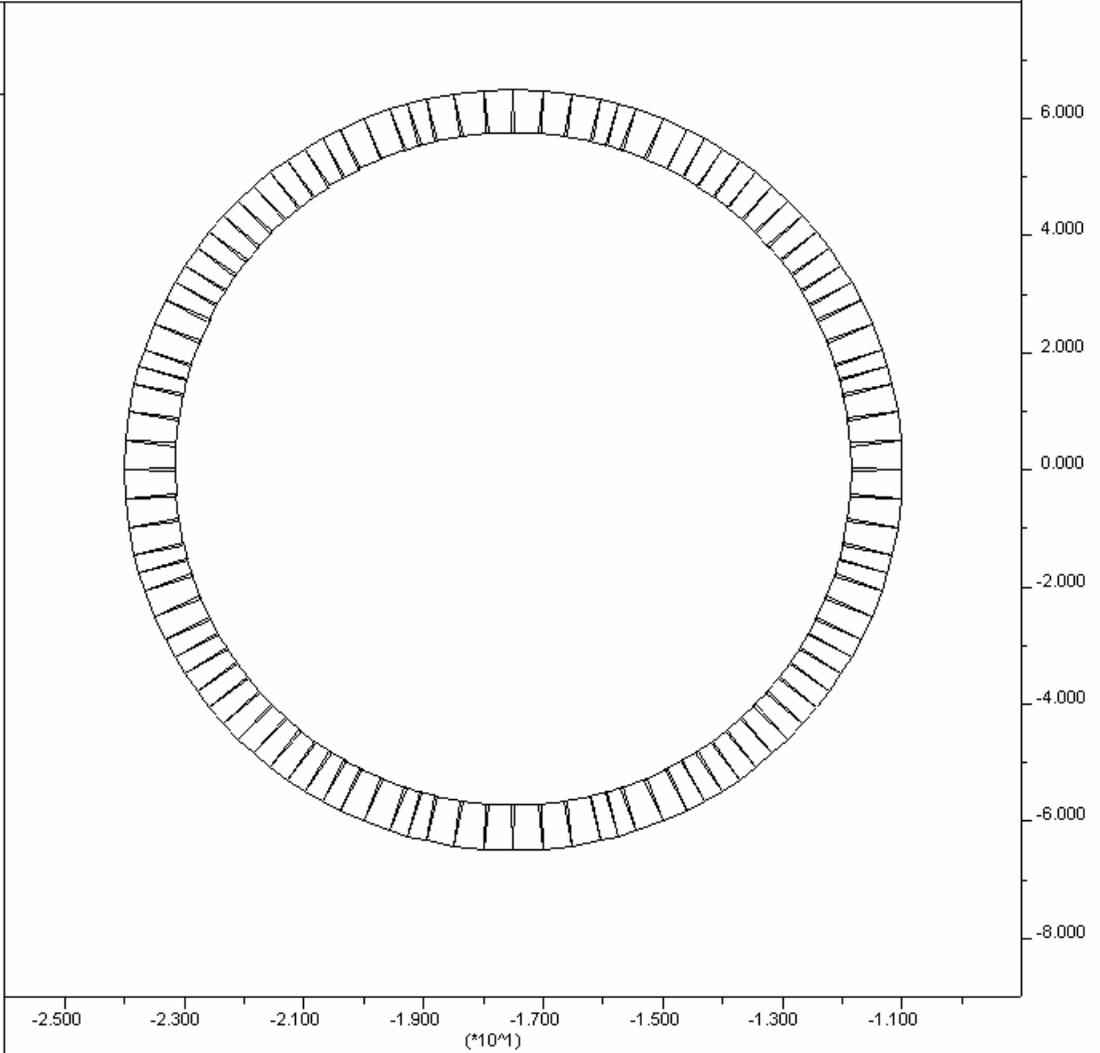
FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30869
-2.600E+01 <x< -9.000E+00
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
2 (Beam) 4.985E+06

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA



JOB TITLE : SCAVO MECCANIZZATO: TIME 5 - SOLLECITAZIONI DI TAGLIO(CANNA SX)

FLAC (Version 4.00)

LEGEND

26-May-06 13:05
step 30869
-2.600E+01 <x< -9.000E+00
-9.000E+00 <y< 8.000E+00

Beam Plot
2 (Beam) -3.400E+04

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, Minnesota USA

